

センサネットワークのライフタイム向上手法

川本 康貴 福井 潔 山内 雅喜 田川 忠道

沖電気工業株式会社 研究開発本部

〒541-0053 大阪市中央区本町 2-5-7 丸紅大阪本社ビル 4 階

E-mail: kawamoto728@oki.com

あらまし 本稿は、センサネットワークのライフタイムの向上手法に関する報告である。従来のネットワークライフタイム向上手法は、センサノードの設置密度に偏りがある場合、ライフタイムの向上性能が低下する。本稿ではノードの設置密度に偏りがある場合でも性能低下が少ないネットワークライフタイム向上手法を提案し、シミュレーションによりその優位性を示した。

キーワード センサネットワーク, アドホックネットワーク, 低消費電力化

Lifetime extension of sensor network

Yasutaka KAWAMOTO Kiyoshi FUKUI Masaki YAMAUCHI and Tadamichi TAGAWA

R & D Group, Oki Electric Industry Co., LTD.,

2-5-7Honmachi, Chuo-ku, Osaka 541-0053, Japan

E-mail: kawamoto728@oki.com

Abstract This paper studies a method to prolong sensor network lifetime. Conventional technique shows poor performance when sensor nodes are not distributed uniformly. This paper proposes a new technique that takes good performance when sensor nodes are not distribute uniformly. And the simulation results show the technique is effective.

Keyword sensor network, ad-hoc network, energy efficient

1. はじめに

近年、計算機の小型化、高性能化や無線技術の発達から、無線機能つき小型計算機を用いた無線アドホックネットワークの構築が容易になってきた。

さらに、SOI(Silicon on Insulator)やSOS(Silicon on Sapphire)などのLSIの低消費電力化を図る技術や、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) [1]等の小型で高性能なセンサを作成する技術の発達から、センサネットワークに注目が集まっている。

本研究で対象とするセンサネットワークは、センサ機能と無線通信機能を持った小型コンピュータ(以下、センサノード)を測定領域に設置し、環境測定などを行うシステムである。個々のセンサノードは、アドホックにネットワークを形成する機能を持っている。各ノードは、データをセンシングすると、ネットワークを介して、マルチホップ通信を行ってシンクノードへ送信する。

センサノードを多量に設置することによって、緻密な環境観測システムの構築が可能となる。

従来のアドホックネットワークの研究は、アドレスリングやルーティングなどのネットワーク制御についての研究が中心であり、ノードの低消費電力化やネットワーク全体の動作可能時間(以下、ネットワークライフタイム)の長期化等に関する研究はあまりなされていなかった。

しかし、センサネットワークを使って、環境観察を行う場合、多量のセンサノードを設置するため、1つ1つのセンサノードを人手でメンテナンスすることは非常に困難である。よって、ノードの低消費電力化に関する研究や、ネットワークライフタイムを伸ばすための研究が盛んになってきた。

環境観察を行いたい領域に多量のセンサノードを設置すると、多くの冗長パスが発生する。冗長なパスをできるだけ減らし、必要最低限のセンサノードだけでパスを構成するための手法として、GAF[2]やASCENT[3]といった手法が挙げられる。GAFやASCENTなどを利用すると必要最低限のセンサノードでパスを構成するので、ネットワークのライフタイムが向上する。

しかし、従来のネットワークライフタイムの向上手法は、センサノードの設置密度に偏りがある場合にはライフタイムの向上性能が悪くなる。多量のセンサノードを設置する場合、センサノードの設置密度を一樣にすることは事実上不可能である。よって、センサネットワークライフタイム向上手法は、センサノードの設置密度に偏りがあってもネットワークライフタイムの向上性能の低下が少ないものでなければならない。

本稿では、センサノードの設置密度に偏りがあっても、安定した性能を発揮できるネットワークライフタイム向上手法を提案する。さらに、提案手法によるネットワークライフタイム向上性能をシミュレータにより評価した。

本稿は以下の様に構成されている。第2章では従来技術の詳細な解説及び、従来技術の問題点の解説を行う。第3章では本稿の提案内容を解説する。第4章でシミュレーション環境、第5章で評価結果を示し、第6章をまとめとする。

