

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560455

研究課題名(和文) 時空間マルチホップ無線アクセス方式のテストベッド開発とITS応用

研究課題名(英文) Spacetime wireless multi-hop communication testbed and its application to ITS

## 研究代表者

上原 秀幸 (UEHARA, Hideyuki)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00293754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、方向・指向性をキーワードに、物理層(アンテナ)、データリンク層(メディアアクセス制御)、ネットワーク層(経路制御)の各要素技術の特性を考慮したクロスレイヤ設計により、有限な無線資源を有効活用できる通信制御方式とその実証機であるテストベッドを開発した。電波暗室および屋外での実証実験の結果、所望の特性が得られていることを確認した。開発したシステムの主な応用例としては、快適な車のネットワーク化を実現するための車々間・路車間通信が想定される。

研究成果の概要(英文)：In this study, the wireless multi-hop communication testbed and the spacetime media access control schemes have been developed. This system is designed, exploiting features of the physical, datalink and network layers such as directional antennas, media access control and routing protocols, in order to use the limited radio resources efficiently. The system was verified through the experiment in the anechoic chamber and the outdoors. The application of the developed system is expected to be used in V2X communication.

研究分野：通信工学

キーワード：マルチホップ通信 アクセス制御方式 ルーティング方式 スマートアンテナ 高度道路交通システム

## 1. 研究開始当初の背景

スマートフォンをはじめとする無線機能を搭載した電子機器が急激に増加し、Mark Weiser 氏が提唱したユビキタスな社会が始まろうとしている。テレビや白物家電までもが無線でつながろうとする一方で、ケータイの世界普及率は100%を超え、次のターゲットとして車の無線化・ネットワーク化に注目が集まっている。これまで車の情報化は事故防止などに主眼を置いてきたが、今後は無線端末の一つとして捉えるべきであり、通信ハブとして主要な役割を果たすことになる。このような社会的な背景を踏まえると、無線資源(周波数、時間、空間、電力)を有効活用する通信技術の開発は喫緊の課題である。たとえば、地上アナログ放送跡地の UHF 帯 10MHz 幅が車々間用に割り当てられたが、ETC 等で用いられている 5.8GHz 帯に比べ、電波の周り込みによる通信エリアの拡大は期待できる反面、干渉の増大や通信容量の不足といった問題が懸念される。一方で、5.8GHz 帯は遮へいに弱くエリア拡大にはマルチホップ接続は必須である。また、5.8GHz 帯で車々間通信を運用するには既存の路車間システムとの干渉が問題となる。従来、高速大容量化が通信技術の研究開発の主流であったが、現在その限界が見え始めているのも事実であり、有限な無線資源をより多くのユーザ/デバイスでいかにうまく共有するか(メディアアクセス制御)、ユーザ/デバイス間でいかに助け合いつなげるか(マルチホップ接続)といった技術の進展が望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究では、方向・指向性をキーワードに、物理層(アンテナ)、データリンク層(メディアアクセス制御)、ネットワーク層(経路制御)の各要素技術の特性を考慮したクロスレイヤ設計により、有限な無線資源を有効活用できる通信制御方式とその実証機であるテストベッドの開発を目的とする。開発するシステムの主な応用例としては、快適な車のネットワーク化を実現するための車々間・路車間通信を想定している。

## 3. 研究の方法

### (1) 指向性メディアアクセス制御方式

可変指向性アンテナを用いることで、時間軸に加え空間をも共有できるようになることから、無線資源の利用効率が向上する。しかしながら、難聴問題や指向性隠れ端末問題、リスニング期間(LP: Listening Period)の増加によりスループットが劣化することが問題であった。本報告では研究開発した中から以下の2方式を紹介する。

#### ①バースト伝送

RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) 交換に失敗したとき、あて先を他端末に切り替えることで難聴問題を軽減できる。しかし、

指向性隠れ端末問題に対処するために通信状況を一定時間モニタする必要があるが効率が悪い。そこで、1度の RTS/CTS 交換で複数のデータ伝送を可能とする方法を検討する。

