

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00124

研究課題名(和文) 無線センサネットワークのための高効率高信頼双方向通信プロトコルの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of efficient and reliable bidirectional communication protocols for wireless sensor networks

研究代表者

太田 能 (Ohta, Chikara)

神戸大学・科学技術イノベーション研究科・教授

研究者番号：10272254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：CSMAに基づくマルチホップ型無線センサネットワークでは、隠れ端末問題に起因するパケット衝突やパケット再送により、双方向通信のスループットが低下するという問題があった。そこで本研究では、双方向通信環境において高効率・高信頼なパケット伝送を実現することを目的として、IFNCとPassive ACKを組み合わせたIFNCPA方式の開発に取り組んだ。制御パラメータであるエンコード待ち時間の最適化、Passive ACK衝突回避の仕組みを検討し、IFNCPA方式の性能改善を図った。計算機シミュレーションから、収集率とエンド・ツー・エンド遅延の観点からIFNCPAが有効であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In multi-hop wireless sensor networks based on carrier-sense multiple access, there is a problem that throughput is lowered in bidirectional communication due to packet collision and packet retransmission caused by a hidden terminal problem. In this research, in order to realize highly efficient and reliable packet transmission in a bidirectional communication environment, IFNC (Inter-flow Network Coding with Passive ACK), which combines IFNC (Inter-flow Network Coding) and Passive ACK, was developed. We examined the control parameter optimization of encoding latency and passive ACK collision avoidance mechanisms in order to improve the performance of IFNCPA. Computer simulations revealed that IFNCPA is effective from the viewpoint of collection ratio and end-to-end delay.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：センサネットワーク 双方向通信 ネットワーク符号化 パッシブアック

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) は、センシング機能を有するノードを介して実世界情報を収集し、アクチュエータ (駆動装置) 等を介して実世界へ関与するための通信システムである。近年は、土砂災害や作物育成状態などのモニタリング、ガス・電気検針のためのスマートメータなどへの応用が始まっており、その実用化が進むことで多くの国民がその恩恵を受けると考えられる。しかし、その概念が 2002 年に Smart Dust として提示されて以降、20 年近く経つにもかかわらず、低消費電力化、高効率化、高信頼化は依然として重要な課題となっている。特にこれまでの検討では、センサノードからシンクノードへのセンシングデータ収集に主眼が置かれており、アクチュエーション (実世界への作用) のために逆方向に流れるトラヒックについては考慮できていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景を踏まえ、情報収集とアクチュエーションの双方向通信トラヒックが短時間に大量に生成される環境を想定し、無線センサネットワークにおける双方向通信の高効率化、高信頼化を実現する通信プロトコルを開発することを目的とする。

本研究を実施する前に、我々は、双方向に流れるトラヒックに Network Coding (NC) を適用することでトラヒック量を削減できると期待し、予備検討を実施していた。このとき、無線ネットワークでは符号化 packets をメディアアクセス制御層 (MAC 層) でブロードキャストする必要があるが、また通常、ブロードキャスト通信では受信応答確認 (ACK: Acknowledgement) が行われなため、NC を使用しないユニキャスト通信を用いる場合に比べて信頼性が低くなることが明らかになった。この問題に対し、NC に Passive ACK (PA) を組み合わせる (以後、IFNCPA (Inter Flow NC with PA) 方式と呼ぶ) ことで、高負荷でもエンド間でのデータ受信を高く保つことができるという結果を得ていた (引用文献①)。

しかし、IFNCPA については、未解決の課題が残っていた。具体的には、ノードが符号化を行うために packet 受信をどのくらい待つべきか (符号化待ち時間)、PA における ACK 待ち時間をどう決定するか、また、MAC 層でブロードキャストされた符号化 packet を受信ノードが処理すべきかどうかについて経路制御とともに検討する必要があった。本研究では、これらの課題に取り組み、遅延を目標値を満足しつつ、配信率を高く保つことを目指す。

