

推薦論文

無線センサネットワークにおける消費電力削減を目的とした受信端末主導型MACプロトコルの導入効果

伊達 仁美^{1,†1} 重安 哲也^{1,a)}

受付日 2013年6月13日, 採録日 2014年1月8日

概要: センサネットワークの長寿命化に対する希求から, センサノードの省電力駆動が強く求められている. Duty cycle の長い制御プロトコルを設計することによってセンサネットワークの寿命を延長することはできるが, ネットワーク負荷の高い状況下やバースト的にトラフィックが発生する状況下では長い Duty cycle を持つ通信システムではこれらのトラフィックに適応的に対処できない. 本論文では, 従来のセンサネットワークで広く使用される送信端末主導型 MAC プロトコルではなく, 受信端末主導型 MAC プロトコルを導入することによる消費電力削減効果について検討を行う. 具体的には, すでにセンサネットワーク用受信端末主導型 MAC プロトコルとして StrawMAN が提案されているが, 同プロトコルでは, トラフィック増加にともないパケット衝突が増加するために, 新たに, 高トラフィック時でもパケット衝突をいっさい発生させない新しい受信端末主導型 MAC プロトコルを提案する. また, 計算機シミュレーションによって, 提案方式を導入することによって, (1) パケット衝突を解決することで送信失敗による無駄な消費電力を削減できること, ならびに, (2) 送信電力を削減した場合にも, 受信端末主導であれば送信の失敗が増加しないために効果的な省電力効果を獲得できることの2点を明らかにする.

キーワード: センサネットワーク, 省電力, 受信端末主導型 MAC プロトコル

Implementation of A Receiver Initiated MAC Protocol to Wireless Sensor Network and Its Effects for Reducing Power Consumption

HITOMI DATE^{1,†1} TETSUYA SHIGEYASU^{1,a)}

Received: June 13, 2013, Accepted: January 8, 2014

Abstract: Due to demand for achieving longer operation life of wireless sensor network, it is needed for sensor node to save electrical energy. Although the system can extend its operation life by developing control protocol employing longer duty cycle, it can not deal with both high traffic load and bursty traffic. This paper discusses about implementation effects of receiver initiated MAC protocol to save electrical power consumption, instead of traditional sender initiated MAC protocol which is widely used in wireless sensor network. In particular, this paper proposes new receiver initiated MAC protocol destined for wireless sensor network, which can completely prevent packet collisions due to the StrawMAN which is existing receiver initiated MAC protocol can not completely prevent packet collisions under high traffic load. By results conducted from computer simulations, we clarify that the newly proposed receiver initiated MAC protocol (1) can achieve lower power operation by reducing packet collisions, and (2) can reduce the effects of power saving performance under transmission power controlling, effectively.

Keywords: sensor network, saving electrical power, receiver initiated MAC protocol

¹ 県立広島大学経営情報学科
Department of Management and Information Systems,
Prefectural University of Hiroshima, Hiroshima 734-8558,
Japan

^{†1} 現在, JFE システムズ株式会社
Presently with JFE Systems, Inc.

^{a)} sigeyasu@pu-hiroshima.ac.jp

本論文の内容は 2012 年 10 月の支部主催シンポジウムにて報告され, 支部長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

1. はじめに

ユビキタスコンピューティングの概念が登場してから4半世紀の間、その実現に向けてさまざまな研究が進められている。ユビキタスコンピューティングとは、コンピューティング技術が我々の生活に織り込まれ、我々はその存在を意識することなくコンピュータネットワークの恩恵を享受する状態を目指して提唱された言葉である。コンピュータが我々の無意識のうちに生活を支援するツールになるためには、コンピュータがユーザの生活環境を把握し、コンピュータどうしが有機的につながり、コンピュータが自律的に動作する必要がある。これを実現するのが、センサネットワークである。センサネットワークは、通信機能を備えた複数のノードを被測定対象に配置することで、センシングした温度・湿度・加速度などさまざまなデータを収集するために、センサノードどうしによる自律的な協調動作を行う。なかでも、センサノードどうしを無線リンクによって接続する無線センサネットワークを導入すれば、有線のそれに比べ設置条件の制約は大幅に減少する。人が直接測定することが困難な場所であってもセンシングを実現できる可能性も高くなる。したがって、無線センサネットワークはユビキタス社会の実現に向けて大きな期待が寄せられているが、このような場所や状況に限定されないセンシングを行うためには、センシングノードへの常時電源供給は要求できない。そのため、センサノードの省電力化が必要となる。

そこで、本論文はセンサノードの長寿命化を目的として、(1) 送信端末のデータ送信失敗を低減させ、無駄な消費電力を削減する、(2) 送信端末の送信電力の制御により、消費電力を削減する、という2つの観点から無線センサネットワークの省電力化について議論する。

上記の(1)について、一般的に無線センサネットワークは、通信制御方式にCSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)を採用しているが、同方式は送信端末の主導によってチャネルアクセスを実現する送信端末主導型MAC (Media Access Control) プロトコルである。同型のMACプロトコルでは、送信端末は自身が把握する情報のみで送信開始を判断する。受信端末の正確な通信状況を把握せずにデータを送信すればパケット衝突が発生する可能性がある。データ送信の失敗は無駄な電力消費をまねく。これに対して、受信端末が自らの状況をふまえて送信権を付与する受信端末主導型MACプロトコルは、パケット衝突を軽減できるため効果的な消費電力の削減が期待できる。

また、上記の(2)について、送信端末主導型の代表的なMACプロトコルであるCSMA/CAでは、単純に送信端

末が送信電力を制限すると、キャリア伝播範囲が減少し周辺端末がその送信を検知できる可能性が低下する。結果として、パケット衝突発生の可能性が高まるため、送信電力の制限は同時にシステムのパフォーマンス低下を引き起こす。対して、送信電力制御 (Transmission Power Control: TPC) を実施する状況下においても、受信端末主導型MACプロトコルでは、受信端末側ですべての送信開始を制御するためにパケット衝突を増加させずに、送信電力制御の高い効果が期待できる。

さて、無線センサネットワーク用の受信端末主導型MACプロトコルとしてStrawMANメカニズムが提案されている[1], [2]。StrawMANメカニズムでは、DATA送信前の送信権競合時に送信を希望する端末はランダムに選択した長さのプリアンプルを送信する。受信端末側では、検出したプリアンプルのうち最も長い長さを送信端末側に通知する。送信を希望する端末は通知されたプリアンプル長と自端末が直前に送信したプリアンプルの長さを比較し、これらが一致した場合には、自身が送信権を獲得したと判断し、DATA送信を開始する。しかしながら、送信端末は一定範囲内の整数値に比例するプリアンプルを送信するように規定されていることから、当然ながら、多くの端末が送信を試みる高トラフィック時には複数端末が最長プリアンプルを選択する可能性が高くなる。結果として、そのような場合はStrawMANメカニズムは受信端末主導型であるがDATA衝突を発生させてしまう。

