

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24246068

研究課題名(和文)ミニ電気自動車を用いたアドホックネットワークとその利用に関する研究

研究課題名(英文)A study on ad hoc networks using tiny electric vehicles and their applications

研究代表者

間瀬 憲一 (MASE, Kenichi)

新潟大学・自然科学系・名誉教授

研究者番号：90313501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)：電気自動車(EV)と無人飛行機(UAV)を利用したアドホックネットワーク研究の新たな展開とその利用技術に関して研究を行った。EVにセンサを装備すればセンサネットワークを容易に構築することができる。災害復旧時の臨時ネットワーク構築、環境情報センシングなどの応用をめざして、EVベースの安定・信頼性のあるセンサネットワークを構築するためのノード配置方法、ルーティング・アルゴリズム、データ転送方法などを開発した。UAVに関しては被災地モニタリング、小型荷物の物流などの応用をめざして、ノードの配置方法・飛行経路、給電方法、ノードの協力形態・役割分担、データ中継方法などを開発した。

研究成果の概要(英文)：Considering technology innovations and wider use of electric vehicles (EVs) and unmanned aerial vehicles (UAVs), ad hoc network technologies and their applications were studied. Wireless sensor networks can be realized using EVs equipped with sensors. Stable and reliable sensor network deployment technologies such as node placement method, routing algorithms, and data delivery methods, using EVs parked on the roads, or driven on the roads, were developed, aiming applications including emergency network construction in case of natural disaster and environmental sensing. With regard to UAVs, system architectures and technologies, such as node deployment, flight route selection, power supply methods, node cooperation strategies and role assignment, and sensor data relay methods, were developed, aiming applications including disaster-affected area surveillance and small package distribution services.

研究分野：工学

キーワード：アドホックネットワーク センサネットワーク 電気自動車 無人飛行機 モニタリング 災害

1. 研究開始当初の背景

- (1) 地球温暖化などの環境問題の改善、石油資源枯渇への対応などの観点から低炭素社会実現が期待され、化石燃料に依存しない電気自動車 (EV) の技術開発、商用化が進展している。
- (2) 少子・高齢化、地球温暖化などの社会問題の解決を図り、高齢者の移動サポート手段、新たな町作り、省エネルギー対策などを支援するため、超小型 EV (ミニ EV) の活用が期待される。
- (3) エレクトロニクス技術、コンピュータ技術、無線通信技術の発展、無線 LAN 組み込みパソコン、スマートフォンの普及などにより、通信インフラを必要としないアドホックネットワーク (Mobile Ad Hoc Network: MANET)、無線センサネットワークなどの研究開発が活発化し、関連技術の標準化が進展している。
- (4) 軍事利用の面から開発が進展してきた無人飛行機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) の商用や災害復旧時の利用への関心が高まっている。

2. 研究の目的

- (1) 高齢化社会におけるミニ EV の普及を想定し、車車間通信に基づく自動車アドホックネットワークの役割、可能性、アプリケーションなどのサービス構想を明らかにする。
- (2) 広大な被災地のモニタリングのため EV に加えて UAV を利用する 3 次元モバイルサバイランス (3DMS) 構想を提案する。
- (3) 自動車アドホックネットワーク、3DMS 実現のための基盤技術・ソフトウェアを開発し、実証実験などによる有効性検証を行う。

3. 研究の方法

- (1) ミニ EV の技術開発動向、太陽光発電によるミニ EV の技術的可能性、それらの高齢化社会での有用性について、関連学会のキーパーソンを含む ICT スマートグリッド時限研究専門委員会における討議、EV の試作・動作検証などを踏まえ、詳細なサーベイを行う。
- (2) 平常時・災害時に有用な路上空間を利用した多地点画像データ収集用の無線マルチホップネットワークを対象として、現実的な電波伝搬モデルを利用したシミュレーション評価を行う。市販製品を利用してテストベッドを構築し、開発したソフトウェアを組み込み、街路などの実環境における実証実験を行う。
- (3) 車車間マルチホップ通信に基づく環境データ収集用のセンサネットワークを対象として、自動車の現実的な走行モデルを用いたシミュレーションを行う。
- (4) 複数回転翼 UAV の試作、制御ソフトウェアの開発、実環境での動作検証実験により広域モニタリングに関する実用上の課題の洗い出し、問題解決を行う。

