

ヘテロジニアスセンサネットワークにおけるアクティブ期間制御方式 Active Period Control in Heterogeneous Wireless Sensor Networks

富田 康平¹⁾ 小室 信喜²⁾
Kohei Tomita Nobuyoshi Komuro

1 はじめに

近年、無線センサネットワークは環境モニタリングやホームオートメーションなど様々な分野に応用できるとして注目されている。また、実際に利用されているネットワークはデータの種類やデータレートなどが多種多様であり、ヘテロジニアスセンサネットワークへの関心が高まっている。しかしながら、ヘテロジニアスセンサネットワークはその複雑さゆえに制御が困難である。

無線センサネットワークにおける送受信制御の標準規格として IEEE802.15.4 規格 [1] がある。IEEE802.15.4 はスーパーフレーム構造と呼ばれる各ノードを同期するための特殊なフレームを定義している。IEEE802.15.4 はコーディネータノードのアクティブ、スリープのサイクル (Duty-Cycle) を制御することで各ノードのエネルギー消費を抑える。また、エンドツーエンド遅延や配信率についても MAC 副層パラメータを用いて制御する。しかしながら、IEEE802.15.4 はホモジニアスセンサネットワークを想定した規格のためヘテロジニアスセンサネットワークの制御に適していない。

ヘテロジニアスセンサネットワーク向けの通信プロトコルとして TMP(Tele-Medicine-Protocol) 方式が研究されている [2]。TMP 方式は Duty-Cycle と MAC 副層パラメータを制御し、医療アプリケーションにおける許容遅延を満たしつつ消費電力や配信率などのサービスも保証する。しかし、低遅延低消費電力の達成を優先するため高データレートノードの配信率が低下するという問題がある。この原因のうちの 1 つはバッファオーバーフローによるパケットロスであると考えられる。

本研究ではヘテロジニアスセンサネットワークにおいて配信率向上のためのアクティブ期間制御方式を提案する。提案方式は M/M/1 待ち行列モデルを用いて、バッファ占有率が 1 未満になるようアクティブ期間を制御する。シミュレーション結果より、提案方式の有効性を示す。

2 関連研究

2.1 IEEE802.15.4

無線センサネットワークにおける送受信制御方式として IEEE802.15.4 が標準化されている。ビーコンモード下ではネットワークはコーディネータによって管理されるスーパーフレームという構造のもとで動作する。図 1 にスーパーフレームの構造を示す。スーパーフレームはビーコンフレーム、アクティブ期間、スリープ期間からなる。ビーコンフレームではコーディネータノードは各ノードと同期を行う。次にアクティブ期間が始まるが、アクティブ期間は CAP(Contention Access Period) で構成される。CAP ではどのノードも CSMA/CA 方式を用いて

データの送信を行うことができるが、競争が起こるため遅延や配信率を保証できない。アクティブ期間が終了するとスリープ期間が始まる。

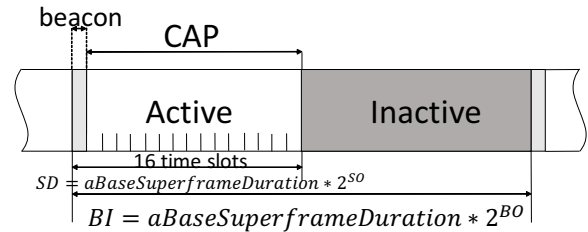


図1 スーパーフレームの構造

図 1 のようにアクティブ期間はタイムスロットに区切られ、基本単位である基本スーパーフレーム期間 ($aBaseSuperframeDuration$) は 16 タイムスロットからなる。スーパーフレームのアクティブ期間の長さであるスーパーフレーム期間 (SD : *SuperrameDuration*) はスーパーフレームオーダー (SO : *SuperframeOrder*) によって

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} (msec) \quad (1)$$

で表される。また、ビーコン間隔 (BI : *BeaconInterval*) はビーコンオーダー (BO : *BeaconOrder*) によって

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} (msec) \quad (2)$$

で表される。スーパーフレームの構造上 $SO \leq BO$ となることを踏まえて、アクティブ期間とスリープ期間の長さの比率である DC (Duty-Cycle) は

$$DC = \frac{2^{SO}}{2^{BO}} \quad (3)$$

となる。

2.2 TMP 方式

Duty-Cycle と MAC 副層パラメータの制御を用いて医療アプリケーションにおける許容遅延を満たした上で、エネルギー消費と配信率の向上を図ったものが TMP 方式である。しかし、エネルギー消費の最小化に伴い配信率が低下している。TMP 方式におけるバッファモデルを図 2 に示す。TMP 方式では、スリープ期間中に発生した

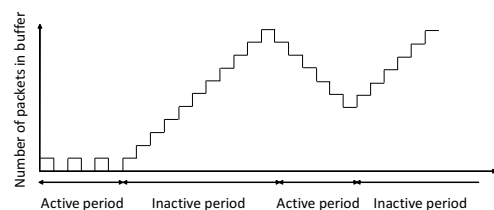


図2 TMP 方式におけるバッファモデル

- 1) 千葉大学大学院融合理工学府, Graduate School of Science and Engineering, Chiba University
- 2) 千葉大学統合情報センター, Institute of Management and Information Technologies, Chiba University.

