

## 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24年 5月 25日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20240005

研究課題名（和文）アンテナの指向性を利用するユビキタスインフラストラクチャに関する実証的発展研究

研究課題名（英文）Advanced Empirical Study on Ubiquitous Infrastructure using Directional Antennas

研究代表者

渡辺 尚 (WATANABE TAKASHI)

静岡大学・創造科学技術大学院・教授

研究者番号：90201201

研究成果の概要（和文）：

アンテナの指向性を利用したユビキタスインフラを開発することを目的とし、可変指向性を利用したメディアアクセス制御(MAC)、ルーティングの高度化、テストベッドの開発と実証実験等を行った。より具体的には、指向性 MAC、ルーティングプロトコルの高度化としては、①マルチレート環境に適した指向性 MAC プロトコル、②指向性隠れ端末問題やデフネス問題を低減するルーティング、③複数メインローブとネットワークコーディングを利用したマルチキャスト、メインローブとヌルを同時利用するマルチレート MAC などを開発した。また、テストベッドの開発と実証実験としては、①UNAGI と MICA mote を用いた階層型ネットワークの構築と実験、②特定実験試験局免許を取得した USRP2/GnuRadio による実験などを行った。以上の成果を国内外の学会等で発表した。

研究成果の概要（英文）：

The study developed media access control and routing protocols and testbed for experiments of these protocols for ubiquitous infrastructure using smart antennas. The developed techniques include multi-rate directional protocol, protocols for hidden terminal/deafness problems, network coding multicast with main robes and null, hierarchical testbed with UNAGI and mica motes and licensed USRP/GnuRadio. The obtained results were published and presented in journals and at conferences.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2009年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2010年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2011年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
年度			
総計	38,400,000	11,520,000	49,920,000

研究分野：総合領域

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：ユビキタスネットワーク、アドホックネットワーク、メディアアクセス制御(MAC)、スマートアンテナ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、生活環境に多数のセンサ、プロセッサ、アクチュエータ等を埋め込み、詳細かつタイムリーに収集した情報に基づいて様々

な機器を制御し高度サービスを提供するユビキタス社会の検討が進んでいる。ユビキタス社会を支える通信インフラストラクチャの開発に当たっては、1)大容量化やノードの

小型化・省電力化、2)十分なノード数を扱えるスケーラビリティ、3)実機での実験的検証、4)アプリケーションの4点が問題になる。

1)に対して、空間利用効率向上を目指したアドホック・センサネットワークへの指向性アンテナの利用に関して、MMAC、DMAC、DMAP、DDSR等のメディアアクセス制御(MAC)およびルーティングが提案されている。我々も指向性MACプロトコルSWAMP等を提案している。SWAMPは、ビーム方向性制御のための位置情報の把握および空間効率向上・通信距離拡張を4種ビームパターンと2種通信モードを切り替えることで同時に解決する。これにより、MAC層における三つの問題点(指向性隠れ端末、deafness、unheard RTS/CTS)が低減できることを明らかにしている。また、ノードの小型化・省電力化に対しては、小型センサに簡単な通信機能を持たせ、マルチホップでセンシング情報を収集するセンサネットワークの研究が進められている。ノード省電力化のために、必要時以外は通信回路の電源をオフにするスリープ動作を導入したS-MAC、T-MACや、データ集約を適用したDirected Diffusion等が提案されている。代表者らも、データの分散送信手法DiversiveCast、回収・交換が容易なセンサネット、受信電力を用いた省電力ルーティング等を提案している。

2)に対しては、IEEE 802.11s等のメッシュネットワークや、各種階層型プロトコルが提案されており、代表者らも階層型アドホックネットワークの提案等行っている。

一方、3)に関連して、上記1)および2)の各種方式は、指向性アンテナのビームパターンを理想化したシミュレーションによる性能評価が主であり、実装実験例はほとんど報告されていない。これは従来、アンテナを機械的に回転するか、フェーズドアレーを用いて指向性制御する必要があり、構造が複雑で消費電力も大きく小型化が困難なことに起因する。