そこで、本論文では、高トラフィック時にもDATAをいっさい衝突させない受信端末主導型MACプロトコルを提案し、同MACプロトコルの有効性を明らかにする。

以降、本論文では、2章でセンサネットワークにおいて低消費電力を目的として着目されているクラスタ型センサネットワーク、ならびに、センサネットワーク用MACプロトコルの関連研究について述べる。3章では、本論文でセンサネットワーク用の受信端末主導型MACプロトコルとして提案する2進カウントダウン方式を採用するMACプロトコルについて述べる。4章では、送信端末主導型MACプロトコルIEEE802.15.4と受信端末主導型MACプロトコルである既存のStrawMAN、さらには本論文における提案方式を計算機シミュレーションによって評価する。5章はまとめであり、本論文で得られた結果について総括する。

2. ネットワークモデルと関連研究

本章では、本論文が対象とするネットワークモデルについて述べる。また、あわせて関連するセンサネットワーク用として提案されているMACプロトコルについて述べる。

2.1 クラスタ型センサネットワーク

センサネットワークでは、センサノードに実装されるバッテリーなどの制限に対応するため、エネルギー効率の良

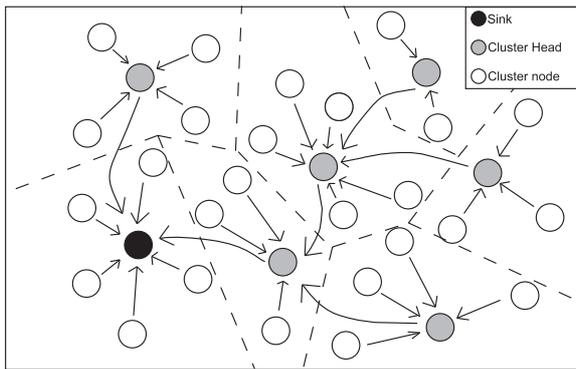


図 1 クラスタ型センサネットワーク
Fig. 1 Clustered sensor networks.

い情報収集が求められる。

そこで、エネルギー効率の向上を目的としてクラスタ型センサネットワークが数多く検討されている [3], [4], [5].

図 1 にクラスタ型センサネットワークの例を示す。クラスタ型センサネットワークでは、センシング対象エリアを複数のクラスタとよぶ領域に分割する。各クラスタ内では、クラスタヘッドとよぶノードにデータを集約する。クラスタヘッドは他のクラスタヘッドと通信を行い、収集したデータをシンクに配送する。シンクとクラスタヘッドを除くすべてのノードの通信は所属するクラスタ内のみで実施される。以降、本論文は単一クラスタ内の通信に着目し消費電力特性について議論する。

2.2 CSMA 系 MAC プロトコル

Wireless Sensor Network (WSN) において予期しないバースト的な送信要求の発生 [6] に対処するために、CSMA 系のランダムアクセス型 MAC プロトコルが広く普及している。代表的な WPAN (Wireless Personal Area Network) 用の標準規格である IEEE802.15.4 もその 1 つである [7].

CSMA は、送信要求の生じた端末が自ら送信の可否を決定する送信端末主導型 MAC プロトコルである。まず、CSMA では、送信要求が生じた端末は自端末の送信範囲内に存在する他の端末が送信中であるかどうかをキャリアセンスによって判断する。その際、どの端末も送信中ではないと判断した場合に限り新たな送信を開始し、そうでない場合は、それぞれ定められた処理に従って新たな送信を延期する。

当然のことながら、キャリアセンスで調査できるのは送信を試みる端末を中心としたエリアの送信状況であり、宛先となる受信端末を中心とした状況とは異なることがある。送信要求が複数の端末に発生した場合、それらの端末どうしがお互いに通信範囲内に存在する場合は、キャリアセンスによって同時送信を回避しパケット衝突は発生しないが、それらの端末どうしがお互いの送信範囲外に存在し、かつ、同一の受信端末を宛先とした場合には、受信端末上

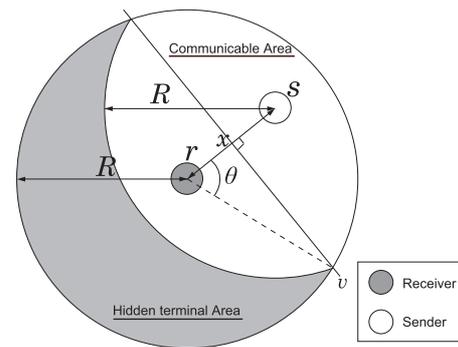


図 2 任意の送信端末 s に着目した場合の隠れ端末の存在エリア
Fig. 2 Hidden terminal area of sender s .

でパケットが衝突し、結果として送信は失敗する。このパケット衝突問題は隠れ端末問題とよばれ [8], 隠れ端末の存在割合が高くなるほど CSMA におけるスループットが低下することが報告されている [9].

さて、前述したように本論文ではシンクノードを受信端末とし、同端末の通信範囲内に存在する送信端末でクラスタを構成する 1-Hop スター型トポロジを想定しているが、同トポロジにおいて任意の端末に着目した場合の同端末に対する隠れ端末の割合について以下で考える。

任意の送信端末 s に着目した場合の同端末に対する隠れ端末が存在するエリアを図 2 に示す。同図において、クラスタ内のすべての端末は同一の性能を持つ通信デバイスを実装しているものとし、その通信距離は R とする。また、受信端末 r とその通信範囲内にランダムに配置された、ある送信端末 s との距離を x とする。さらに、線分 rs の垂直二等分線と r から半径 R の円弧の交点を v としたときの $\angle srv$ を θ としている。

以上のような状況では、 r の通信範囲は s がキャリアセンス可能な範囲 cr (Communicable Area) とキャリアセンスがゆき届かない隠れ端末エリア hr (Hidden terminal Area) に分けることができる。

ここで、 cr と hr の割合はそれぞれ以下となる。

$$cr = 1 - \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \tag{1}$$

$$hr = 1 - \left(1 - \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\right) = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \tag{2}$$

以上から、任意の送信端末に着目した場合にその他の送信端末の平均 41.3% ($\approx \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}$) が隠れ端末となることが分かる。

2.3 IEEE802.15.4

センサネットワークは 1997 年に Kahn らが DARPA (Defence Advances Research Project Agency) に提案した Smart Dust 構想 [10] に端を発したものであるが、同構想を起源とする MICA/MOTE [11] など現在の多くのセンサ

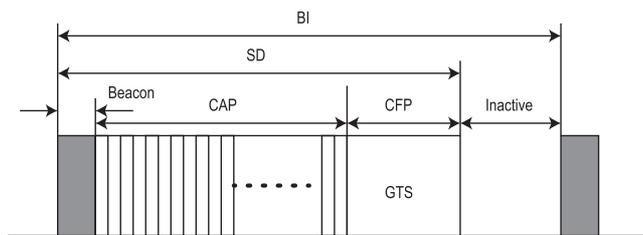


図 3 IEEE802.15.4 ビーコンモードでのチャネルアクセス
Fig. 3 Channel Access of beacon mode on IEEE802.15.4.