4. 研究成果

(1) 高齢化社会、環境問題、自動車産業面の技術開発・政策などの動向に基づき、ミニ EV が普及するユビキタス EV、ITS (高度道路交通システム) everywhere 時代などの社会展望を体系・整理した (図 1、2)。カメラ、通信機器を搭載した EV (図 3) を試作し、走行中の映像取得・転送に関する実証実験を行った。ミニ EV を含む多数の EV を用いたアドホックネットワーク、特に、EV が駐車状態で構成するアドホックネットワークの可能性を調査し、大規模災害時の臨時ネットワーク構築の手段としての有用性を確認した。実際の道路環境において無線マルチホップ実証実験を行い、伸縮アンテナポールを用いることにより通信特性を大幅に改善し、安定化できることを示した。

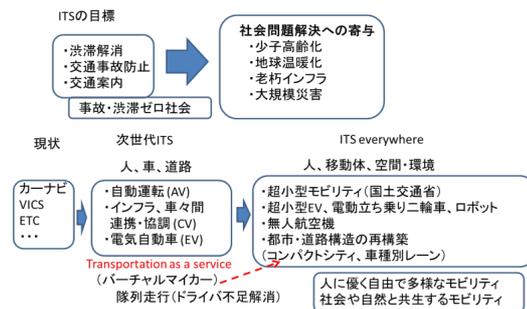


図 1 高度道路交通システム (ITS) の革新

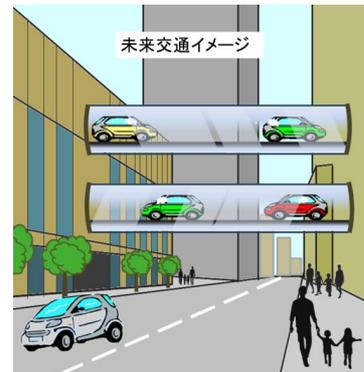


図 2 ミニ EV が普及する未来交通イメージ



図 3 試作したカメラ、通信機器を搭載した電気自動車

(2) 被災地などのリアルタイム映像監視を行うため、路上にカメラ、センサを装備した EV を配置し、無線マルチホップネットワークを構成する方法を検討した。多数のカメラと映像ストリームによるネットワーク輻輳を防止するため、映像データ送信レート制御方式を開発した。映像監視システム基本部及び、

2つの送信レート制御方法を実装し、実験により評価を行った。ネットワーク輻輳時に動画の圧縮率を大きくすることにより、ソースレートを抑制する方式に関して、最大3つの映像送信ノードが1つの映像収集ノードにデータ送信する実験を行い、無制御の場合と比較して受信成功率が向上し、鮮明な映像取得が可能であることを確認した。

ネットワーク輻輳時に画像データ送信周期を低減する制御方式に関して、映像送信ノードが最大10台のシングルホップ通信実験を行い、最適周期に制御されることを確認した。さらに、電波減衰、外部からの電波干渉などに起因するパケットロスの影響を考慮した画像データ送信周期制御方式に関して、10ホップのマルチホップ通信実験により、外部干渉下でも適切な周期に制御されることを確認した(図4)。また提案方式に画像データの再送機能を付加し、再送機能なしの場合との比較を行い、受信成功率が82%から97%に向上し受信画像が鮮明化することを確認した(図5)。

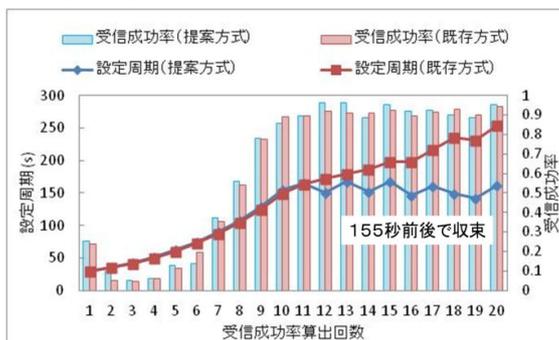


図4 映像監視ネットワークの輻輳制御に関する性能評価実験概要



図5 映像監視ネットワークの受信画像

(3) 各種センサ、通信機器を搭載したミニEVを被災地の路上に多数固定配置して構成するアドホックネットワークに関して、リレーノード搭載ミニEVを配置することにより、接続性とリンク品質を保証するリレーノード配置方式を検討した。

東京都台東区1丁目周辺の道路106本、交差点252個、建物情報を含むデジタル地図を利用し、ゲートウェイノード1台とセンサノード4~24台を道路上に配置したモデルを対象に、ネットワークシミュレータ Scenargieの利用により提案手法を評価し、フロー負荷が低負荷の場合にはほぼ100%に近いパケット配送率が得られることを示した。これらのシミュレーション結果から提案するリレーノード配置方式の有効性を示した。