3. 研究の方法

IFNC ならびに IFNCPA の概要を説明し、その後、本研究の進め方について述べる。

(1) IFNC による高効率通信の実現と問題点

図 1 はノード  $N_1$  から  $N_3$  へ送信される packet  $a$  と  $N_3$  から  $N_1$  へ送信される packet  $b$  を  $N_2$  が中継している様子を表している。図 1a は、ユニキャスト通信の場合、図 1b は、IFNC の場合である。IFNC では、 $N_2$  は  $a$  と  $b$  のペイロードの排他的論理和をとった  $a \oplus b$  をブロードキャストする。 $N_1$ 、 $N_3$  は自身が送信した packet  $a$ 、 $b$  を保持しておき、受信した  $a \oplus b$  との排他的論理和をさらに取りすることで、それぞれ packet  $b$ 、 $a$  を抽出、すなわち受信する。こうして IFNC は、図 1 に示されるように、ユニキャスト通信の場合に比べて packet 送信回数を削減することができる。すなわち、高効率通信を実現できる。しかしながら、ブロードキャスト通信は ACK を取らないため、このブロードキャスト packet が失われても送信ノードはこれを検出できない。このため、信頼性が低下するという問題が生じる。

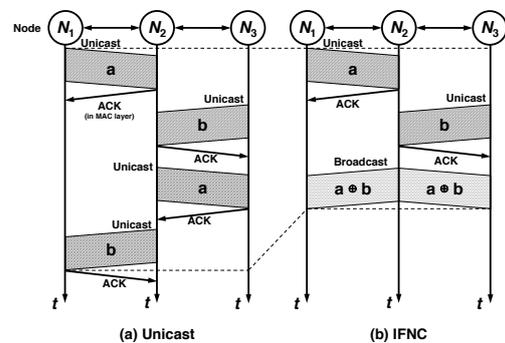


図 1: IFNC による高効率通信の実現

(2) IFNCPA の概要と課題

図 2 は、IFNCPA による packet 転送の様子を示している。PA は、無線の特性を利用し、宛先ノード以外の隣接端末が packet を傍受できることを利用し、受信応答確認を行うものである。例えば、ノード  $N_3$  は、符号化 packet  $a \oplus b$  を受信することで、 $b$  が受信されたことを確認できる。

ただし、最終目的ノードは、packet 中継を行わないため、明示的に ACK を応答する必要がある。例えば、 $N_4$  は明示的に ACK メッセージを生成している。

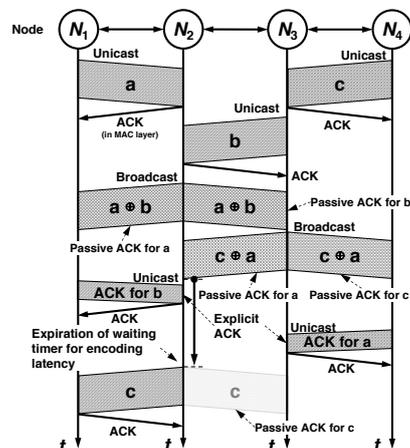


図 2: IFNCPA による packet 転送

この IFNCPA に関しては、次の二つの課題が残されていた。

i) エンコード待ち時間に関する課題

一つ目の課題は、エンコード待ち時間の上限をどのように設定するか、である。IFNC は、双方向のフローに対して適用されるため、ある方向に対するパケットを受信しても、反対方向からのパケットを受信しなければ NC を実行できない。NC の効率を高めるためには、この上限を長く設定することが望ましいが、その一方で、この上限が大きいと、反対方向からのパケットが到着しなかったときに遅延が大きくなる (図 3a)。また、小さすぎると NC が行われず、効率は低下する (図 3b)。

この問題に対し、本研究では、パケット到着間隔の履歴に応じてエンコード待ち時間  $W$  を動的に変更する方法について検討する。

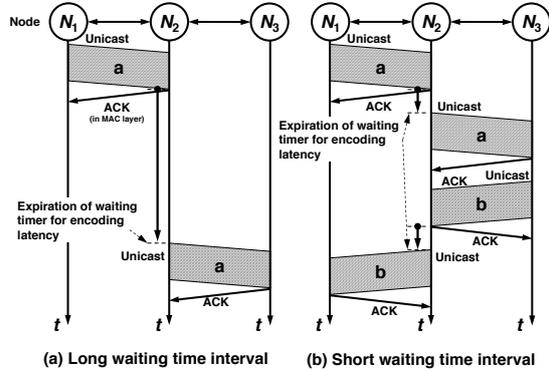


図 3: エンコード待ち時間に起因する問題

ii) PA 衝突に関する課題

IFNCPA においては、PA が衝突し、受信応答に失敗すると、パケットを再送することになり、チャンネル利用効率が低下する。この現象は、図 4 に示すケース 1 や、図 5 に示すケース 2 として発生することが予備検討において観測されている。