ノードが準拠している無線通信規格は 2003 年に標準化された IEEE802.15.4 規格となっている [13].

ここでは、2.1 節で述べたように、本論文が着目する 1-Hop スター型トポロジに使用される IEEE802.15.4 のビーコンモードについて述べる。図 3 に示すように、同規格におけるビーコンモードではチャネルへのアクセス時間を BI (Beacon Interval) 単位に分割している。BI の中には端末が稼働中となる SD (Superframe Duration) が存在する。BI から SD を除いた期間はすべての端末が休止中となる Inactive Period とよばれる期間が設定される。SD はコーディネータが送信するビーコン (Beacon) で開始され、CAP (Contention Access Period) と CFP (Contention Free Period) の 2 つの期間がその後設定される。CAP は端末が競合によって送信権を確保する期間であるが、CFP はコーディネータが指定した配下の端末のみに送信権が付与されるため、同期間内において端末間の競合は発生しない。CFP は GTS (Guaranteed Time Slots) で構成されるが、IEEE802.15.4 では、そもそも GTS を設定しない運用も可能となっている。本論文においても、送信端末主導型と受信端末主導型の MAC プロトコルの省電力特性における本質的な違いについて議論するために GTS (CFP) を設定しない状況における議論を行う。

なお、IEEE802.15.4 のビーコンモードでは、送信要求の生じた端末はランダムに設定したバックオフ時間経過後にキャリアセンスによってチャネルの空き状況を検知し、送信の可否を判断することになる。

2.4 StrawMAN メカニズム

前述のように、IEEE802.15.4 のビーコンモードでは、CSMA/CA に基づいた送信端末主導型 MAC プロトコルによってチャネルアクセスを実現する。しかしながら、キャリアセンスを送信可否の判断基準とする送信端末主導型 MAC プロトコルでは、隠れ端末の存在によって送信パケットの衝突が発生する。

そこで、新たな送信を開始する端末を受信端末側が指定することでパケット衝突の発生を回避する受信端末主導型 MAC プロトコルが多く提案されている。これらのうち、WSN 用の受信端末主導型 MAC プロトコルとして、StrawMAN メカニズムが提案されている [1], [2].

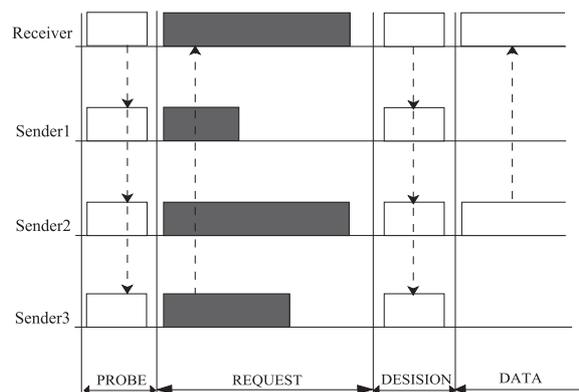


図 4 StrawMAN メカニズム
Fig. 4 StrawMAN mechanism.

図 4 に StrawMAN メカニズムにおけるチャネルアクセス制御を示す。同図に示すように、StrawMAN メカニズムではチャネルアクセス期間を PROBE, REQUEST, DECISION, DATA の 4 つに分割している。PROBE は、IEEE802.15.4 における Beacon と同じ役割を担っており、受信端末から配下の送信端末に向けてチャネルアクセス期間の開始を通知する。送信要求の生じた端末が PROBE パケットを受信した場合は、連続する REQUEST 期間において受信端末に自身の送信開始を許可するように要求する。ここで、送信開始を要求する際は 0 から 100 までのランダムな整数から 1 つの偶数を決定し、選択した値と等しい長さのプリアンブルを REQUEST 期間で受信端末に向けて送信する。受信端末は配下の送信端末から送信されたプリアンブルの中で、最も長いプリアンブルの長さを記録し、その値を記録したパケットを DECISION 期間に配下の端末に送信する。REQUEST 期間にプリアンブルを送信した端末は、DECISION パケット中に記録されたプリアンブル長が自身が送出したものと等しければ送信権を獲得したと判断し、連続する DATA 期間で送信を開始する。そうでなければ、次のチャネルアクセス期間の開始まで待機する。

このように、StrawMAN アルゴリズムは受信端末から指定された端末のみが送信を開始できるために CSMA 系の送信端末主導型 MAC プロトコルで発生する隠れ端末問題を解決できる。

3. 2進カウントダウンによる受信端末主導型 MAC プロトコル

前節において、隠れ端末問題の発生を解決できる受信端末主導型 MAC プロトコルである StrawMAN メカニズムについて述べた。同メカニズムはキャリアセンスを使用しないため、隠れ端末問題は発生しなくなるが、次の 2 点に関する問題点が新たに発生する。

(1) StrawMAN メカニズムでは完全にパケット衝突を回避できない。

(2) StrawMAN メカニズムでは受信端末側で送信機会の公平性を制御できない。

まず、上記(1)について、StrawMAN メカニズムでは受信端末が送信端末から送られたプリアンブルのうち最長の値を算出し、これを配下に通知することで送信権を付与する。ここで、プリアンブルはランダムに決定された値であるため、少なくとも2つ以上の端末が最長の値を選択した場合は必ず連続する DATA 期間において衝突が発生する。

また、上記(2)について、受信端末は最長のプリアンブル長のみを把握し、DECISION 期間において通知を実施する。そのため、過去の送信回数とはまったく無関係に送信権が配下に割り当てられることになる。

そのため、上記2点を解決する受信端末主導型 MAC プロトコルとして、2進カウントダウン方式を取り入れた受信端末主導型 MAC プロトコルを提案する。

3.1 2進カウントダウン方式による送信制御

WSN 用の新しい受信端末主導型 MAC プロトコルを提案する。図5に提案する2進カウントダウン方式を採用する MAC プロトコルの送信制御を示す。同図に示すとおり、提案方式では1つの送信サイクルを BEACON, CONTENTION, TRANSMISSION の3つの期間で構成する。これらのうち、BEACON, TRANSMISSION は StrawMAN メカニズムにおける PROBE, DATA とそれぞれ同じ役割を担っている。また、CONTENTION は StrawMAN メカニズムにおける REQUEST と DECISION の両期間をあわせた役割を担う。