(4) EVにセンサを搭載して環境情報を取得

し、車車間通信に基づくアドホックネットワークによりゲートウェイへ収集するシステムにおいて、交通トラヒックの変動、高速移動による通信性能の低下に対応するため、固定基地局を併用する方法を検討した。基地局間の直接通信を前提とせず、任意の基地局配置で動作可能なデータ配送方法を開発した。位置情報に基づいて転送先を定める単純転送法と転送先が見つかるまでパケットを保持する蓄積・転送法をベースとし、パケット損失を低減するための通信制限距離を設ける(図6)。本手法に関して、走行車の移動モデルを用いたシミュレーション評価を行い、基地局の導入によりデータ配送特性の安定化が可能であることを示した。さらに、基地局間にパケット再送機能を導入することにより、パケット配送率の向上とパケット配送遅延時間の削減が可能であることを示した。

また、蓄積・転送法を用いるエピソード型通信において、情報を配信した後の情報更新、誤った情報配信後の訂正などの処理の性能向上をめざして、送信電力制御法を開発し、有効性を示した。

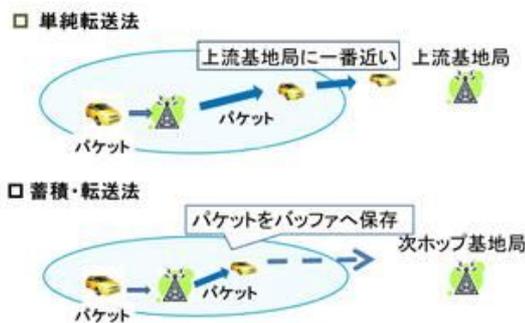


図6 車車間通信を利用したパケット転送

(5) 広域被災地を多数のEVとUAVが連携してモニタリングを行う3次元モバイルサバイランスの構想(3DMS)を提案し関連技術の開発・評価を行った(図7)。

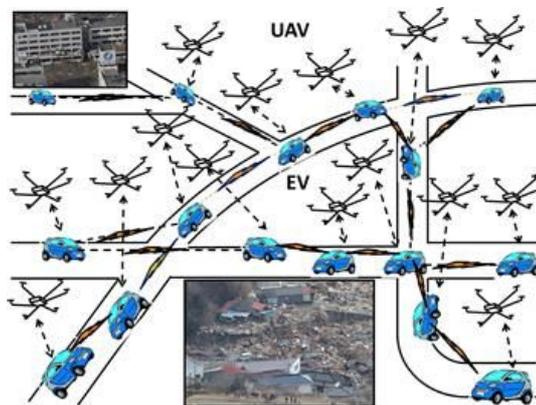


図7 3次元モバイルサバイランス構想

EVの大容量バッテリーを用いてUAVのバッテリー充電を行うことにより、長時間のサバイランスが可能であることを数値モデルにより示した。Parrot社製UAV (AR.Drone 2.0)

(図8)用のソフトウェア開発キット(SDK)を開発した(図9)。開発言語としてC++/CLIの他、C#やVisual Basicを使用できる。SDKは画像解析ライブラリとしてOpenCVとARToolKitを包含しており、顔認識やタグ認識をはじめとする様々な画像解析に対応する。飛行パラメータと実際の飛行動作の分析に基づき、AR.Drone2.0のコンピュータによる飛行制御が可能であることを示した。

DJI社製フレームキットを利用した6翼UAV(図8)を開発し、動作検証を行った。UAVの自動操縦を可能にするため、UAVに搭載する無線タグによりフライトデータを取得し、特定小電力無線によりEV上のコンピュータに転送するシステムを開発した。気圧センサのみで高度データの標準偏差が18cm以下という高い精度を有することを実験により確認した。