#### ②パケットスケジューリング

RTS/CTS 交換に失敗したときにあて先を他端末に切り替える際にあて先端末の選び方を検討する。具体的には、直前に通信成功した方向の端末を優先する方法と、RTS の送信回数が少ない方向の端末を優先する方法である。

## (2) テストベッド開発

我々の研究室でこれまでに開発してきた無線通信テストベッドをベースとして、指向性 MAC (Media Access Control) プロトコルと指向性ルーティングプロトコルを評価するための新たなシステムを開発する。MAC プロトコルの評価に当たっては経路を事前に与えるものとする。また、ルーティングプロトコルの評価に当たっては、MAC プロトコルには広く知られた一般的な方式 (CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) を用いるものとする。実験は電波暗室と屋外で行う。屋外実験を行うために、特定実験試験局の免許を取得する。

## 4. 研究成果

### (1) 指向性メディアアクセス制御方式

#### ①バースト伝送

バースト伝送により、長い DIFS (DCF Inter-Frame Space), RTS/CTS 交換, LP によるオーバヘッドをデータ伝送に対して相対的に小さくし、スループットの向上を図った。また、バースト伝送を効果的に機能させるため、MAC 層に複数のパケットを管理するバッファを用意した。本方式の新しい機能は以下の三つである。

- バッファ内にあて先が同じパケットがあるかどうかを識別する機能
- バースト伝送
- 送信禁止期間 (DNAV: Directional Network Allocation Vector) の変更

図1にバースト伝送の手順を示す。送信端末 T は、DIFS とバックオフの間に指向性物理キャリアセンスを行う。チャンネルがアイドルであれば、RTS/CTS 交換後に DATA フレームを送信する。このとき、バースト伝送モードを要求する情報を DATA フレームに含めておく。端末 R は、ACK (Acknowledgement) フレームを端末へ送信するとともに、次の DATA フレームを待つ。このようにバースト伝送であっても、通常の CTS 直後の DATA/ACK 交換と同様に DATA/ACK のやり取りを行う。バースト伝送モードで DATA/ACK 交換に失敗した場合には、その DATA フレームの再送はすぐには行わず、DATA フレームを MAC 層バッファの元の場所に戻し、ランダムな時間を LP として全方位性ビームで待機する。LP 終了後に送

信されるのは、先ほど失敗したフレームではなく、DNAV の設定されていない先方向への DATA フレームのうち、MAC 層バッファに最も早く到着した DATA フレームである。

図 2 にバースト伝送時のスループット特性を示す。1000m×1000m のエリアに 30 台の端末をランダムに配置し、各端末は隣接端末と 1:1 の通信を行っている。評価した MAC プロトコルは、無指向性 MAC として IEEE 802.11 DCF、指向性 MAC としてベーシックな DMAC (Directional MAC)、そして難聴問題と隠れ端末問題に対処している OPDMAC (OPportunistic DMAC) を取り上げた。この結果から、バースト伝送を導入することでいずれの方式に対してもスループットを大きく改善できることが確認できた。