まず、提案方式では受信端末はすべての配下の端末に対しユニークな ID をあらかじめ付与するものとする。ID 長は配下の端末数によって決定するものとし、端末数が n である場合の ID 長は $\lceil \log_2(n+2) \rceil$ (ただし、 $\lceil x \rceil$ は x 以上の最小の整数) とする。 $n+2$ とした理由は、すべてのビットが“1”または“0”で構成される ID は配下に付与しないためである。なお、この ID 長は以下で述べる Beacon に記載される。ここで、すべてのビットが“1”で構成される ID は後述するように新規参入端末が ID 付与を要求する手続きの際に使用する ID 付与要求 ID として用いることとし、また、すべてのビットが“0”で構成される ID は、以下に述べる競合方式では、受信端末が送信要求の有無を判断できない ID だからである。

提案方式の送信制御の流れを説明する。まず、受信端末は Beacon を配下の端末に送信する。配下の端末は Beacon を受信した際に自身に送信要求があれば、これを CONTENTION 期間で受信端末に通知する。ID 長を N とした場合、CONTENTION 期間では N と同じ N -th までのスロットが用意される。送信要求を有する送信端末は自身の ID を最初のビットから順に1ビットずつ対応するスロットで通知する。ここで、任意の1ビットを通知する際にそ

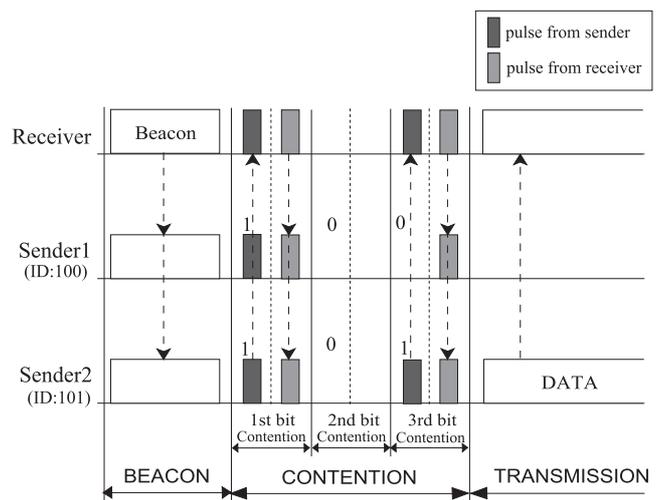


図5 2進カウントダウン方式を採用する受信端末主導型 MAC プロトコル

Fig. 5 Transmission procedure of a new receiver initiated MAC protocol employing binary countdown algorithm.

のビットが“1”である場合はパルスを一定時間送出し、逆に、そのビットが“0”であった場合には該当するスロットでは何も送出しないこととする。さて、各スロットは2分割されており、前半部分は送信端末が ID に対応したパルスを送信する期間となっている。後半部分は受信端末が使用する期間であり、前半部分において一定以上の電力が検出された場合には、配下の少なくとも1つ以上の送信端末がパルスを送信したものと判断し、受信端末からも同じくパルスを返信することとする。

ここで、送信端末は任意のスロットにおいて、自身が行った行動と受信端末が行った行動が同じであると判断した場合には CONTENTION 期間における以降のスロットでの ID の通知を継続する。そうでない場合には、自身が競合に敗れたと判断し ID の通知を終了する。

図5は受信端末の Beacon に対して、2台の送信端末が送信権の獲得を試みた例を示している。同図に示すように両端末の ID は“100”と“101”であり、前述した競合ルールによって、Sender1 は3ビット目を通知するスロットにおいて、自身がパルスを送出していないにもかかわらず受信端末からパルスが返信されたことを検知することで、競合に敗れたことを知る。これに対して、Sender2 はすべての ID の通知を正しく完了することができたため、連続する TRANSMISSION 期間において DATA の送信を開始することになる。

3.2 ID 付与手続き

前節で述べたとおり、提案方式では受信端末の配下の端末間で重複しない ID を持つことが競合を成立させるための条件となる。提案方式において、ID は受信端末の配下として新たにネットワークに参加する際に取得することと

する。

新規参入端末は、まず、0 から Wt_{max} の範囲のランダムな整数 Wt を決定し、受信端末からの Beacon を Wt 回受信するまで待機する。待機が終了すると、その直後の Beacon を受信した際に、 N 桁のビットすべてが“1”で構成した値を自身の仮 ID に設定して競合に参加する。

当然のことながら、すべてのビットが“1”で構成される ID はネットワーク内のその他のすべての既参加端末の ID よりも競合に強いので、複数の端末が同時に新規参入を試みない限りは必ず送信権を獲得できる。送信権を獲得した新規参入端末は連続する TRANSMISSION 期間において自身の MAC アドレスと新規 ID 付与要求を含んだ DATA を送信する。受信端末は付与する ID を次の Beacon 送信時にヘッダに含めて返信することで、新規 ID 付与手続きが完了する。

このような方式で新規参入端末への ID 付与を行った場合に、新規参入要求が発生してから実際に ID 割当てが完了するまでの処理に要する時間は以下となる。

$$\frac{Wt_{max} + 1}{2} \times \{t_{BEACON} + t_{DATA} + 2 \times t_{pulse} \times \lceil \log_2(n + 2) \rceil\} \quad (3)$$

ここで、 t_{BEACON} 、 t_{DATA} ならびに t_{pulse} は BEACON、DATA、pulse の送信に必要な時間をそれぞれ示している。

さて、新規参入端末が同時期に複数出現した場合は、各新規参入端末が Beacon をランダムな回数待機することで衝突を回避するが、同時に 2 つ以上の新規参入端末が同じ CONTENTION 期間において仮 ID を用いた競合を実施してしまった場合は、TRANSMISSION 期間においてパケットの衝突が発生する。このような場合には、新規 ID 付与は正しく完了できないが、新規参入を試みた端末は、再度ランダムな回数 Beacon を待機し同様の手続きを繰り返すこととする。

3.3 送信機会公平化手法

提案方式では、任意の複数端末が同時に競合を試みた場合、それぞれが持つ ID を n ビットからなる整数値とみた場合に最も高い値となる ID を持つ端末が必ず送信権を獲得することになる。そのため、高トラフィック環境下において送信端末の ID を固定すると、送信端末間において送信機会の不正性が生じる。

そこで、提案方式では送信機会の公平性を達成するために、ID を整数値としてみた場合に i となる端末が送信を成功した場合には、その端末の ID を i から 1 に、ID が $i-1$ 以下のすべての端末の ID を 1 ずつ増加させた ID にそれぞれ変更させて次回以降の競合で使用させる。なお、この各端末の ID の更新指示は受信端末から送信される Beacon に含むこととする。