図 4 に示すケース 1 では、符号化パケット  $a \oplus b$  を受信した  $N_2$  と  $N_4$  がすでに対向フローのパケットを保持しており、それぞれが符号化パケット  $d \oplus b, c \oplus a$  を直ちに生成、送信、その結果、衝突が発生している。このケースは、高負荷で発生しやすい。

図 5 に示すケース 2 では、符号化パケット  $a \oplus b$  を受信した  $N_2$  と  $N_4$  が対向フローのパケットを受信することなくエンコード待ち時間が終了し、それぞれが  $b, a$  をユニキャスト送信、その結果、衝突が発生している。このケースは、低負荷で発生しやすい。

ケース 1、2 のいずれのケースも、衝突が発生するのは、 $N_2$  と  $N_4$  は互いにキャリアセンスできないことも要因である。

本研究では、符号化パケットを受信した後のパケット送信タイミングをずらすオフセット時間  $T_0$  を導入し、上記の PA 衝突の発生を低減することをねらった方法について検討する。

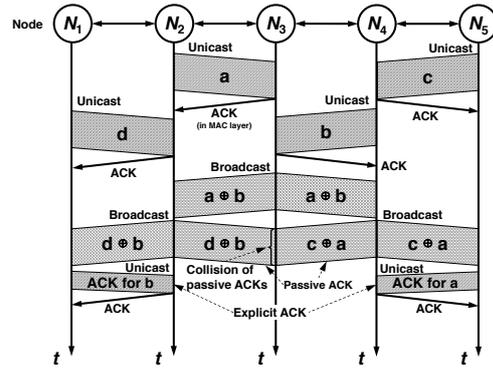


図 4: 符号化 PA 衝突 (ケース 1)

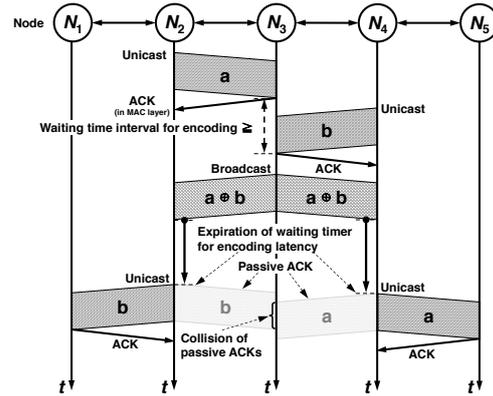


図 5: ユニキャスト PA 衝突 (ケース 2)

本研究では、IFNCPA 方式のパラメータ  $W$  ならびに  $T_0$  についてネットワークシミュレーションに基づいて検討するとともに、実環境への適用を考慮し、ショッピングモールにおける避難誘導システムを想定したシステムレベルでのシミュレーション評価を行った。

4. 研究成果

図 6 に説明のための通信モデルを示す。ここでは、中継 (リレー) ノード  $N_r$  を介して  $N_p$  から  $N_n$  に向かうフローを  $p \rightarrow n$ 、これに対抗する  $N_n$  から  $N_p$  に向かうフローを  $n \rightarrow p$  で表す。

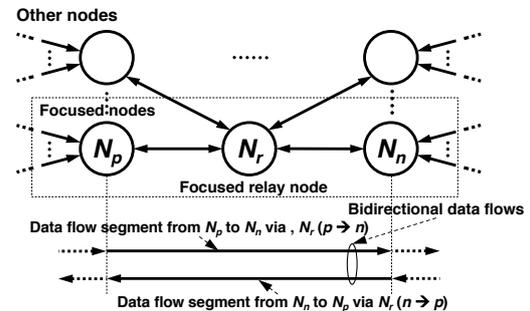


図 6: 通信モデル

図 7 に IFNCPA におけるメッセージフォーマットを示す。メッセージには、符号化パケットの元となるデータを示す二つの ID と、符号化データが格納される。ID にはその送信 IP アドレス、受信 IP アドレス、シーケンス番号