図8 複数回転翼無人飛行機の開発

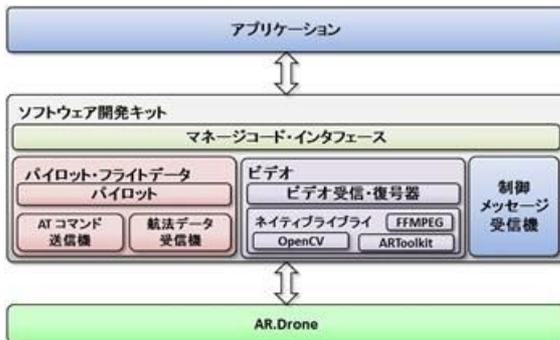


図9 AR.Drone 2.0用SDK(ソフトウェア開発キット) DronePilot.NETの概要

3DMSでは、UAVが取得したデータを複数のEVやUAVを介してゲートウェイまで送信する。このとき、UAVの揺れなどにより通信品質が低下する恐れがある。送信元のUAVとゲートウェイ間にエンド・ツー・エンドのセッションを構成し送信元のUAVからアプリケーションレベルでの再送を行うと、通信効率が低下する。そこで、ホップ・バイ・ホップのセッションを構成しパケット再送を行うリンク層通知型パケット再送方式を検討し、通信品質が悪い環境においてもパケット配送特性が向上することを示した(図10)。また、上記提案方式にネットワーク負荷に応じて再送をコントロールする媒体ビジー計測・再送制御機能を加えて評価を行い、ネットワークが混雑した状況においても再送の動的制御によってパケット配送遅延時間が改善されることを示した。

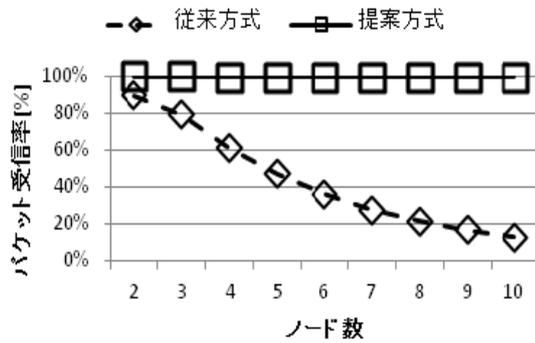


図10 パケット受信率の比較

広域被災地(エリア)を複数のサブエリアに分割し、各サブエリアにミニEVとUAVのペアを割り当て、効率的なモニタリングを行う方法論を検討した。各サブエリアではセンサを装備するUAVが上空を飛行し、モニタリングデータを獲得する。各サブエリアに駐留するEVをステーションと呼ぶ。エリア中心部のステーションのひとつをセンタ・ステーションと呼ぶ。センタ・ステーションは衛星回線などによりインターネットへ接続されている。各サブエリアにはセンタ・ステーションへ至る上流隣接サブエリアが指定される。各UAVは得られたデータを上流隣接エリアのEVに転送する。通信範囲外であれば通信範囲内まで飛行接近してデータ送信する。EVはこのデータをペアUAVに転送する。このようなデータ転送を繰り返すことにより各エリアのデータはセンタ・ステーションのEVに収集される。各サブエリアのモニタリング、隣接サブエリアのEVへの転送のための往復の飛行及びデータ転送を行う各UAVの稼働時間のバランスを図るエリア分割と転送遅延を最小化する同期転送を適用する。数値例により稼働バランスエリア分割は均等エリア分割よりモニタリング周期を短縮する効果があると共に、データ配送遅延時間を大幅に削減できることを示した。

リアルタイムモニタリングでは、各サブエリアのUAV、その上流隣接サブエリアのEV、そのペアとなるUAVというリンクの系列によりセンタ・ステーションへのリアルタイム情報転送を行う。各リンクにおいて見通し内直接通信と必要な通信帯域を保証するためのエリア分割の条件などを数値例により明らかにした。

(6) 大規模災害時のUAV利用に関し、物資運搬、被害状況モニタリング、被災地通信支援、地上交通制御、避難民誘導などのアプリケーションにおける必要な通信速度を想定し、UAVアドホックネットワークを確立するための隣接ノード発見手段(表1)、次ホップ選択方法(表2)、通信速度・安定性を向上するためのポイント・ツー・ポイントリンクの実現方法に関して検討を進め、シミュレーションにより共用飛行経路の利用によりパケット配送遅延時間を短縮できることを示した。