4. 性能評価

本章では、送信端末主導型 MAC プロトコルと受信端末主導型 MAC プロトコルの消費電力特性を計算機シミュレーションを用いて評価する。性能評価は送信電力制御の実施の有無に分けてそれぞれ議論を行う。

また、以下では、送信端末主導型 MAC プロトコルとして IEEE802.15.4 を、受信端末主導型 MAC プロトコルは StrawMan と前章の提案方式とし、合計 3 方式を比較評価に用いる。

表 1 に 3 方式に共通するシミュレーション諸元を示す。同表に示すように、すべての端末は受信端末を中心として、同端末の送信範囲内となる半径 100m 以内にランダムに 49 個の送信端末を配置する。また、すべての送信端末には指数分布に従って送信要求がランダムに発生することとする。

表 2、表 3、表 4 には、IEEE802.15.4、提案方式に使用するシミュレーション諸元をそれぞれ示す。CCA (Clear Channel Assessment) とは、IEEE802.15.4 に準拠する端末がバックオフ終了後に他端末の送信を検知するためにチャネルを傍受する期間である。したがって、同様に提案方式においてもパルスの有無を検知するための時間も CCA と

表 1 共通シミュレーション諸元

Table 1 Common simulation parameters.

Parameter	Value
DATA Rate	250 kbps
Communication Range	100 m
Simulation Field	Receiver's Communication Range
Payload	120 byte
Number of Receiver	1
Number of Sender	49
Simulation Time	100 sec
Traffic	Poisson Arrival
Beacon/Probe/Decision length	17 byte

表 2 IEEE802.15.4 ビーコンモードのシミュレーション諸元

Table 2 Simulation parameters for IEEE802.15.4 beacon enabled mode.

Parameter	Value
backoff period	0.32 msec
CCA	0.128 msec
macMinBE	3
macMaxBE	5
macMaxCSMAbackoff	4

表 3 StrawMAN のシミュレーション諸元

Table 3 Simulation parameters for StrawMAN.

Parameter	Value
Max Preamble length	100 byte

表 4 提案方式のシミュレーション諸元

Table 4 Simulation parameters for proposed MAC protocols.

Parameter	Value
Pulse width	0.128 msec
ID length	6 bits

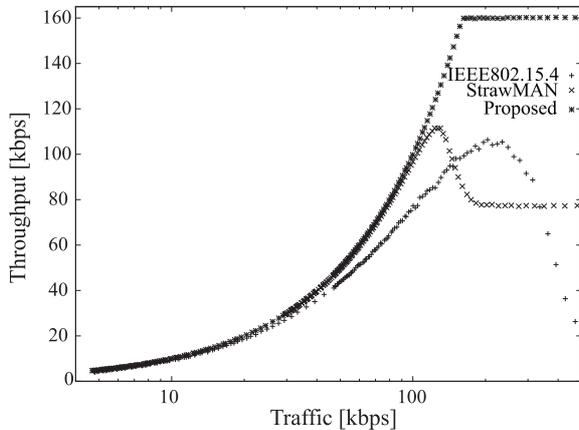


図 6 スループット特性

Fig. 6 Characteristics of traffic-throughput performance.

同じ長さに設定した。

4.1 送信電力制御を実施しない場合の性能評価

本節では、送信端末ならびに受信端末主導型のどちらも送信電力制御を実施しない場合の性能を評価する。

4.1.1 スループット特性

図 6 にスループット特性を評価した結果を示す。同図から分かるように、受信端末主導型の提案方式はパケット衝突を抑制することにより、IEEE802.15.4 ならびに、StrawMAN と比較してつねに高いスループットを獲得できることが確認できる。

さて、同図からも分かる通り、StrawMAN は提案方式と同じ受信端末主導型の MAC プロトコルであるが、高トラフィック時のスループットが大きく提案方式に比べて低くなっている。これは、すでに述べたとおり StrawMAN は送信を試みる端末が独立かつランダムに決定したプリアンプルの送信時間によって送信権を付与するアルゴリズムに起因している。

このような方式では、当然、高トラフィック時には同時に送信を試みる端末数が増加することになるが、そのような場合、最長プリアンプルが複数の端末によって送信されることで衝突が発生し、結果として StrawMAN の高トラフィック時のスループットが提案方式に比べて低くなる。

4.1.2 送信成功確率

図 7 に、各送信端末の受信端末からの距離と送信成功確率を評価した。なお、この評価では、表 1 に示した回線速度と等しい平均 250 kbps のトラフィックをネットワーク中に発生させており、送信成功確率は端末に発生した送信

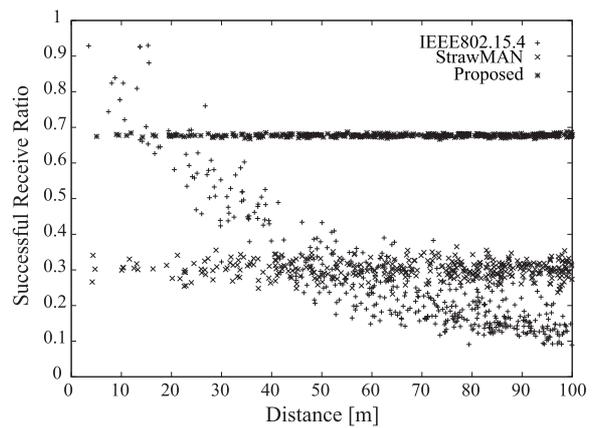


図 7 送信成功確率

Fig. 7 Characteristics of distance-successful receive ratio.

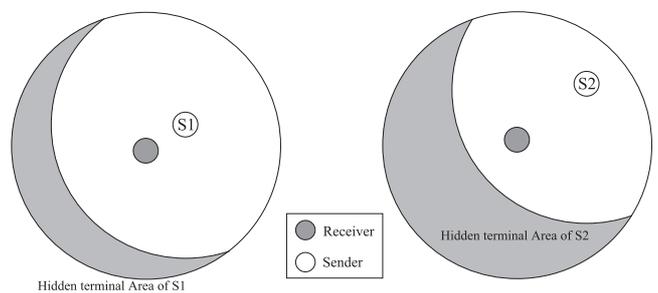


図 8 送信端末の位置と隠れ端末エリアの大きさ

Fig. 8 Hidden terminal areas depending on the distance from the receiver.