が含まれる。ID1 フィールドには、先に受信されたパケットのものが、ID2 フィールドには後から受信されたパケットのものが格納される。符号化されなていないメッセージの場合は、ID2 フィールドは全て0にセットされる。

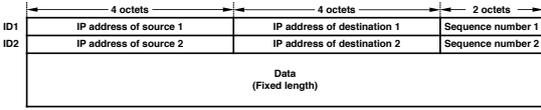


図7:メッセージフォーマット

### i) エンコード待ち時間決定方法

エンコード待ち時間は対向フローの到着間隔以上に設定することが望ましいと考えられる。そこで、以下により、これを決定する。

ノード $N_r$ におけるフロー $n \rightarrow p$ の $(i-1)$ 番目のパケットと $i$ 番目のパケットの到着間隔を $S_i^{n \rightarrow p}$ で表す。 $N_r$ は、 $n \rightarrow p$ のパケットを受信するたびに、以下の式により、この移動加重平均 $\bar{S}_i^{n \rightarrow p}$ と移動加重平均偏差 $\bar{V}_i^{n \rightarrow p}$ を更新する。

$$\bar{S}_i^{n \rightarrow p} = \alpha S_i^{n \rightarrow p} (1 - \alpha) \bar{S}_{i-1}^{n \rightarrow p}$$

$$\bar{V}_i^{n \rightarrow p} = \beta |S_i^{n \rightarrow p} - \bar{S}_{i-1}^{n \rightarrow p}| + (1 - \beta) \bar{V}_{i-1}^{n \rightarrow p}$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ は更新重みであり、本研究では $\alpha = 0.125$ 、 $\beta = 0.25$ に設定した。

このとき、フロー $n \rightarrow p$ に対するフロー $p \rightarrow n$ の符号化待ち時間 $W_i^{p \rightarrow n}$ をTCPのRTT推定式を参考に、次式で決定する。

$$W_i^{p \rightarrow n} = \min\{\bar{S}_{i-1}^{n \rightarrow p} + \gamma \bar{V}_{i-1}^{n \rightarrow p}, W_{\max}\}$$

ここで、 $\gamma$ は符号化待ち時間係数であり、本研究では $\gamma = 1$ に設定した。 $W_{\max}$ はエンコード待ち時間の最大値であり、エンド・ツー・エンド遅延を抑えるために設定する。

フロー $p \rightarrow n$ 、 $n \rightarrow p$ への再送待ち時間 $R$ は、次式により決定する。

$$R = \max\{R^{p \rightarrow n}, R^{n \rightarrow p}\}$$

ここで、 $R^{x \rightarrow y}$ は、フロー $x \rightarrow y$ の最新の $W_i^{x \rightarrow y}$ を最新の $\bar{V}_i^{x \rightarrow y}$ を $\bar{V}^{x \rightarrow y}$ で表したとき、次式により決定する。

$$R^{x \rightarrow y} = W^{x \rightarrow y} + 4\bar{V}^{x \rightarrow y}$$

### ii) PA 衝突低減のためのオフセット制御

符号化パケットを受信した後のパケット送信タイミングをずらすオフセット時間 $T_0$ を導入し、PA 衝突の発生を低減することをねらう。

図8は、図4のケース1に対して符号化パケットによるPAが衝突することを、オフセット時間導入により回避している様子を示している。また、図9は、図5のケース2に対して、ユニキャストパケットによるPAが衝突することを、オフセット時間導入により回避している様子を示している。

先に述べたように、ノードは符号化パケットを生成するにあたり、先に受信したデータのIDをID1フィールドに、後に受信したものをID2フィールドに格納する。符号化パケットを受信したノードは、ID2に格納されたデータをオフセット時間 $T_0$ だけ遅らせて送信する。例えば、図8では、 $a \oplus b$ を受信した $N_2$ は、 $b$ を含む $d \oplus b$ を $T_0$ だけ遅らせて送信する。ま