4)のアンテナ指向性を利用する応用に関連して、各所でユビキタス応用の検討がなされており、申請者らも土木、災害、ITS応用の検討を開始しているが、3)の実証実験例の不足もあり、十分な知見が得られていないのが現状である。

申請者らは2005年度より基盤研究Aとして、ATRと共同で実際のスマートアンテナ(ESPARアンテナ)を搭載した実装実験装置UNAGI/ESPARを開発し、指向性アンテナを用いた無線ネットワークプロトコルの研究開発を進めてきた。大平ら(ATR)により開発されたESPARアンテナは、可変容量デバイスにより指向性を電子的に制御する。ダイナミックレンジが広く、ハードウェアが簡素化できる点が特徴である。申請者らは、実証的研究

により、数台程度の比較的小規模なネットワークにおける指向性MACプロトコルの有効性に関する知見を得ており、下記の着想に至った。

1)に対し、実装実験で指向性アンテナの有用性を評価する過程で、温度や湿度等のデータだけでなく、動画像にまでネットワークの大容量化を図れる可能性を見出した。小型化、省電力化に関しては、センサノードはシングルホップでアクセスポイントに送信する等、シンプルなハードにする必要があるとの認識に至った。

2)に対し、シミュレーションにより、フラットなネットワークでは性能限界があるとの知見を得た。小型化・省電力化の観点でも、センサノードの機能を絞りバックボーン側に機能を移すことで、ネットワーク規模を百台程度にまで拡大し、ハード、消費電力、移動性に応じた階層的なルーティングの開発が不可欠であるとの着想に至った。

3)に対し、これまでの数台による実証実験のノウハウを活用し、2)で開発した階層型ネットワークを百台規模で実証実験により評価することで、学術的にも産業的にも大きな貢献ができると考えた。

4)に関して、社会環境からの要請により情報セキュリティ確保の重要性を認識し、指向性アンテナが所望方向以外では電波を送受信できないという特質を、セキュアな通信の実現に利用できると考えるに至った。

## 2. 研究の目的

本課題は、アンテナの指向性を利用した大容量なユビキタスインフラを開発することを目的とする。特に、今まで取り組んできた「アンテナ指向性を利用したMACプロトコル数台レベルの実証実験およびアプリケーション検討」の課題を、アンテナの指向性を利用して1)指向性MAC、ルーティングプロトコルの高度化、2)アンテナの指向性を利用する階層型ネットワークのテストベッドの開発と実証実験、3)アンテナの指向性を利用するユビキタスアプリケーションの開発の点で発展させる。

## 3. 研究の方法

本研究は以下のサブテーマで研究を遂行した。

- 1) 指向性MAC、ルーティングプロトコルの高度化
- 2) アンテナの指向性を利用する階層型ネットワークのテストベッドの開発と実証実験
- 3) アンテナの指向性を利用するユビキタスアプリケーションの検討

## 4. 研究成果

1) 指向性 MAC, ルーティングプロトコルの高度化

① 指向性 MAC の高度化

マルチレート環境に適した指向性 MAC プロトコルを提案し, 計算機シミュレーションにより有効性を明らかにした。また, 指向性アンテナは, 空間利用効率向上のメリットを得られることは確認されているが, デフネス問題等により, マルチホップ環境では十分な性能を得られない。本研究では, デフネス問題への対処法として, 代理端末によるオポチュニスティック型通信方式 DOMAC を開発した。この方式により, 従来方式 DMAC に比べて 1.5 倍以上のスループット向上が確認できた。

② 指向性ルーティングプロトコルの高度化

ルートをジグザグにすることで指向性隠れ端末問題を低減するルーティングプロトコルを提案, 評価した。また, 提案 MAC プロトコルの光無線への適用を検討した。さらに, オーバーヒアリングに起因する, さらに隠れ端末問題を低減する指向性ルーティング手法を提案し, 有効性を確認した。また, デフネス問題にルーティングで対処する方式として, 単ルートに時間差をおいて送信するモデレート送信方式および複数ルートに交互にパケットを送信するオルタナティブキャスト方式を開発した。これらにより, 1.6 倍程度の性能向上を示した。