要求のうち、正しく送信が完了した割合とした。

結果から、受信端末主導型である StrawMAN ならびに提案方式では送受信端末間の距離とは関係なく、一定の送信成功確率となることが分かる。また、提案方式では任意の送信機会に実際の DATA 送信を行う端末は必ず 1 端末に限られるため、送信成功確率は送信権競合に消費される送信オーバーヘッドをのぞいた 70%程度となるが、StrawMAN は複数の端末が同じ最長プリアンプルを選択することで任意の送信機会に複数端末によって DATA が送信されることでプリアンプル送信に消費される送信オーバーヘッドに加えて、DATA 衝突による帯域が消費されてしまうことから、送信成功確率は提案方式と比べて大きく低下していることが分かる。

さて、これらの受信端末主導型の 2 方式と異なり、送信端末主導型の IEEE802.15.4 では、送受信端末間距離が増加するのにもなって送信成功確率は大きく低下する。この理由を以下で説明する。

図 8 は送信端末の位置と隠れ端末の大きさを示している。同図からも分かる通り、受信端末の近くに配置された S1 の送信範囲の多くの部分は受信端末の通信範囲と重なるため、S1 の隠れ端末エリアは狭くなる。しかしながら、受信端末から離れた位置に配置された S2 では逆に隠れ端末エリアは広くなる。結果として、受信端末から離れ

表 5 端末状態に応じた消費電力

Table 5 Parameters for power consumption on each terminal state.

Parameter	Value
Power in Transmitting	52.2 mW
Power in Receiving	59.1 mW
Power in Listening	59.1 mW
Power in Channel sampling	12.3 mW

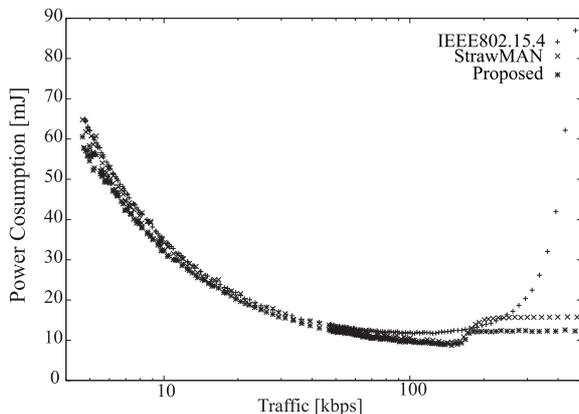


図 9 消費電力特性

Fig. 9 Characteristics of power consumption under normal condition.

た位置に配置された送信端末はより多くの隠れ端末の妨害にさらされることになり、送信成功確率が大きく低下したと考えられる。

さて、端末間の送信機会の公平性を定量的に評価する指標として Fairness Index [12] を用いて 3 方式を比較する。ここで、Fairness Index f は、 n をネットワーク中の端末数とし、 $p_{send(i)}$ ($1 \leq i \leq n$) を端末 i の送信成功確率とした場合、以下の式で算出する。

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^n p_{send(i)})^2}{n \sum_{i=1}^n p_{send(i)}^2} \quad (1 \leq i \leq n) \quad (4)$$

上式において、 f は 1 以下の値をとり、その値が 1 に近いほどネットワーク全体の公平度が高い状態にあることを示す。

さて、図 7 に示したデータから IEEE802.15.4, StrawMAN, 提案方式の Fairness Index はそれぞれ、0.725, 0.994, 1.000 となり送信端末の公平性については提案方式, StrawMAN, IEEE802.15.4 の順で優位となることが分かる。

4.1.3 消費電力特性

StrawMAN, 提案方式と IEEE802.15.4 の消費電力特性を評価する。評価では、各端末の状態に応じて表 5 に示す電力が消費されることとした。なお、同表は文献 [14] と同じものを用いた。

図 9 に、1 送信成功パケットあたりの消費電力を評価した結果を示す。同結果からも、受信端末主導型の StrawMAN ならびに提案方式は送信端末主導型の IEEE802.15.4 より

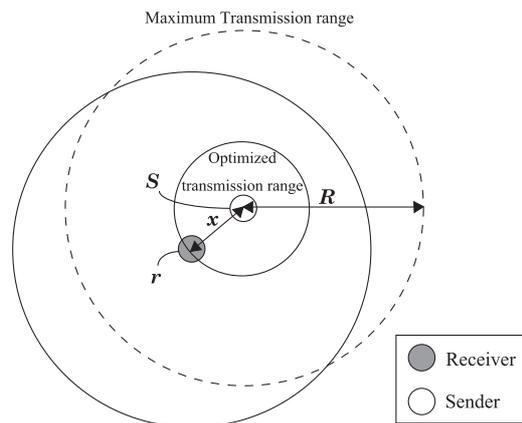


図 10 送信電力制御の適用

Fig. 10 Setting of optimal transmission range in evaluations.

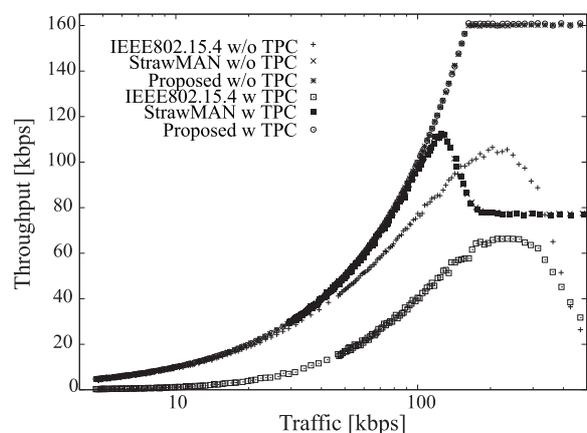


図 11 送信電力制御適用の有無とスループット特性

Fig. 11 Characteristics of traffic-throughput performance with and without transmission power control.

もつねに少ない消費電力でパケットの送信を完了できることが確認できる。また、DATA の衝突がまったく発生しない提案方式では、DATA 衝突が発生する StrawMAN よりも優れた消費電力特性となることもあわせて確認できる。

4.2 送信電力制御を実施する場合の性能評価

本節では、送信電力制御を実施する場合の性能を評価する。

図 10 に送信電力制御を適用した例を示す。半径が R である破線の円は送信端末 s の最大送信可能範囲を示しており、半径が x である実線の円は送信電力制御実施時の実際の s の送信範囲となる。

4.2.1 スループット特性

図 11 に送信電力制御の適用の有無を変化させた場合のスループット特性を評価した結果を示す。同図に示す結果から、受信端末から送信権を獲得した端末が通知される StrawMAN ならびに提案方式では送信端末の送信範囲の変化はスループット特性にまったく影響を及ぼさないものの、IEEE802.15.4 では、送信電力制御を適用することに

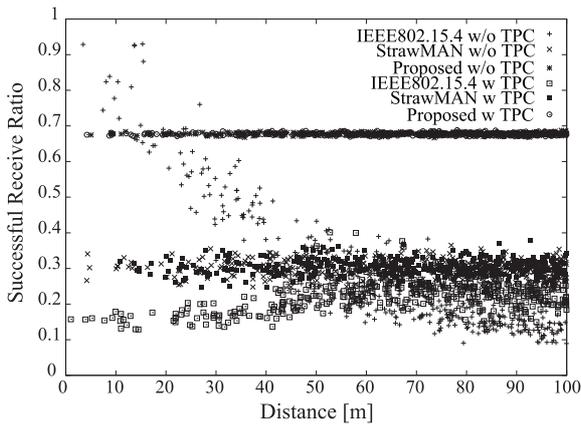


図 12 送信電力制御適用の有無と送信成功確率

Fig. 12 Characteristics of distance–successful receive ratio with and without transmission power control.