表 1 隣接ノードの発見手段

方法	長所	課題
飛行位置情報共有	飛行経路に関する制約少	位置情報の集配手段が必要
共用飛行経路情報共有	相手の方向推定容易	共用飛行経路の共有方法が必要

表 2 次ホップの選択方法

方法	長所	課題
ホップ情報利用	パス存在性の確認	非連結型MANETへの適用性
位置情報利用	非連結型でも有効	位置予測方法、共用飛行経路の利用

(7) 大規模災害により商用通信サービスが利用困難となった被災地で、避難所などの利用者に臨時のメッセージ通信サービスを提供するシステムを検討した。被災地エリアをサブエリアに分割し、各サブエリアに EV と UAV のペアを割り当てる。各 UAV が担当サブエリア内の避難所上空を順次周回し、無線 LAN によりメッセージを送受信する。各サブエリアとエリア内のセンタ・ステーションの間は UAV の飛行によりメッセージを配送する。各サブエリアの UAV とセンタ・ステーションとの間のメッセージ配送をエンド・ツー・エンドで行う方法と、センタ・ステーションに至る経路上で、各サブエリアの UAV 間でメッセージのリレーにより行う方法がある。また、各 UAV が独立に動作する非同期方式とリレー時の待ち時間を最小化する同期方式がある(図 11)。

エンド・ツー・エンド方式に関して、サブエリア面積を均等化する空間一様分割と UAV のサブエリア内の避難所巡回時間とメッセージ配送のためのセンタ・ステーションとの往復飛行時間の総和を均等化する時間一様分割を考察した。エンド・ツー・エンド方式はシステム開発と展開が容易であり、メッセージの配送周期、配送遅延において時間一様分割が有効であること、同期リレー方式は UAV 間の飛行スケジュールの調整が必要になるが、単純な空間一様分割を前提とし、配送周期・配送遅延においてエンド・ツー・エンド方式より優れることを示した。

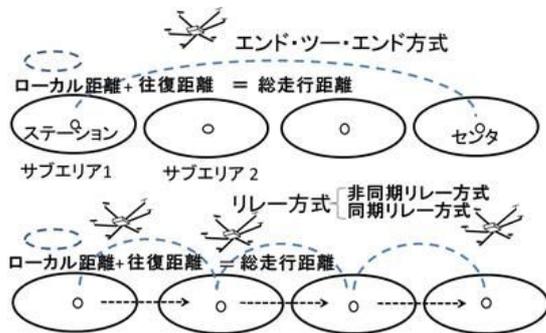


図 11 メッセージ配送方式

(8) ITS アプリケーションとしてセンサプラットフォームを取り上げ、自動車アドホックネットワークを対象とする位置情報に基

づくルーティングに関する従来研究を調査・体系化した。許容できるパケット配送性能を達成するために、地図情報に基づく道路情報感知が最低限必要であるのに加え、トラヒック/パケット感知が必須と考えられる。特に、トラヒック/パケットレベルの統計情報に加え、リアルタイム情報を有効に活用する必要がある。さらに、交通トラヒックの空間的・時間的な変動特性に対応するため、位置情報を用いたルーティングを支援する固定ノードの利用が必須と考えられる。これらの知見に基づき、固定ノードを活用した位置情報に基づくルーティング方式を提案した。

(9) ITS アプリケーションとして UAV を用いた物流システムを検討した。バッテリー電動 UAV は現状、航続時間 10~60 分、時速 40~60 km、最大積載量 20 kg 程度が期待できる。遠距離飛行を実現するため、UAV の飛行経路上に基地局を設け、電力供給を行う方法を検討した。電力供給手段として、UAV のバッテリーへの無線充電とバッテリー交換がある。基地局の設置場所として、地上、海上の船舶甲板上、空中の飛行船などが考えられる。簡単のため、正方形エリアを  $n \times n$  の格子状に分割し、それぞれの区画へ物資を運搬するモデルを構成し、トラック配送と UAV 配送の配送時間を比較した。トラック配送では 1 台のトラックが全区画宛の物資を積載し、配送する。UAV 配送では  $n$  台の UAV が分担して配送する。UAV の一回の配送ではひとつの区画宛の物資を積載し、配送する。この結果、トラックの総配送距離と UAV 1 台当たりの平均総配送距離が等しくなることを示した。さらに、各 UAV の総配送距離が均等になるような、配送区画の分担が可能であることを示した。トラック配送における交通混雑の影響、UAV における効率的な配送経路の選択自由度などを考慮すると、UAV 配送はトラック配送に比べて、配送距離短縮、配送速度向上が期待できるため、さらなる配送時間の短縮が可能であり、配送地域の拡大にスケラブルであることを示した。

## 5. 主な発表論文など

〔雑誌論文〕(計 11 件)