③ マルチキャストおよびブロードキャストの高度化

従来の国内外の研究では, スマートアンテナビームは単一のメインローブを利用している。しかし, 複数のメインローブを持つビームパターンやヌルを効果的に制御すればマルチキャストやブロードキャストの性能向上が見込まれる。そこで, 指向性アンテナを用いることによって高い送信レートでのマルチキャストを行い, ネットワークコーディングでのスループットをさらに向上させる手法を開発した。無指向性アンテナでのネットワークコーディングは低送信レートでのマルチキャストによってスループットが低下する可能性があるが, 提案方式は指向性ビームを用いた高送信レートでのマルチキャストによってこの問題を解決し, スループットを図る。計算機シミュレーション, テストベッドによる実験により評価した結果, 従来方式よりスループット性能が向上することを明らかにした。また, メインローブとヌルを同時利用するマルチレート MAC 方式を提案した。提案手法では, メインローブの方向とヌルの方向を計

算した。複数のビームパターンをあらかじめ計算する。そして, RTS 受信時の状況に応じて最適なビームパターンを選択する。その後, 所望方向へ高いアンテナ利得を得つつ干渉端末方向へのアンテナ利得を低くすることで高いスループットを実現する。詳細なシミュレーション評価を行い, 約 20% スループットが向上できることを示した。

④ 端末移動に伴う指向性通信の性能と改善方式の開発

指向性ビーム幅がネットワーク性能に与える影響をシミュレーションで評価と考察を行った。この結果を用い, 端末移動とトラフィックフローによってビーム幅を適応的に決定する方式を提案した。性能評価から, ビーム幅の適応的な決定により, 移動速度が大きいときやトラフィックフローが多いときに, 一定のビーム幅を用いるより高いスループットを実現できることを明らかにした。

⑤ 動的スペクトル割り当て方式などの開発

動的にスペクトルを割り当てる方式として, マルチホップ環境でセカンダリユーザの通信をマルチレートによって効率化する方式を開発した。シミュレーション評価の結果, 従来方式に比べて約 30% スループットが向上することを示した。その他, スーパーポジション符号化, 全二重通信など新しい物理層技術を利用する方法を検討した。

2) アンテナの指向性を利用する階層型ネットワークのテストベッドの開発と実証実験

① 従来の基礎検討で得られたスループット特性をベースとして, UNAGI と MICAmote を用いた階層型ネットワークを構築し実証実験を行った。この実験により, 指向性アンテナノードを部分的に使用することにより, 通信の効率化とともにコストパフォーマンスの高いシステム構成が可能となることを実証的に示した。また, 階層化センサネットワークにおける中継端末にスマートアンテナを利用し, この指向性をすべての中継端末で同期させることで, 中継端末間の距離を大きくし, 中継端末コスト, システム消費電力の低減を実現する方式を設計した。

② テストベッドによる実機実験: テストベッドの 4 台の端末を用いて, 同方向並行型, 逆方向並行型, 交差型 のトポロジーで実験を行った。その結果, 端末ペア間距離が 20 - 40 m の場合に指向性アンテナの効果が高いことを明らかにした。また, 逆方向並行型は干渉が大きくなるため同方向並行型よりも性能が劣化する

- ことを明らかにした。
- ③ 指向性アンテナを利用した動的ルーティング方式の開発：他の通信からの干渉を理論的に導出した。理論式に含まれる4つのパラメータに関して、テストベッドを用いて種々のトポロジーによる実機実験により計測を行った。これらの成果を元に、動的ルーティングアルゴリズムを開発した。
  - ④ USRP2/GnuRadio による実験準備として、特定実験試験局（免許番号海実第2285-2288）の取得および基礎実験を行った。
- 3) アンテナの指向性を利用するユビキタスアプリケーションの検討  
階層型ネットワークのアプリケーションの一つとして、M2Mのアクセスネットワークへの応用を検討した。また、緊急車両が走行路を確保するために、必要な領域のみにデータを通信する交通システムへの応用や多数の医療機器が混在している医療現場でのデータ通信への応用を考案した。
- 以上の成果は、IEEE、電気学会、電子情報通信学会、情報処理学会等の論文誌、国際会議、研究会、全国大会等で発表した。情報処理学会シンポジウムデモ部門での1位、電気学会優秀論文発表賞、情報処理学会学生奨励賞などを受賞した。