た、図9では、 $a \oplus b$ を受信した $N_2$ は、 $b$ を $T_0$ だけ遅らせて送信する。これにより、PAの衝突が回避できる。

この $T_0$ の値は、パケット伝送時間 $T_{xt}$ より大きく設定する必要がある。本研究では、収集率、エンド・ツー・エンド遅延に関する基礎シミュレーション実験結果から、 $T_0 = 4T_{tx}$ とする。

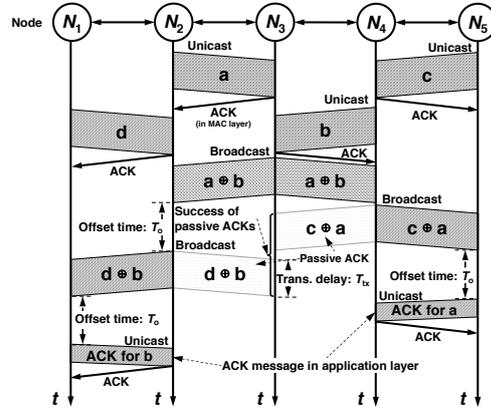


図8:符号化PA 衝突回避 (ケース1)

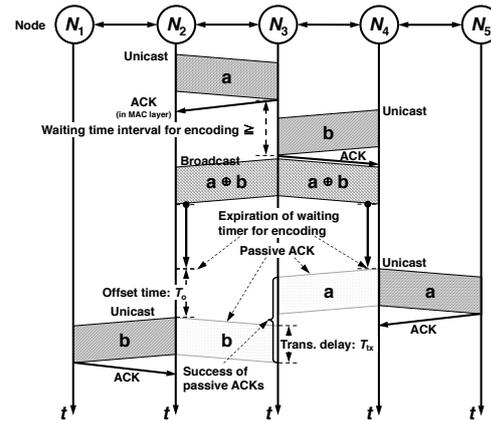


図9:符号化PA 衝突回避 (ケース2)

### iii) ユースケースにおける性能評価

評価の一例として、ショッピングモールにおける避難誘導システムを想定した、図10に示すようにフロアにセンサノード26台、シンクノード2台を配置したシナリオでのシミュレーション結果を示す。この建物は大型ショッピングセンターである埼玉県イオンレイクタウンを模擬した100 m × 450 mのフロア構成になっている。

双方向通信として、両端のシンクノードが同一指数分布に従う間隔でデータパケットを生成し、互いに交換し合う際のトラヒック(トラヒック1)と、各部屋内の黒丸で囲ったセンサノードがソースノードとして同一指数分布に従う間隔でデータパケットを生成し、両端のシンクノードにデータ送信する際のトラヒック(トラヒック2)を生成させた。

表1にシミュレーションパラメータを示す。ルーティングプロトコルはOLSR (Optimized Link State Routing) とした。

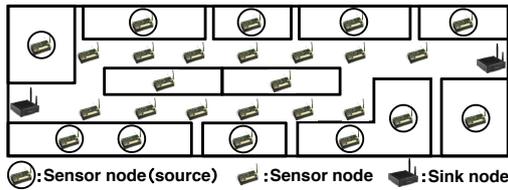


図 10: 評価実験におけるノード配置図

表 1: シミュレーションパラメータ

Item	Value/Type
Simulator	Scenargie 2.0
MAC protocol	IEEE 802.11g
Routing protocol	OLSR
Propagation model	COST231 Indoor
Number of nodes	28
Break-point	65 m
Transmission loss of wall	10 dBm
Transmission power	0 dBm
Receive threshold	-82 dBm
Antenna gain	0 dBi
Data rate	12 Mbit/s
Data size	480 bytes
Upper limit of encoding latency ( $W_{max}$ )	15 ms
Encoding latency coefficient ( $\gamma$ )	1.0
Offset value	$4T_{tx}$
Max. number of (re)transmissions	3
Simulation time	100 s
Trials	100