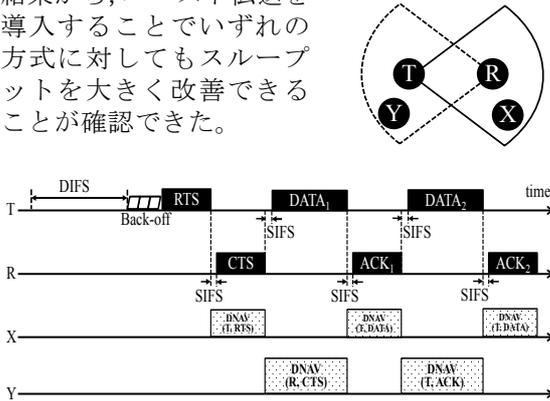


図 1：バースト伝送の手順とトポロジ

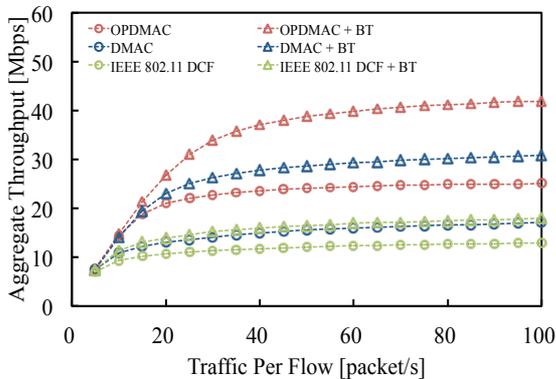


図 2：バースト伝送の効果

## ②パケットスケジューリング

従来手法は RTS/CTS 交換に失敗した際にパケットの発生時刻に基づいてパケットスケジューリングを行っていた。そこで、指向性つまり通信方向に着目し、二つの手法を開発した。一つ目は、直前に通信が成功した方向に位置する端末へのパケットを優先的に選択する成功方向優先手法 (SDP: Successful Direction Priority strategy) である。直前の通信に成功した方向は連続して成功する確率が高い場合、SDP による通信性能の向上が見込める。二つ目は、RTS の再送回数が少ない端末へのパケットを優先的に選択する最小再送回数優先手法 (MRP: Minimum Retransmission counts Priority strategy) である。RTS/CTS 交換に失敗した回数

の少ない端末への通信成功確率が高い場合、MRP による通信性能の向上が見込める。

図 3 にパケットスケジューリング適用時のスループット特性を示す。1000m×1000m のエリアに 20 台の端末をランダムに配置し、各端末は隣接端末と 1:1 の通信を行っている。評価した MAC プロトコルは OPDMAC である。この結果から、従来手法に比べ、SDP で 2.3%、MRP で 3.8%向上することが確認できた。MRP に比べ SDP の性能が低い原因として、直前に通信の成功した方向で他の通信が開始される場合があり、連続して通信が成功する確率が MRP の成功確率に比べて高くないからだと考えられる。

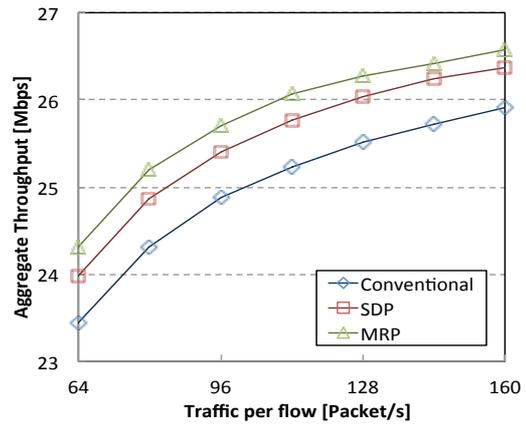


図 3：パケットスケジューリングの効果

## (2) テストベッド開発

二つのシステムを開発した。一つは指向性 MAC プロトコルを評価するためのシステム A、もう一つは指向性ルーティングプロトコルを評価するためのシステム B である。

### ①指向性 MAC プロトコル評価システム (システム A)

システム A の外観を図 4 に示す。GNU Radio が動作するホストコンピュータ、デジタル信号と RF 信号を相互に変換する USRP (Universal Software Radio Peripheral)、可変指向性アンテナとして自作した 5.11GHz 帯の 7 素子エスパアンテナ、およびこの指向