## 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）

2008年～2011年の4年間で、雑誌論文（ジャーナル論文16件、国際会議27件、国内研究会等92件）を発表した。以下に代表的な論文を示す。

〔雑誌論文〕（計39件）

- 1) 谷川昂、齊藤冬樹、芝田善紀、難波耕佑、森茂樹、四方博之、無線通信を用いた大量ペンライト群のリモート制御、電子情報通信学会2012年総合大会、2012.3、p.683、査読無。
- 2) Jiefu Yu, Takashi Watanabe, Toward a Directional Routing Protocol with Least Interference、電子情報通信学会、信学技報、AN2011-89(2012-03)、2012.03、pp.31-36、査読無。
- 3) 石原晃平、石原進、点滅光に関する視覚情報を用いた耐移動性を持つ指向性無線通信の基礎検討、情報処理学会第74回全国大会、4Y-1、Vol.74、No.3、2012.3.7、pp.3.421-3.422、査読無。
- 4) Tao Xu, Masahiro Watanabe, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, An RSSI-Based Cross Layer Protocol for Directional Ad Hoc Networks and its Implementation, IPSJ Journal、Vol. 20 No.2、2012.02、pp.-、査読有。
- 5) 石原進、大沢昴史、稲垣徳也、通信指向性の同期切り替えを行う階層型省電力無線センサネットワーク、情報処理学会論文誌、Vol.53、No.1、2012.01、pp.308-319、査読有。
- 6) 青木勇太、萬代雅希、渡辺尚、アドホックネットワークにおけるスマートアンテナの適応制御方式について、電子情報通信学会、信学技報、AN2011-56(2012-1)、2012.01、pp.7-12、査読無。
- 7) 木村真樹、萬代雅希、渡辺尚、ビームパターンの組み合わせを用いるメディアアクセス制御方式について、電子情報通信学会、信学技報、AN2011-57(2012-1)、2012.01、pp.13-18、査読無。
- 8) 小野悟、萬代雅希、渡辺尚、キャンパスネットワークにおけるスイッチングハブの輻輳制御に関する考察、IPSJ Transactions on Consumer Devices and Systems, Vol. 1. No 1, 2011.12、pp.38-46、査読有。
- 9) M. Kaneko, K. Hayashi, P. Popovski, H. Yomo, H. Sakai, Uplink Contention-based CSI Feedback with Prioritized Layers for a Multi-Carrier System, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.10, No.12, 2011.12、pp.4282-4293、査読有。
- 10) Shizuo Mizushima, Takashi Watanabe, Octagonal ESPAR with Cone Reflector, 2011 Korea-Japan Microwave Conference, CD-ROM FR2-4-1, 2011.11、sadokuari.
- 11) H. Yomo, Y. Maeda, Distributed MAC Protocol for Physical Layer Network Coding, Proc. of WPMC 2011, 2011.10.03、pp.1-5、査読有。
- 12) 玉置健太、萬代雅希、渡辺尚、アドホックネットワークにおける複数周波数帯を利用する通信方式について、電子情報通信学会、信学技報、AN2011-51(2011-10)、2011.10、pp.177-182、査読無。
- 13) Ari Raptino H, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Multi-rate Transmission in 802.11-Based OSA Multi-hop Ad Hoc Networks, The 6th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Application (TSSA) 2011, CD-ROM, 2011.10、pp.11-16、査読無。
- 14) Ari Raptino H, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Multi-rate Opportunistic Spectrum Access in Multi-hop Ad Hoc Networks, 22nd IEEE Personal Indoor Mobile Radio Communications, CD-ROM,