図 11、12 に、負荷に対するデータ収集率特性、エンド・ツー・エンド遅延特性を示す。トラフィック 1 とトラフィック 2 の双方を生成した場合 (Sink, Sensor→Sink)、トラフィック 2 のみを生成した場合 (Sink→Sink) の双方において、ユニキャスト通信のみを使う場合に比べて、IFNCPA は高いデータ収集率を達成している。一方、エンド・ツー・エンド遅延はユニキャスト通信のみを使う場合に比べて大きくなっている。ただし、ITU-T G.114 では、一方向の遅延は 400 ms を超えないことが望ましいと規定し、ITU-T G.1010 では、音声やビデオアプリケーションでは、遅延は 150ms 以下が望ましく、400 ms が上限であると規定しており、これらの制約を満足している。

すなわち、IFNCPA は、高負荷でも遅延制約を満たしつつ、高効率・高信頼通信を実現しているといえる。

このように、本研究では、IFNCPA について未解決の課題であった、ノードが符号化を行うためにパケット受信をどのくらい待つべきか(符号化待ち時間)、PA における ACK 待ち時間をどう決定するか、また、MAC 層でブロードキャストされた符号化パケットを受信ノードが処理すべきかどうかについて、経路制御と合わせて検討を行った。その結果、遅延を目標値を満足した上で、配信率を高く保つことを実現できた。

#### <引用文献>

- ① 安藤誠, 高木由美, 太田能, 玉置久, “無線マルチホップ双方向通信環境のための高効率高信頼パケット伝送プロトコルの評価,” 電子情報通信学会, 知的環境とセンサネットワーク研究会, 2014.

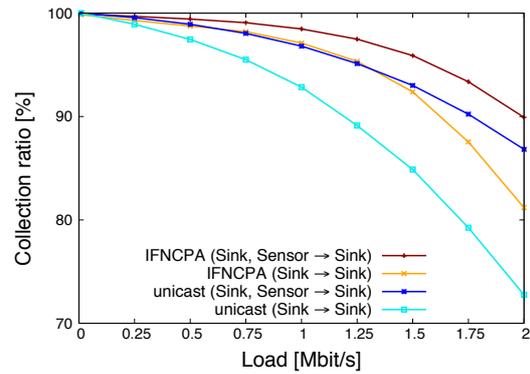


図 11: データ収集率特性

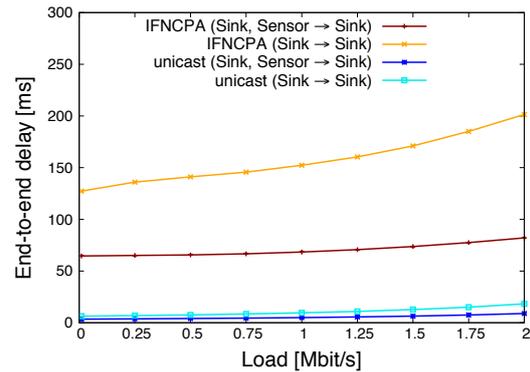


図 12: エンド・ツー・エンド遅延特性

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Yumi Takaki, Makoto Ando, Keisuke Maesako, Keisuke Fujita, Tomio Kamada, Chikara Ohta, and Hisashi Tamaki, “Efficient and reliable packet transfer protocol for wireless multihop bidirectional communications,” International Journal of Distributed Sensor Networks, 査読有, vol.14, no.1, pp.1-15, 2018.  
DOI:10.1177/1550147718756034
- ② Irda Roslan, Takahiro Kawasaki, Toshiki Nishiue, Yumi Takaki, Chikara Ohta, and Hisashi Tamaki, “Achieving High Throughput and Fairness in Dense WLANs by Mitigating Problem Nodes,” International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), 査読有, vol.12, no.24, pp.13990-13994, 2018.  
[https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n24\\_206.pdf](https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n24_206.pdf)
- ③ Keisuke Fujita, Yumi Takaki, Chikara Ohta, and Hisashi Tamaki, “Side Trip Multipath Routing Protocol for Spatial Node Failure in Data-Gathering WSNs,” International Journal of Distributed Sensor Networks, 査読有, vol.12, no.4, 10 pages, 2016.  
DOI:10.1155/2016/9161625