2. 従来技術

本章では、ネットワークライフタイムを伸ばすための従来技術と、従来技術の持つ問題点を解説する。

まず、ネットワークライフタイム向上手法の概要を解説する。

センサネットワークにおいて、センシングしたデータを取り出すためにアドホックネットワークを形成する場合、センサノードが多量に存在すると、冗長パスが発生する。不必要な冗長パスの発生を防ぐためには、データを取り出すために必要最低限のパスを構築するセンサノードを選別する必要がある。(以下、データを取り出すために必要最低限のセンサノードとして選ばれたセンサノードを、アクティブノードと呼ぶ)。選別されなかったセンサノードは、アクティブノードの状態を監視するだけの省電力モードで動作させておき、アクティブノードがバッテリー寿命により動作不能となると、代わってアクティブノードになる。

ネットワークライフタイム向上のための既存の手法として、GAFやASCENTといった手法が挙げられる。GAFやASCENTは、アクティブノードを効果的に交代してネットワークライフタイムを延長する方法である。GAFやASCENTを利用することにより、センサネットワークの利用者は、センサノードのバッテリーを交換するまでの時間を長くすることができる。

2.1. GAF (Geographical Adaptive Fidelity)

GAFは、センサノードが持っている位置情報とセンサノードの通信可能距離をもとに、測定領域上に論理的なマスを形成し、同じマス目に属しているセンサ

ノードを同じグループとする。アクティブノードは、各グループにつき1台のみとする。アクティブノードが通信不能になった場合には、グループ内の他のセンサノードのうちの1つが、代わりにアクティブノードとなる。

2.2. ASCENT (Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies)

ASCENTを用いたシステムのセンサノードは、アクティブ状態、パッシブ状態、テスト状態、スリープ状態の4つの状態を持つ。アクティブ状態のセンサノードはデータを収集するためのパスを形成する。パッシブ状態のセンサノードは、周囲の電波状態から、アクティブノードの存在を監視する。監視の結果、周囲に閾値以下の数のアクティブノードしか存在しないことがわかると、テスト状態に状態変化する。テスト状態のセンサノードは、基本的にはパッシブ状態の時と同じ動作を行うが、一定時間の間に、周囲にアクティブ状態のセンサノードを発見できないと、アクティブ状態に移行する。スリープ状態のセンサノードは、送信受信を行わない。

センサノードは通常、パッシブ状態とスリープ状態を行き来している。パッシブ状態のセンサノードは、周囲にアクティブ状態のセンサノードが発見できなくなると、テスト状態に変化し、さらに周囲にアクティブ状態のセンサノードが発見できない場合は、アクティブ状態に変化し、パスを構築する。

2.3. 既存技術の問題点

GAFやASCENTは、パスの構築を複数のセンサノードでシェアすることにより、ネットワークライフタイムを向上させている。

これらの手法を用いた場合、センサノードの設置密度が低い場所では、アクティブノード候補になるノードの数自体が少ないため、他の場所に比べて動作可能なセンサノードがなくなるまでの時間が短い。

このことは、センサネットワークのセンサノード設置密度が一樣でない場合に従来手法を用いると、短い時間でフィールド上にセンシング不能な領域が出来てしまうことを示している。

実際にセンサノードを設置する場合、センサノードを均一に設置するのは非常に難しい。よって、上記の問題は、システムの運用時に顕在化する可能性が高い。

表1 図1内の値の意味

T_SP	スリープ状態からパッシブ状態へ移行するまでの時間
T_PS	パッシブ状態からスリープ状態へ移行するまでの時間
T_TA	テスト状態からアクティブ状態へ移行するまでの時間
T_AS	アクティブ状態からスリープ状態へ移行するまでの時間
T_LIVE	アクティブ状態時にLIVE信号を発信する間隔

3. 提案方式

本章では、センサノード設置密度を測定することなしに、センサノードの設置密度に偏りがあった場合でも、高い効果を得ることができるネットワークライフタイム向上手法を提案する。

本提案のセンサノードの状態移行図を図1に示す。

センサノードはパッシブ状態、テスト状態、アクティブ状態、スリープ状態の4つの状態を持つ。

状態遷移図内の値の意味を表1に示す。

パッシブ状態のセンサノードは、データのフォワードは行わないが、周囲の通信状態を絶えず監視している。パッシブ状態のノードは、予め設定されている時間T_PS経過する間にアクティブ状態のセンサノードからLIVE信号を受信するとスリープ状態に移行する。LIVE信号を受信しなければ周辺にアクティブ状態であるセンサノードがないと判断して、テスト状態へ移行する。