- 2011.09, pp. 567-571、査読有。
- 15) 水品静夫、渡辺尚、円錐反射器上に構成した八角配列 ESPAR、電子情報通信学会、信学技報、MW2011-80, 2011.09, pp. 9-14、査読無。
  - 16) 玉置健太、Ari Raptino H、木谷友哉、萬代雅希、渡辺尚、複数周波数帯を利用するアドホックネットワークの通信方式について、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル DICOM2011 シンポジウム、2011.07, pp. 263-270、査読無。
  - 17) Jiefu Yu, Takashi Watanabe, Experimental Discussions on Wireless Networks using Smart Antennas、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル DICOM2011 シンポジウム、2011.07, pp. 255-262、査読無。
  - 18) 青木勇太、木谷友哉、萬代雅希、渡辺尚、スマートアンテナのビーム幅と送信電力の適応的な制御方法について、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル DICOM2011 シンポジウム、2011.07, pp. 244-254、査読無。
  - 19) 横田翔子、萬代雅希、渡辺尚、代理端末を用いるアドホックネットワークプロトコルの検討、電子情報通信学会総合大会、B-21-12, 2011.03, pp. 668、査読無。
  - 20) 玉置健太、Raptino H. Ari、木谷友哉、萬代雅希、渡辺尚、複数周波数帯域を利用するマルチホッププロトコルについて、電子情報通信学会総合大会、B-21-17, 2011.03, pp. 673、査読無。
  - 21) 青木勇太、木谷友哉、萬代雅希、渡辺尚、アドホックネットワークにおけるスマートアンテナのビーム制御効果について、電子情報通信学会総合大会、B-21-11, 2011.03, pp. 667、査読無。
  - 22) 木村真樹、萬代雅希、渡辺尚、干渉を考慮したビームパターンを用いる指向性 MAC プロトコル、電子情報通信学会 AN 研、信学技報、Vol. 110 No. 454、AN2010-79, 2011.03, pp. 233-238、査読無。
  - 23) Ari Raptino, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, About Multi-rate Transmission in Opportunistic Multi-hop Cognitive Radio Ad Hoc Networks、電子情報通信学会 AN 研、信学技報、Vol. 110 No. 454、AN2010-82, 2011.03, pp. 251-256、査読無。
  - 24) Hiroyuki Yomo, Masaki Bandai, Sadao Obana, Takashi Watanabe, Transmission Scheduling for PHY-Layer Wireless Network Coding, The 16th Asia-Pacific Conference on Communications 2010 (APCC 2010), CD-ROM, 2010.10, 査読有。
  - 25) Susumu Ishihara, Koji Ishibashi, Satoshi Horibe, Hiroshi Sakamoto, Takehiro Hoshikawa, Takashi Watanabe, Using GNU Radio for research on cognitive radio networks, in proc. Of 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC' 10) CD, CP-2, 2010.9.25, 査読有。
  - 26) 坂本 浩、萬代雅希、渡辺尚、スマートアンテナを利用した M2M データ収集無線アクセス系構成に関する考察、電気学会論文誌 (電子・情報・システム部門)、Vol. 130 No. 7 Sec. C, 2010.07, pp. 1262-1270、査読有。
  - 27) Takafumi Furukawa, Masaki Bandai, Hiroyuki Yomo, Sadao Obana, Takashi Watanabe, Multi-Lobe Directional Transmission for Network Coding in Multi-Rate Ad Hoc Networks, 8th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT2010), CD-ROM, 2010.06, 査読有。
  - 28) Tao Xu, Masashiro Watanabe, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, An RSSI-Based Cross Layer Protocol for Directional Ad Hoc Networks and its Implementation, The 5th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2010), CD-ROM, 2010.04, 査読有。
  - 29) 石原進、大沢昂史、稲垣徳也、通信指向性の同期切り替えを行う階層型省電力無線センサネットワーク、情報処理学会研究報告、モバイルコンピューティングとユビキタス通信、Vol. 2010-MBL-53, No. 54, 2010.3.27, pp. 1-6、査読有。
  - 30) Yu Takada, Masaki Bandai, Tomoya Kitani, Takashi Watanabe, Cooperative Data Buffering with Mobile Sinks for Wireless Multimedia Sensor Network, Information Proceeding Society of Japan (IPSJ), Vol. 3, 2010.03, pp. 856-869、査読有。
  - 31) Yoshia Saito, Susumu Ishihara, Hiroshi Mineno, Tadanori Mizuno, Takashi Watanabe, Evaluation of traffic dispersion methods for synchronous distributed multimedia data transmission on multiple links for group of mobile hosts, Int. J. Applied Systemic Studies, Vol. 3, No. 1, 2010.03, pp. 89-101、査読有。
  - 32) 高塚雄也、長島勝城、高田昌忠、萬代雅希、渡辺尚、指向性アンテナのマイナーローブを考慮したアドホックネットワーク MAC プロトコル、電子情報通信学会