パケットはバッファ内に蓄積されアクティブ期間中に処理する。そのため、バッファ内のパケット数はスリープ期間が長くなるとともに増加する。バッファ占有率が1以上になるとパケットロスが発生する。そのため、バッファ占有率が1未満になるようDCを制御するのが好ましい。

3 提案方式

本研究では、ヘテロジニアスセンサネットワークにおけるDuty-Cycle制御方式を提案する。許容遅延を満たしつつバッファ占有率が1未満になるようにDuty-Cycleを制御することで通信特性の向上を図る。本研究では、バッファ内のパケット数をM/M/1待ち行列を用いてモデル化する。ノード*i*における平均到着率を λ_i とするとBIの間に受け取るパケット数は

$$\lambda_i = \frac{\text{DataRate}_i}{8 \times P} \times BI \quad (4)$$

となる。ここで DataRate_i はノード*i*のデータレート、*P*は1つのパケットあたりのバイト数である。ノード*i*によって $a\text{BaseSuperframeDuration}$ の間に送信されるパケット数が n_i のとき、1つのアクティブ期間で送信されるパケット数を平均サービス率 μ_i とすると

$$\mu_i = n_i \times 2^{SO} \quad (5)$$

となる。式(4),(5)よりバッファの混雑率 ρ_i は

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \frac{\frac{\text{DataRate}_i}{8 \times P} \times a\text{BaseSuperframeDuration} \times 2^{BO}}{n_i \times 2^{SO}} \quad (6)$$

で表される。バッファオーバーフローを回避するためネットワーク内で最もバッファ占有率の大きなノードのバッファの混雑率 ρ^* が1より小さくなるように ρ^* 制御する必要がある。式(4)-(6)より

$$DC > \frac{\text{DataRate}^*}{8 \times P} \times \frac{a\text{BaseSuperframeDuration}}{n^*} \quad (7)$$

を満たすようDuty-Cycleを制御する。 $\text{DataRate}^*, n^*$ はそれぞれ最大データレート、最大パケット送信数である。

4 シミュレーション結果

本研究はシミュレータのOmnet++[3]を使用し提案方式とTMP方式を比較する。表1にシミュレーションに用いたパラメータを示す。また、本シミュレーションでは許容遅延は320msecとする。

表1 シミュレーションパラメータ

Parameters	Value
Packet length	100 (byte)
Simulation time	100-2000 (sec)
TX energy	19 (mA)
RX energy	20 (mA)
Sleep	0.0004 (mA)
Idle	0.5 (mA)

図3に10ノードの場合の遅延とエネルギー消費の比較を示す。表2に提案方式とTMP方式の各ノードの配信率を示す。TMP方式、提案方式それぞれDCは17%、

50%である。図3より、TMP方式、提案方式ともに許容遅延を満たしていることがわかる。また、TMP方式のほうがアクティブ期間が短いので消費電力が少ない。しかし、TMP方式ではデータレートの高いノードでの配信率の低下が顕著に表れる。一方、提案方式ではTMP方式と比較して高データレートノードの配信率は約8.5倍高い。

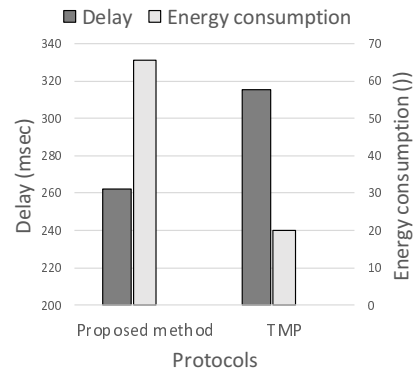


図3 遅延とエネルギー消費の比較

表2 ノードごとの配信率の比較

Node ID	Data rate	Proposed method	TMP
1	25 (kbps)	0.655	0.076
2	0.12 (kbps)	1.0	0.996
3	2 (kbps)	1.0	0.936
4	1.1 (kbps)	1.0	0.999
5	0.8 (kbps)	1.0	0.999
6	2.5 (kbps)	0.656	0.075
7	0.12 (kbps)	1.0	0.996
8	2 (kbps)	1.0	0.933
9	1.1 (kbps)	1.0	0.999
10	0.8 (kbps)	0.999	0.999
平均配信率		0.931	0.801

5 結論

本研究ではヘテロジニアスセンサネットワークにおける配信率を向上させる手法を提案した。提案方式はバッファのオーバーフローによるパケットロスを防ぐため、M/M/1待ち行列モデルを用いてIEEE802.15.4のDuty-Cycleを制御した。シミュレーション結果より提案方式の有効性を示した。

謝辞

本研究の一部は電気通信普及財団の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] IEEE Standards Association "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," <http://eccc.colorado.edu/liue/teaching/comm-standards/2015S-zigbee/802.15.4-2011.pdf>
- [2] M. S. Akbar, H. Yu, S. Cang, "TMP: Tele-Medicine Protocol for Slotted 802.15.4 With Duty-Cycle Optimization in Wireless Body Area Sensor Networks," IEEE SENSORS JOURNAL, vol. 17, No. 6, pp. 1925-1936, Mar. 2017
- [3] M. Kirsche, M. Schnurbusch, "A New IEEE 802.15.4 Simulation Model for OMNET++/INET," arXiv preprint arXiv: 1409.1177. 2014