- ④ 高木 由美, 南 浩明, 太田 能, 玉置 久, “車車間通信における車種と遮蔽を考慮した車載機普及方針の一検討,” 日本シミュレーション学会論文誌, 査読有, vol.7, no.4, pp.125-133, 2015.  
DOI:10.11308/tjsst.7.125
- ⑤ Takahiro Iwami, Irda Roslan, Yumi Takaki, Kyoko Yamori, Chikara Ohta, and Hisashi Tamaki, “Utility-based Distributed Association Control Scheme with User Guidance for IEEE802.11 Wireless LANs,” IEICE Trans. on Communications, 査読有, vol.E98-B, no.8, pp.1700-1714, 2015.  
DOI:10.1587/transcom.E98.B.1700

[学会発表] (計 14 件)

- ① 太田 能, “デバイス間通信におけるマルチ Wi-Fi インタフェースを用いた柔軟な接続手法の提案,” 電子情報通信学会, モバイルネットワークとアプリケーション研究会, 2018.
- ② Chikara Ohta, “A Study for Improvement of Throughput in High Density Wireless Networks Using Transmitting Opportunity Control,” Proc. the 32nd International Conference on Information Networking (ICOIN 2018), 2018.
- ③ 太田 能, “無線マルチホップネットワークにおける隠れ端末による干渉と捕捉効果を考慮したルーティングメトリックの提案,” 電子情報通信学会 2017 年ソサイエティ大会, 2017.
- ④ 太田 能, “明示的なデータ分散管理を記述可能なエッジ環境向け分散データベースプラットフォームの提案,” 電子情報通信学会, 情報指向ネットワーク研究会, 2017.
- ⑤ 太田 能, “高密度無線 LAN 環境におけるスループット改善に関する研究,” 電子情報通信学会, ネットワークシステム研究会, 2017.
- ⑥ 太田 能, “マルチユーザ MIMO におけるフィードバック情報の経時劣化を考慮したユーザ選択手法,” 電子情報通信学会, ネットワークシステム研究会, 2017.
- ⑦ Chikara Ohta, “A Study on Penetration Strategy of On-board Unit Taking Account of the Type of Vehicles in V2V Communications,” The 30th International Conference on Information Networking 2016 (ICOIN 2016), 2016.
- ⑧ Chikara Ohta, “Control of Transmission Power and Carrier Sense Threshold to Enhance Throughput and Fairness for Dense WLANs,” The 30th International Conference on Information Networking 2016 (ICOIN

2016), 2016.

- ⑨ 太田 能, “無線メッシュネットワークにおけるリンク間干渉を考慮した Max-Min Fair フロー割当,” 電子情報通信学会, 情報ネットワーク研究会, 2016.
- ⑩ 太田 能, “[ポスター講演] 高密度 IEEE802.11 WLAN 環境下における最低スループット改善に関する研究,” 電子情報通信学会技術研究報告, 第 2 回 CQ 基礎講座ワークショップ (コミュニケーションクオリティ研究会), 2016.
- ⑪ 太田 能, “車車間通信における大型車両の遮蔽を考慮した車載機普及方策の一検討,” 電子情報通信学会 2016 年総合大会, 2016.
- ⑫ 太田 能, “高効率高信頼双方向通信のためのパッシブ ACK 付きインターフローネットワークコーディング方式の検討 ~ 最適エンコード待ち時間とパッシブ ACK タイミング制御について ~,” 電子情報通信学会, モバイルネットワークとアプリケーション研究会, 2015.
- ⑬ Chikara Ohta, “A Study on Control of Transmission Power and Carrier Sense Threshold to Enhance Throughput and Fairness in IEEE 802.11 Wireless Networks,” IEICE, MoNA, 2015.
- ⑭ 太田 能, “初動対応期における様々な移動体を用いた情報収集・伝達手法の検討,” 日本災害情報学会大会, 2015.

[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

<http://www.fine.cs.kobe-u.ac.jp/~ohta/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 能 (OHTA, Chikara)  
神戸大学・大学院科学技術イノベーション研究科・教授  
研究者番号: 10272254

### (2) 研究分担者

高木 由美 (TAKAKI, Yumi)  
神戸大学・大学院システム情報学研究科・助手  
研究者番号: 70314507