テスト状態のセンサノードは、基本的にはパッシブ状態と同じだが、センサノード固有の時間T_TA以内にアクティブ状態のセンサノードからのアクティブ状態通知信号を受信しなければアクティブ状態通知信号を発信して、アクティブ状態へ移行する。アクティブ状態通知信号を受信すればスリープ状態へ移行する。テスト状態は、アクティブ状態であるセンサノードが存在しない場合に、パッシブ状態のセンサノードが一斉にアクティブ状態に移行ことを防ぐために設けられている。T_TAはノード毎に全く違った値なので、複数のノードが同時にアクティブ状態になる可能性は低い。T_TAはT_PS、T_AS、T_SPに比べて短い。

アクティブ状態のセンサノードは、パスを構築することと、一定時間T_LIVE毎にLIVE信号を発信することの2つの動作を行う。アクティブ状態のセンサノードは、一定時間T_AS経過すると、スリープ状態へ移行する。なお、T_LIVEはT_PS、T_TA、T_ASに比べて十分短い。

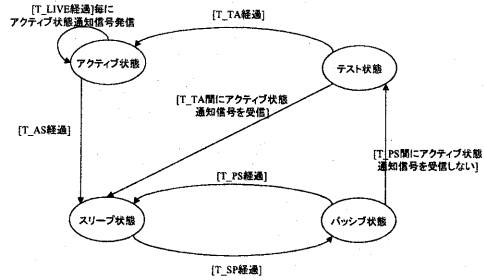


図1 提案手法の状態遷移図

スリープ状態のセンサノードは、パスの構築も周辺の通信状態の監視も行わない。よって、スリープ状態のセンサノードは、ノードが取る状態の中で、一番消費電力が少ない状態であり、この状態が長ければ長いほど、ノードの動作可能時間は長くなる。スリープ状態のセンサノードはT_SP経過するとパッシブ状態へ移行する。

以下にT_SPの決定手法を述べる。

すべてのセンサノードには、アクティブ状態になった回数を数えるアクティブ回数カウンタCを持つ。T_SPを算出するための関数は、アクティブ回数カウンタの値が大きくなればなるほど、T_SPの値が大きくなる様に設定する。今回のシミュレーションでは、下の式を用いてT_SPを算出した。

$$T_SP = (50 \times c) \bmod (T_SP_MAX)$$

但し、T_SP_MAXはT_SPの最大値である。

ノードの設置密度が低い地域のノードは、それ以外の場所に設置されているノードに比べ単位時間あたりの稼働率は高くなる。なぜなら、ノードの設置密度が低い地域は、アクティブノードになることができるノードの数が他の地域のノードに比べて少ないからである。T_SPをノードのアクティブ回数により変化させるのは、ノードの設置密度が高いところと低い所の稼働率を合わせるためである。

ASCENTとの違いは以下の2点である。

- ASCENTは一端アクティブ状態に移行すると、二度とスリープ状態に戻らないが、提案方式ではアクティブ状態になって一定時間経過すると、スリープ状態に移行する
- ASCENTではスリープ時間が変化しないが、提案方式ではアクティブ状態になった回数によって、スリープ時間が変化する。

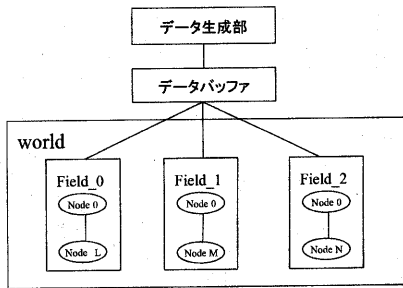


図2 シミュレーション環境

ネットワークライフタイム向上手法として ASCENT を用いた場合、センサノードは一端アクティブ状態に移行すると、バッテリーを使い切るまで稼動する。このことにより、ASCENT を用いたセンサネットワークは、提案方式に比べてデータ遅延が起こる可能性が少なくと考えられる。なぜなら、通信可能範囲内のすべてのノードが一斉にスリープ状態である確率が低いからである。

提案方式では、各ノードは周囲のノードの状態にかかわらずスリープ状態になる。このことより、Field 内のノードがすべてスリープ状態になる可能性が高く、その結果として、データ遅延が発生する可能性がある。

しかし、上記の理由による遅延はセンサネットワークの規模が大きくなると、顕在化しにくい。なぜなら、センサネットワークの規模が十分大きいと、ある地域のセンサノードがすべてスリープ状態であっても、他の地域に迂回して通信を行うことができるからである。