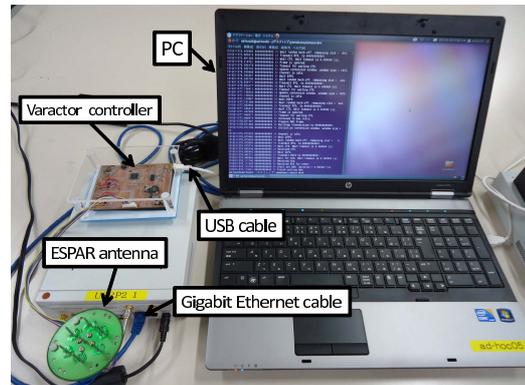


図 4：システム A の外観

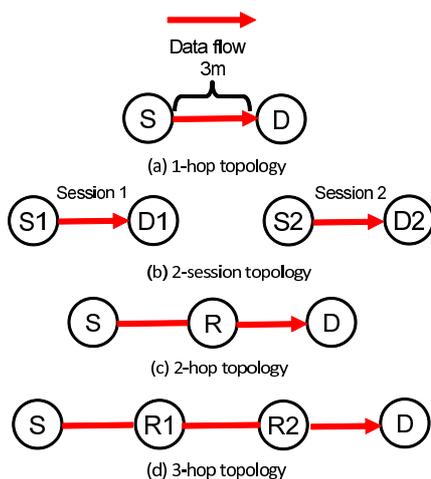


図 5：システム A 動作実験のトポロジ

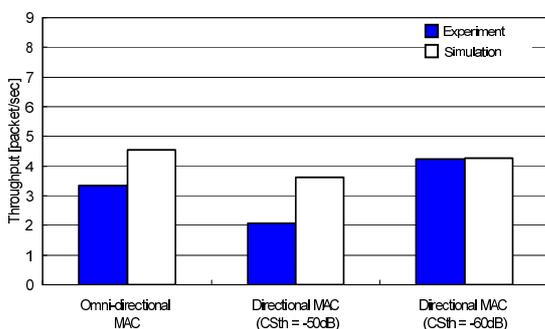


図 6：3 ホップ通信でのスループット特性

性ビームを制御するための回路から構成されている。ホストコンピュータと USRP 間はギガビットイーサケーブルで接続される。

MAC プロトコルとして、CSMA/CA をベースとした無指向性 MAC プロトコルと、DMAC をベースとした指向性 MAC プロトコルを実装した。この際、物理層から MAC 層へのソフトウェア処理遅延、および指向性ビーム切替時の処理遅延を考慮し、主要パラメータを設定した。

動作検証実験は、図 5 の 4 通りのトポロジを用いて電波暗室で行った。変調方式は GMSK (Gaussian filtered Minimum Shift Keying)、伝送速度は 1Mbps、データサイズは 100byte、送信電力は 6mW である。ここでは実験結果の一部を紹介する。詳細は雑誌論文①をご覧ください。図 5(d) に示す 3 ホップ通信でのスループット特性を図 6 に示す。無指向性 MAC プロトコルはホップ数の増加に伴いスループットが低下しているが、指向性 MAC プロトコルは図 5(b) のように同時通信を可能とする通信ペアが存在するため、ホップ数の増加によるスループットの低下が少ないことがシミュレーションと同様に確認できた。また、キャリアセンスしきい値を下げることでスループットが向上することも確認できた。これは、キャリアセンスしきい値を下げることで端末 S は端末 R の指向性ビームのバックローブから通信状況を把握することができ、衝突を軽減できたためである。多くのシミュレ

ーションで考慮されていないバックローブを積極的に利用することで、スループットの改善が見込めることを実験によって確認できた。

## ② 指向性ルーティングプロトコル評価システム (システム B)

システム B の外観を図 7 に示す。システム A と異なって 2 台の USRP から成り、それぞれに指向性アンテナが同軸ケーブルで接続されている。指向性アンテナとしては H 形エスパアンテナと指向性利得や FBR (Front Back Ratio) が同等の性能を有するログペリオディックアンテナを用いている。また、1 台のホストコンピュータには 1 台の USRP しか接続できないため、専用の同期ケーブルを用いて 2 台の USRP を接続している。

ルーティングプロトコルとして、AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) と我々の研究室で開発された DORP (Direction Oriented Routing Protocol) を実装した。DORP は車車間通信を想定して作られたルーティングプロトコルであり、車両の前後 2 方向の指向性ビームを必要とする。そのため、前述したように 2 系統の指向性アンテナを搭載するとともに、これらを用いて前後の到来方向の識別を可能とする機構を新たに開発し実装した。具体的には、FBR の利得差を利用して 2 本のアンテナの RSSI 値を比較して判別している。

動作検証実験は、図 8 のトポロジを用いて学内道路で行った (図 9)。屋外で実験を行うため、特定実験試験局の免許を取得した。経路探索時間 (RDT: Route Discovery Time) と経路変更時間 (RST: Route Switching Time) の結果を図 10 に示す。DORP は原理的に経路再構築を必要としないので、中継端末を B から C へ変更する時間がわずかであることが実験でも確認できた。また、結果の図は省略するが、信号の到来方向を判別し適切に経路表が作成されており、事前に位置情報をすることなく動作することも確認できた。