- 論文誌、Vol. J92-B No. 3、2009.03、pp. 540-554、査読有。
- 33) 鈴木孝明、萬代雅希、渡辺尚、複数センサネットワークにおけるパケット配送送信を用いた長寿命化、電子情報通信学会論文誌(B)、Vol. J91-B No. 8、2008.08、pp. 831-843、査読有。
- 34) Masaki Bandai, Takamasa Mioki, Takashi Watanabe, A Routing Protocol with Stepwise Interest Retransmission for Wireless Sensor Networks, IEICE Transactions on Communications, Vol. E91-B No. 45, 2008.05, pp. 1446-1453、査読有。
- 35) Ryugo Nishii, Tatsuji Munaka, Yoshiaki Terashima, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Non-contention Data Transmission Method for Improving the Down-Link Data Delivery in Asymmetric Wireless Multi-Hop Access Network, IEICE TRANSACTIONS on Communications (Japanese Edition), Vol. J91-B No. 4, 2008.04, pp. 373-387、査読有。
- 36) Masahiro Watanabe, Sadao Obana, Takashi Watanabe, Ad Hoc Networks Testbed Using a Practice Smart Antenna with IEEE802.15.4 Wireless Modules, Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks, Chapter XX111 2008.04, pp. 500-512、査読有。
- 37) Masaki Bandai, Satoshi Nakayama, Takashi Watanabe, Signal Strength Based Energy Efficient Routing for Ad Hoc Networks, IEICE Transactions on Communications, Vol. E91-B No. 4, 2008.04, pp. 1006-1014、査読有。
- 38) 西井龍五、撫中達司、萬代雅希、渡辺尚、非対称ワイヤレスマルチホップアクセスネットワークにおける下りデータ転送効率向上のためのノンコンテンション・データ転送方式、電子情報通信学会論文誌(B)、Vol. J91-B、2008.04、pp. 373-387、査読有。
- 39) Masanori Takata, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, RI-DMAC: a receiver-initiated directional MAC protocol for deafness problem, International Journal of Sensor Networks (IJSNet), Vol. 5, No. 2/2009, DOI 10.1504/IJSNet.2009.024678, 2008.04, pp. 79-89、査読有。

[学会発表] (計1件)

- 1) 渡辺尚、[招待講演] 無線ネットワークの現状と将来～時間空間周波数資源の極限利用を目指して～、電子情報通信

学会, 2011.05.26、機械振興会館(東京都港区)

[図書] (計1件)

情報ネットワーク、白鳥監修、宇田、岡部、今野、佐藤、菅沼、杉浦、村山、渡辺、共立出版、第11章 無線とモバイルネットワーク、2012、pp.115-130

[その他]

ホームページ等

<http://aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 尚 (WATANABE TAKASHI)  
静岡大学・創造科学技術大学院・教授  
研究者番号：90201201

### (2) 研究分担者

・小花 貞夫 (OBANA SADA0)  
電気通信大学・情報理工学研究所・教授  
研究者番号：60395043

・水野 忠則 (MIZUNO TADANORI)  
愛知工業大学・情報科学部・教授  
研究者番号：80252162

・萬代 雅希 (BANDAI MASAKI)  
上智大学・理工学部・准教授  
研究者番号：90377713

・石原 進 (ISHIHARA SUSUMU)  
静岡大学・創造科学技術大学院・准教授  
研究者番号：10313925

・四方 博之 (YOMO HIROYUKI)  
関西大学・システム理工学部・准教授  
研究者番号：00510124

### (3) 連携研究者

渡辺 正浩 (WATANABE MASAHIRO)  
国際電気通信基礎技術研究所・適応コミュニケーション研究所・客員研究員  
研究者番号：00395047