4. シミュレーション環境

本章では、提案システムの特徴を評価するために作成した、シミュレーション環境について解説する。

シミュレーション環境を図2に示す。

シミュレーション環境は、センシングデータの発生をシミュレートするデータ生成部と、データ遅延をシミュレートするためのデータバッファ、センサネットワーク全体を抽象化したworldの3つからなる。Worldは3つのFieldからなり、Fieldは複数のNodeからなる。Fieldは、大きいセンサネットワークの1部で、互いに電波到達距離内にあるNodeの集合を抽象化したものである。従ってField内部のNodeの数は、ノードの設置密度を表す。Nodeはセンサノードを抽象化したものである。

以下に、各部の詳細な動作を説明する。

データ生成部は、一定時間ごとにパケットを生成する。データ生成部で生成されたパケットは、データバッファを介して、World内のFieldへ分配される。

表2 シミュレーション環境

World内ノード数	27
データ生成頻度	3パケット/min

データバッファは、Fieldに対し、ラウンドロビンにパケットを分配する。Field内部のNodeがすべてスリープ状態であった場合、データバッファはパケットをバッファリングし、次の単位時間後に再送する。

Fieldを形成しているNodeの状態移行は、図1のとおりである。

表3 Nodeのパラメタ

T_AS	20(sec)
T_SP 初期値	45(sec)
T_PS	5(sec)
T_TA(最大値)	20(sec)
T_SP_MAX	800(sec)
T_SP 増加割合	50(sec)
アクティブ状態時の消費電流	0.5(mA)
データフォワード時の消費電流	1.2(mA)
スリープ時の消費電流	0.0(mA)
バッテリー量	220(mAh)

5. 結果

本章では、第4章で解説したシミュレータを用いて、既存技術である ASCENT と提案技術と比較する。比較する点は、それぞれの手法を用いた場合の、ノード密度の偏りとネットワークライフタイムの関係である。

測定は、以下のように行った。まず初めに、ネットワークライフタイム向上手段として、ASCENT を用いた場合のネットワークライフタイムを測定した。次に、ネットワークライフタイム向上手段として、提案手法を用いた場合のネットワークライフタイムを測定し、ASCENT を用いた場合の結果と比較した。最後に、提案手法利用時のデータ遅延時間を測定した。

又、提案手法を観察することにより、T_SPのリセット回数とセンサノードの設置密度に相関関係があることが分かった。そこで、予備実験として、提案手法に、「T_SPリセット回数の高低により、T_SP_MAXを変化させる」仕組みを付け加え、測定を行った。

5.1. 各手法のパラメータ

測定に使用したシミュレーション環境を表1に、Nodeのパラメータを表3に示す。

なお、ノードのアクティブ時の消費電流、アクティブ時にデータをフォワードしたときの消費電流、バッテリー容量は、現在筆者らが開発中のデバイスを元に算出した。

又、ASCENT を用いた場合の Node の状態遷移図を図

3 示す。

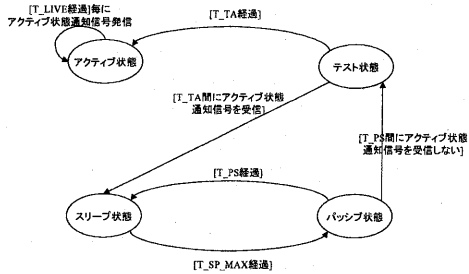


図3 ASCENTを用いた場合の状態遷移図

5.2. ノード設置密度の偏りとネットワークライフタイムの関係

ネットワークライフタイム向上手段として、ASCENTを用いた場合と、提案手法を用いた場合のグラフを図4に示す。図4の縦軸はネットワークライフタイムを、横軸はノード設置密度の偏り度を示す。ノード設置密度の偏り度とシミュレータ内部の各Fieldに設置されているNodeの数の関係を表3に示す。

図4と表3からASCENTを用いた場合のネットワークライフタイムの向上効果には、ノード設置密度の偏り度が低い場合と高い場合とで約50%の開きがある。一方、提案方式を用いた場合には、ネットワークライフタイムの開きが最大約12%しかない。

以上のことより、ノードの設置密度に偏りがある場合、ASCENTを用いるよりも提案手法を用いた方が、ネットワークライフタイム向上効果が高い事がわかる。

又、提案手法を用いた場合のネットワーク稼働率は、約60%であった。

表3 ノード設置密度の偏り度とFieldのNode分布

ノード設置密度の偏り度	各FieldのNode分布 (Field_0 Field_1 Field_2)		
1	9	9	9
2	10	7	10
3	11	5	11
4	12	3	12