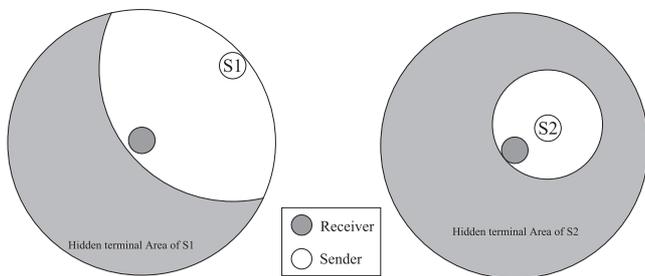


図 13 送信距離の違いによる隠れ端末の存在エリア

Fig. 13 Hidden terminal areas decided by the transmission range.

よりスループットが低下することが確認できる。これは、IEEE802.15.4 では、送信開始の可否をキャリアセンスで判断するが、送信電力制御を適用することで先行して送信中の端末のキャリアが他の端末に届きにくくなり隠れ端末問題によるパケット衝突が増加してしまうためである。

4.2.2 送信成功確率

図 12 に送信電力制御の適用の有無ならびに送受信端末間距離と送信成功確率の関係を評価した結果を示す。スループット特性と同様に、受信端末の主導によって DATA 送信を行う端末が決定する StrawMAN ならびに提案方式では送信電力制御の適用の有無が送信成功確率にまったく影響を及ぼさないことが同図からも分かる。

一方、IEEE802.15.4 では、送信電力制御によって大きく送信成功確率に影響を与えていることが分かる。IEEE802.15.4 に送信電力制御を適用しない場合は送受信端末間距離が近いほど送信成功確率が高くなるのに対し、送信電力制御を適用した場合は、逆に、送受信端末間距離が遠くなるに従い送信成功確率が高くなることが分かる。

この理由を図 13 を用いて説明する。同図に示すように、送信電力制御を適用した場合、送信端末のキャリア伝搬範囲は送受信端末間距離を半径とする範囲となる。したがって、送受信端末間距離が近い場合はキャリア伝搬範囲も狭

くなり結果として隠れ端末の存在エリアが拡大することで IEEE802.15.4 の送信成功確率が大きく低下したと考えられる。

4.2.3 消費電力特性

本項では、送信電力制御を適用した環境下における消費電力特性について評価する。なお、本評価では、送信されたパケットの受信電力の距離に対する減衰が 2 波モデル [15] に従うものとして評価を行う。同モデルでは、送信アンテナから受信アンテナまで送信電力がアンテナ間を直接伝搬する直接波、ならびに、地上を 1 回反射した後に到達する反射波の 2 つのパスを考慮する。

同モデルにおいて、受信電力 P_r は以下の式で算出される。

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 \quad (5)$$

P_t は送信電力、 G_t 、 G_r は送/受信アンテナ利得、 h_t 、 h_r は送/受信アンテナ高、 d は送受信端末間距離をそれぞれ表している。

最大送信距離を R とし、この距離ほど離れた送信端末から受信する電力を受信成功に必要な最低受信電力 P_{rmin} とすると以下となる。

$$P_{rmin} = P_t G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{R^2} \right)^2 \quad (6)$$

さて、求めた P_{rmin} が受信電力となるように送信端末の受信端末からの距離 x に応じて制御した送信電力を P_t とすると以下の式が成り立つ。

$$P_{rmin} = P_t G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{x^2} \right)^2 \quad (7)$$

結果として、受信端末から任意の距離 x ($\leq R$) だけ離れた端末の最大送信電力 P_t で正規化された送信電力制御適用時の所要送信電力 $P_{require}$ は以下となる。

$$P_{require} = \frac{P_t}{P_t} = \left(\frac{x^2}{R^2} \right)^2 \quad (8)$$

また、すべての送信端末がランダムに配置された場合の正規化所要送信電力の平均を $\overline{P_{require}}$ とした場合は以下で導出できる。

$$\begin{aligned} \overline{P_{require}} &= \int_0^R \frac{2x}{R^2} \times \left(\frac{x^2}{R^2} \right)^2 dx \\ &= \frac{2}{R^6} \int_0^R x^5 dx \\ &= \frac{1}{3R^6} [x^6]_0^R \\ &= \frac{1}{3} \end{aligned} \quad (9)$$

さて、すでに評価で用いた表 5 では、端末が送信状態にある場合の消費電力を 52.2 mW としている。送信電力制御を適用した場合は当然ながらこの値よりも消費電力は小

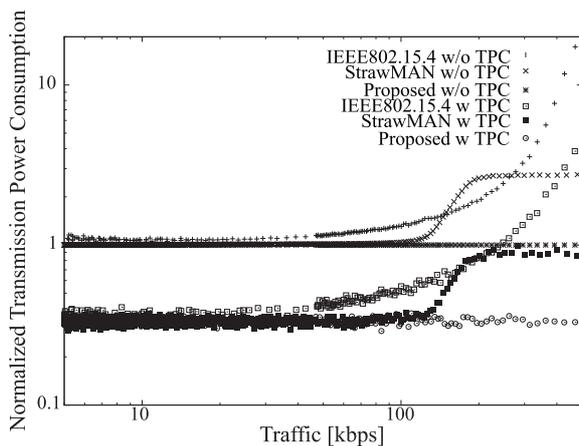


図 14 1 成功パケットあたりの正規化送信消費電力

Fig. 14 Characteristics of normalized transmission power consumption.