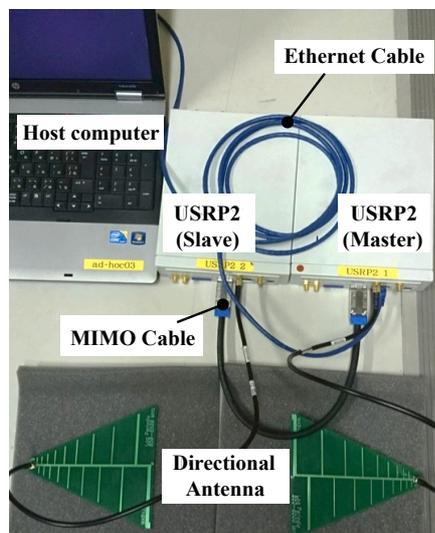


図 7：システム B の外観

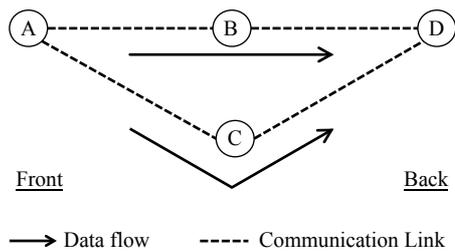


図 8：システム B 屋外実験でのトポロジ

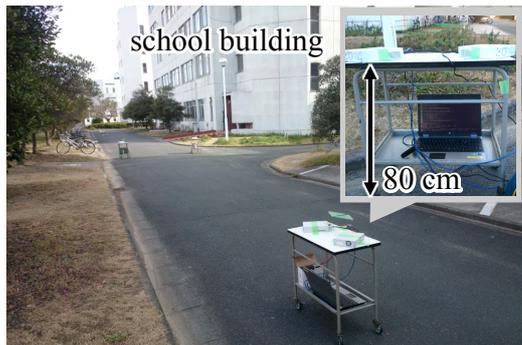


図 9：屋外実験の様子

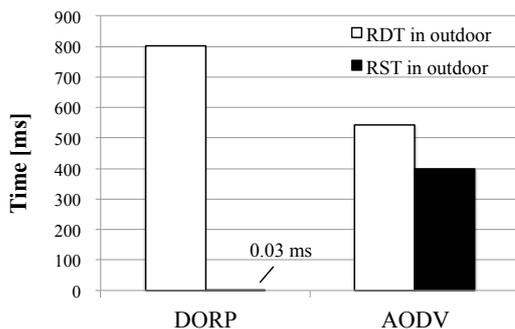


図 10：経路探索時間と経路変更時間

### (3) 今後の課題

本研究で得られた結果や知見を踏まえ、今後以下の点について研究を進めていく。

- ・ 屋外走行実験での特性評価
- ・ 開発したアンテナや MAC プロトコルを搭載した、真にクロスレイヤ設計されたテストベッドの開発
- ・ 電波資源をより有効活用するための全二重通信システムの開発

## 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 宮路祐一, 君島秋人, 大場昌範, 山川太一, 上原秀幸, 大平孝, “GNU Radio/USRP とエスパアンテナを用いた指向性 MAC プロトコル評価システム,” 信学論 B, Vol. J96-B, No. 2, pp. 83-91, 2013 年 2 月. (査読有) [学生優秀論文賞受賞]

[学会発表] (計 18 件)