K. Mase, A Survey of Geographic Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks as a Sensing Platform, I EICE Trans. on Communications, 査読有、Vol. E99-B, No.9, 2016, pp.1938-1948  
 今井博英、間瀬憲一、岡田啓、中野敬介、路上空間を用いた無線マルチホップネットワークのリレーノード配置方式、電子情報通信学会論文誌、査読有、Vol. J99-B, No.10, 2016, pp.871-880  
 K. Mase, Wide Area Surveillance Using Electric Vehicles and Limited-Flying-Time Helicopters, Sensors & Transducers Journal, 査読有、Vol. 185, Issue 2, 2015, pp. 84-92

T. Saito, K. Mase, Actual Flight Movements of Electric Helicopters for Making a Disaster Area Monitoring System, International Journal of Robotics and Automation, 査読有, Vol 3, No. 2, 2014, pp. 75-83  
間瀬憲一、齋藤卓也、高靖、[招待論文]、電気自動車を利用する大規模災害時の通信確保及び被災地モニタリング、電子情報通信学会論文誌、査読有、Vol. J96-B, No. 6, 2013, pp. 562-571

[学会発表](計58件)

金子美博、可児文輝、間瀬憲一、エリア内部で充電するUAVの2回飛行による正方形グラフ探索、電子情報通信学会技術報告、2016年11月23-24日、神戸情報大学院大学(兵庫県・神戸市)  
N. Kinoshita, K. Miyakita, K. Nakano, Information Renewal and Power Control in Epidemic Communication, Proceedings of The 35th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology (JSST2016) 2016年10月27-29日、Kyoto (Japan)  
K. Mase, Realization of a Distribution-Service System Using Multirotor Unmanned Aerial Vehicles, IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC 2016 Fall), 2016年9月18-21日、Montreal (Canada)  
Y. Kaneko, T. Kani, K. Mase, The Shortest Routes of Two UAVs on Square Grid Graph with Boundary Depot, Proceedings of The 31st International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC CCCC 2016), 2016年7月10-13日、Okinawa (Japan)  
K. Mase, H. Okada, Message Communication System Using Unmanned Aerial Vehicles under Large-Scale Disaster Environments, Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2015 IEEE 26th Annual International Symposium, 2015年8月30日-9月2日、Hong Kong (China)  
小林誠也、間瀬憲一、柄沢直之、中野敬介、自動車と基地局を用いた無線センサネットワークにおけるデータ配送に関する検討、電子情報通信学会技術研究報告、2015年5月14-15日、東京電機大学(東京都・足立区)  
畠山昂、間瀬憲一、中野敬介、柄沢直之、無線センサネットワークにおける画像データ送信周期制御方式の検討、電子情報通信学会技術研究報告、2015年5月14-15日、東京電機大学(東京都・足立区)  
A. Mori, H. Okada, K. Kobayashi, M.

Katayama, K. Mase, Construction of a Node-combined Wireless Network for Large-scale Disasters, IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2015年1月9-12日、Las Vegas (USA)

K. Mase, Wide Area Surveillance Using Limited-Flying-Time Helicopters, The Eighth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2014年11月16-20日、Lisbon (Portugal)

H. Okada, A. Yoshimoto, K. Kobayashi, M. Katayama, K. Mase, Switching Methods for Semi-Fixed Rate Control in IEEE 802.11n Wireless Mesh Networks, IEICE Information and Communication Technology Forum, 2014年5月28-30日、Poznan (Poland)

板垣勇也、今井博英、間瀬憲一、中野敬介、岡田啓、路上空間を利用したセンサネットワークのリレーノード配置方式の検討、電子情報通信学会技術研究報告、2014年1月23-24日、ホテル奥道後(愛媛県・松山市)

齋藤卓也、町中裕昭、間瀬憲一、電気自動車と電気ヘリコプターが連携する災害地モニタリングの初期検討、電子情報通信学会技術研究報告、2013年1月24-25日、作並温泉ゆづくしSalon一の坊(宮城県・仙台市)

Y. Matuda, K. Mase, An Adaptive Source Rate Regulation Scheme for Wireless Periodical Data Collection Systems, Globecom Workshops, 2012年12月3-7日、Anaheim (USA)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

間瀬 憲一 (MASE, Kenichi)  
新潟大学・自然科学系・名誉教授  
研究者番号：90313501

### (2) 研究分担者

中野 敬介 (NAKANO, Keisuke)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号：80269547

### (3) 連携研究者

岡田 啓 (OKADA, Hiraku)  
名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授  
研究者番号：50324463

金子 美博 (KANEKO, Yoshihiro)  
岐阜大学・工学部・電気電子・情報工学科・准教授  
研究者番号：20247216