5.3. T_SPリセット回数とノード設置密度の相関関係

図5に、ノード設置密度の偏り度が4であった場合に、提案方式を用いた場合の、各Field内の各NodeのT_SPリセット回数平均値を示す。

図5の縦軸は各Field内の各NodeのT_SPリセット回数平均値を、横軸は時間を示す。

図5より、ノード設置密度が低い地域(Field_1)内のNodeのT_SPリセット回数が、他の地域内にある

NodeのT_SPリセット回数に比べて大きいことが分かる。つまり、T_SPのリセット回数とノードの設置密度には、相関関係があるということである。

これを元に、提案手法に「T_SPリセット回数の高低により、T_SP_MAXを変化させる」仕組みを付け加え、測定を行った。

仕組みの具体的なフローチャートを図6に示す。

図6で利用している閾値は、ノードが均一に設置されている場合の値を利用した。

測定結果を図7に示す。図7の縦軸はネットワークライフタイムを、横軸はノード設置密度の偏り度を示す。図7と図4をから、T_SPリセット回数の高低により、T_SP_MAXを変化させると、ネットワークライフタイムがさらに向上することが分かる。

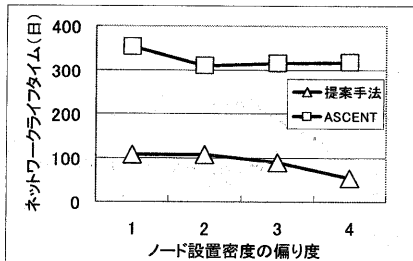


図4 ノード設置密度の偏りとライフタイム向上性能の関係

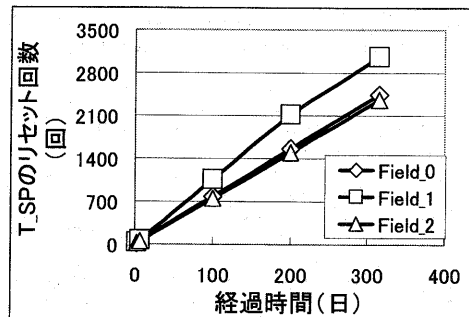


図5 ノード設置密度とT_SPリセット回数の関係

6. まとめ

本報告では、センサノードがアクティブ状態になった回数によってスリープ時間を変えることにより、センサノードの設置密度に偏りがあった場合でも効果があるネットワークライフタイムの向上手法を考案し、シミュレーションにより、その有効性を確認した。

また、予備実験として、従来方法に加えて、T_SPリセット回数の高低により、T_SP_MAXを変化させた場合のデータを測定した。

T_SP_MAX の最適な決定方法を見つけることが、今後の課題である。

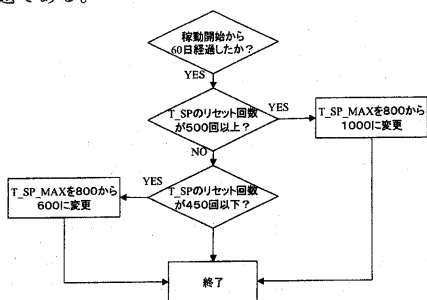


図7 T_SPを元にしたT_SP_MAX決定方法フローチャート

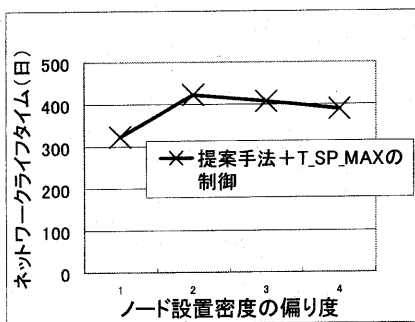


図8 提案手法 + T_SP_MAX 制御時のノード設置のばらつきとネットワークライフタイムの関係

文献

- [1] MEMS Exchange, "MEMS Clearinghouse", <http://www.memsnet.org/>
- [2] Y.Xu, J.Heidemann, and D.Estrin, "Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing", ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2001), pp.70-84, April 2001.
- [3] Alberto Cerpa, Deborah Estrin, "ASCENT: Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies", UCLA Computer Science Department Technical Report UCLA/CSD-TR 010009, May 2001.