さくなる。

しかしながら、この 52.2mW には、1) 送信そのものに使用される電力とは別に、2) 送信中の信号処理などで消費される電力も含まれているため、これに単純に式 (8) で求めた値を乗じてもその値が送信電力制御適用時の消費電力とはならない。また、52.2mW 中の 1) と 2) の割合についても文献 [15] には示されていない。そのため、以下では、式 (8) をもとに、送信のみに使用した消費電力を最大電力で送信を行った場合の送信電力の値によって正規化して評価を行う。

具体的には、1 送信成功パケットあたりに必要な送信回数を導出し、これに式 (8) によって求めた値を乗じることで 1 成功パケットあたりの正規化送信消費電力 $P_{require}/packet$ を算出する。つまり、送信電力制御を適用しない場合に、送信されたすべてのパケットが正しく受信端末側で受信された場合には $P_{require}/packet$ は 1 となる。また、送信電力制御を適用しない場合に、逆に送信失敗数が増加すると $P_{require}/packet$ は 1 以上の値をとることになる。

図 14 に $P_{require}/packet$ を評価した結果を示す。同図から、IEEE802.15.4, StrawMAN ならびに提案方式のいずれにおいても、送信電力制御を適用することによって大きく $P_{require}/packet$ が低下していることが確認できる。しかしながら、IEEE802.15.4 と StrawMAN ではトラフィックの増加にともなって送信失敗回数が増加するために $P_{require}/packet$ が増加するが、提案方式では送信失敗が発生しないために、つねに $P_{require}/packet$ は一定値をとることが分かる。

また、消費電力の低下割合も式 (9) で導出した値と同等の電力制御適用前の約 $\frac{1}{3}$ と一致することもあわせて確認できる。これは、

- 任意の送信機会に送信できるのは必ず 1 端末のみであること、
- ID シフトの導入により送信機会の公平性が完全に達

成されていること (すなわち、すべての送受信端末距離にある送信端末から均等に送信が実施されること)、がその理由であると考えられる。

5. おわりに

本論文では、センサネットワークの長寿命化を目的に消費電力低減を達成するためにセンサノードの MAC プロトコルに受信端末主導型を導入することを提案した。また、既存のセンサネットワーク用の受信端末主導型 MAC プロトコルである StrawMAN では、DATA 衝突を発生する可能性があるため、高トラフィック時にも DATA 衝突を発生させない新たな受信端末主導型 MAC プロトコルとして、2 進カウンタダウンを採用する方式を新たに提案した。

データ集約点となる受信端末を中心としたクラスタ型ネットワークを想定して議論を行い、まず、IEEE802.15.4 に代表される送信端末主導型 MAC プロトコルにおいて発生する隠れ端末によるパケット衝突が受信端末主導型 MAC プロトコルでは発生しないために、消費電力ならびにスループットの両者において受信端末主導型 MAC プロトコルの導入が有効であること、さらには、まったく DATA 衝突が発生しない提案方式が StrawMAN よりもさらに優れた性能を獲得できることを明らかにした。

続いて、送信電力制御適用時を評価した結果から、送信電力制御により隠れ端末の存在エリアが増加しスループットが大きく低下する IEEE802.15.4 に比べて、受信端末主導型 MAC プロトコルではまったくスループットへの影響はないこと、また、送信失敗回数が増加しないことから、1 成功パケットあたりの送信消費電力も理想的に削減できることを明らかにした。

参考文献

- [1] Ghadimi, E., Soldati, P., Osterlind, F., Zhang, H. and Johansson, M.: Hidden Terminal-Aware Contention Resolution with an Optimal Distribution, *Proc. Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS)*, pp.182–191 (2010).
- [2] Osterlind, F., Wirstrom, N., Tsiftes, N., Finne, N., Voigt, T. and Dunkels, A.: StrawMAN: Making Sudden Traffic Surges Graceful in Low-Power Wireless Networks, *Proc. 6th Workshop on Hot Topics in Embedded Networked Sensors Article*, No.14 (2010).
- [3] ライブニツ賢治, 若宮直紀, 村田正幸: クラスタ型センサネットワークにおける IEEE802.15.4CSMA/CA の特性解析, *信学技報*, Vol.IN2005-1, pp.1–6 (2005).
- [4] 堤 直崇, 井上伸二, 角田良明: センサネットワークにおけるデータ集約を効率化するクラスタリング手法, *信学技報*, Vol.IN2007-110, pp.67–72 (2007).
- [5] 門間伸一, 見越大樹, 竹中豊文: センサネットワークにおける電力を押さえたクラスタリング手法, *信学技報*, Vol.NS2009-121, pp.7–10 (2009).
- [6] Jindal, A. and Psounis, K.: Modeling spatially correlated data in sensor networks, *ACM Trans. Sensor Networks* (2006).
- [7] IEEE Std. 802.15.4 - 2003, Standard for Telecommunica-

tions and Information Exchange Between Systems – Local Area Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN), available from <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.

- [8] Tobagi, F. and Kleinrock, L.: Packet switching in radio channels: Part II — The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution, *IEEE Trans. Commun.*, Vol.COM-23, No.12, pp.1417–1433 (1975).
- [9] 重安哲也, 松野浩嗣, 森永規彦: 隠れ端末の影響を調査するためのネットワーク生成アルゴリズムによる MAC プロトコル評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B, No.3, pp.351–360 (2006).
- [10] Kahn, J.M., Kats, R. and Pister, K.: Next century challenges: mobile networking for “SmartDust”, *Proc. 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.271–278 (1999).
- [11] 安藤 繁, 戸辺義人, 田村陽介, 南 正輝: センサネットワーク技術—ユビキタス情報環境の構築に向けて, 東京電機大学出版端末, 東京 (2005).
- [12] Jain, R., Chiu, D. and Hawe, W.: A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems, Technical Report DEC-TR-301, Digital Equipment Corporation (1984).
- [13] 阪田史郎: ユビキタス技術センサネットワーク, オーム社, 東京 (2006).
- [14] Masuda, N. and Sasase, I.: Asynchronous MAC Protocol with Transmission Packet Control and Adaptive Sleep for Event Driven Wireless Sensor Networks (in Japanese), *Trans. IEICE (B)*, Vol.J-92-B, No.3, pp.527–539 (2009).
- [15] Siva Ram Murthy, C. and Manoj, B.S.: *Ad Hoc Wireless Networks Architectures and Protocols*, Jane Bonell, Prentice Hall, United States (2004).

推薦文

情報処理学会中国支部表彰規定に則り, 平成 24 年度 (第 63 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会で発表された中から特に優秀であることが認められた優秀論文発表賞を受賞した論文である。

(情報処理学会中国支部長 三池秀敏)



重安 哲也 (正会員)

平成 10 年徳山高専情報電子工学科卒業。山口大学理学部編入後, 同大学大学院博士前期課程を修了し, 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。広島国際大学社会環境科学部助手, 同大学工学部助教を経

て, 平成 23 年 4 月より県立広島大学経営情報学部講師。主に, 無線通信プロトコルに関する研究に従事。DPS ワークショップ 2007 最優秀論文賞, 平成 20 年度情報処理学会山下記念研究賞, 国際会議 ITC-CSCC2008 Outstanding Oral Paper Award, 国際会議 CISIS2011 Best Paper Award 各受賞。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



伊達 仁美 (正会員)

平成 25 年 3 月県立広島大学経営情報学科卒業。在学中は無線センサネットワークに関する研究に従事。現在, JFE システムズ株式会社勤務。