- ① 徳永達也, 杉本健二, 宮路祐一, 上原秀幸, “マルチホップ環境でデータレートが難聴問題とスループットに与える影響,” 2015 年 3 月, 滋賀草津.
- ② 宮路祐一, 上原秀幸, “アドホックネットワークにおける全二重通信のための Opportunistic Multiple Access,” 信学総大, 2015 年 3 月, 滋賀草津.
- ③ 轡見眞太郎, 宮路祐一, 上原秀幸, “難聴問題に起因する不必要な通信要求の再送を削減するメディアアクセス制御方式の実機評価,” 信学会東海卒研発表会, 2015 年 3 月, 豊橋.
- ④ Kenji Sugimoto, Yuichi Miyaji and Hideyuki Uehara, “Effect of Short NAV in Heterogeneous Ad-Hoc Networks to Mitigate Receiver Blocking Problem,” RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communication and Signal Processing (NCSP2015), March 2015, Kuala Lumpur, Malaysia.
- ⑤ 的場弘樹, 宮路祐一, 上原秀幸, “[技術展示]受信方向の前後判別や指向性の切替を実装したマルチホップ通信システム,” 信学技報, vol. 114, no. 418, ASN2014-129, pp. 117-118, 2015 年 1 月, 南紀白浜.
- ⑥ Hiroki Matoba, Yuichi Miyaji and Hideyuki Uehara, “Demo: Multi-hop Wireless Communication System to Evaluate Direction Oriented Routing Protocol,” IEEE Vehicular Networking Conference (VNC2014), Dec. 2014, Paderborn, Germany.
- ⑦ 宮路祐一, 上原秀幸, “[依頼講演] 方向や空間に着目したルーティングやアクセス制御技術の研究開発,” 信学技報, vol. 114, no. 8, RCS2014-6, pp. 25-30, 2014 年 4 月, 名古屋.
- ⑧ Taichi Yamakawa, Yuichi Miyaji, and Hideyuki Uehara, “Evaluation of Burst Transmission for Directional Medium Access Control Protocol in Wireless Ad-hoc Networks,” Proc. RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2014), Feb. 2014, Honolulu, Hawaii.
- ⑨ 的場弘樹, 山川太一, 宮路祐一, 上原秀幸, “方向に着目したルーティングや MAC を評価するための通信テストベッド,” 信学技報, vol. 113, no. 472, NS2013-203, pp. 155-160, 2014 年 3 月, 宮崎.
- ⑩ 宮路祐一, 杉原早織, 上原秀幸, “無線アドホックネットワークにおける指向性メディアアクセス制御方式のためのパケットスケジューリング,” 信学総大, 2014 年 3 月, 新潟.
- ⑪ 杉本健二, 山川太一, 宮路祐一, 上原秀幸, “異種アンテナ混在アドホックネット

ワークにおける Receiver Blocking 問題,” 信学総大, 2014年3月, 新潟.

- ⑫ 杉本健二, 宮路祐一, 上原秀幸, “異種アンテナ混在アドホックネットワークにおける Receiver Blocking 問題と短縮 NAV の効果,” 信学東海卒研発表会, 2014年3月, 三重.
- ⑬ 山川太一, 宮路祐一, 上原秀幸, “無線アドホックネットワークにおけるバースト伝送を用いた日和見的指向性メディアアクセス制御方式,” 信学技報, vol.113, no.328, ASN2013-107, pp.91-96, 2013年11月, 東京.
- ⑭ 山川太一, 宮路祐一, 上原秀幸, “異種アンテナ混在アドホックネットワークにおける Head-of-Line ブロッキング問題を解決するためのメディアアクセス制御手法,” 信学技報, vol.113, no.38, ASN2013-35, pp.173-177, 2013年5月, 熊本.
- ⑮ 住吉隆宏, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平孝, “車車間通信を用いた緊急情報配信における交通流変動の影響と配信源制御法,” 信学総大, 2013年3月, 岐阜.
- ⑯ 的場弘樹, 上原秀幸, “GNU Radio と USRP による CMA 規範を用いた適応的なビーム形成機構の実機実装,” 信学東海卒研発表会, 2013年3月, 名古屋.
- ⑰ Atsuro Furumori, Yuichi Miyaji, Hideyuki Uehara, and Takashi Ohira, “Experimental Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad-hoc Networks Using GNU Radio and USRP,” The Second International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software (NCSS2012), Dec. 2012, Okinawa.
- ⑱ 大場昌範, 宮路祐一, 君島秋人, 上原秀幸, 大平孝, “アドホックネットワークにおける空間利用効率向上のための空間相関による NAV 設定基準,” 信学技報, vol.112, no.30, AN2012-7, pp.51-56, 2012年5月, 豊橋.

[その他]

ホームページ等

<http://www.comm.ee.tut.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

上原 秀幸 (UEHARA, Hideyuki)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・  
教授  
研究者番号：00293754

### (2) 研究分担者

大平 孝 (OHIRA, Takashi)  
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・  
教授  
研究者番号：30395066