

センサーネットワークにおける リレーノードのスリープに関する一検討

7311635 小金井 朗王

1. はじめに

センサネットワークにおいて、長寿命・長時間での運用が期待されている。ただし、センシング結果を集約するリレーノード（一方のノードから通知を受信し、もう一方のノードへ通知を発信する、中継の役割を持つノード）では絶えず受信可能状態を継続するため、リレーノードでの消費電力が大きくなる[1]。これにより、大量に電力を消費するリレーノードは他のノードに比べ早く死滅してしまい、結果として、ネットワーク全体としても死滅してしまう。このように、リレーノードの電力大量消費によるネットワークの短寿命が問題となっている。そこで、本研究では、リレーノードにおけるスリープ期間の設計について検討した。

2. 無線センサネットワーク

無線センサネットワークとは、センサノードを広範囲に分布させ、ノード間で測定したデータを通信する。センサノードとは、センサとデータ処理機能、無線機能を実装している装置である。これらセンサノードが協調し、周囲の環境をセンス（情報を採取）することができる。そのため、センサノードを自由に配置することができる。

センサネットワーク技術は主に電力制御、温度制御、省エネルギー、工業計装、居住環境、自然保護、健康管理、交通状況モニタ等に使用されている。多くの点を同時計測できるため、監視、追跡、制御のような、物理現象の分布変化を把握するのに有効である。このような用途で使用されるセンサネットワークには、通信品質の向上と長寿命化の両立が求められる。

る。

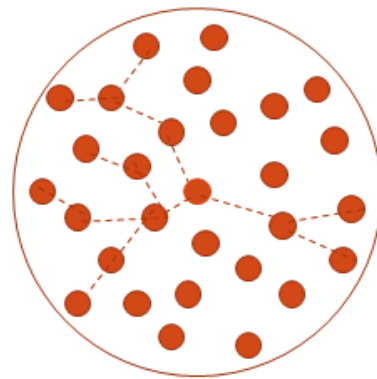


図1 センサネットワーク環境

マルチホップ通信とは、「低コスト化」、「大規模化（広通信範囲化）」、「高信頼性」を実現する通信技術である。マルチホップ通信は、バケツリレーのように無線端末の間でデータの移動を繰り返していくことで、1つのデータ収集局でカバーできる通信範囲を広げることが可能となる。このため、ある範囲の無線ネットワークを構築するとき、従来比で少ない数のデータ収集局の使用に抑えられるので、コストを抑えることが可能となる。さらに、電波環境が良くない領域を回避するようマルチホップ中継経路を設定することで「電波の不感地帯」を解消する。これにより、データ伝送の高信頼化にも貢献することができる。

センサネットワークでのマルチホップ通信は、ある空間に分布するノードが隣接するノードへ情報を受け渡し、受け渡されたノードがまた隣接する別のノードへ情報を受け渡す。これを情報収集局（ネットワークの中心に位置するノード）へと集約す

るまで情報の伝達リレーを続ける。この時、情報の受け取りと送信の両方の役割を果たす（中継の役割を果たす）ノードをリレーノードという。一方、情報を受け取らず、送信するのみのノードをエンドノードという。これらリレーノードとエンドノードの関係を表す図を以下に示す。

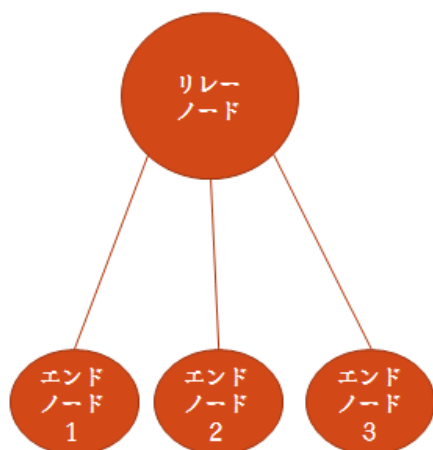


図2 センサネットワーク環境の基本形

3. システムモデル

図2のように、リレーノードに対し複数のエンドノードが通知を行う環境を考える。エンドノードがリレーノードへの通知を行うタイミングは、一般的に、周期的な通知と非周期的な通知の2種類が考えられる。本研究では、エンドノードが通知を行うタイミングはエンドノードがそれぞれ任意のタイミングで行う。従って、リレーノードは、いつ送信されるかわからないエンドノードの通知を取り逃さないよう、常に通信状態を維持していなければならない。このように、常に通信を行える状態を維持している状態をアクティブ状態といい、通信を行わず、エネルギー消費を抑えている状態をスリープ状態という。ここで、アクティブ状態では多くの電力を消費するかわりに、エンドノードからの通知を逃すことはない。一方、スリープ状態では電力の消費はごく僅かであるかわりに、エンドノードからの通知を取り逃してしまう。取り逃した通知はその後、履歴に

残ることはなく、完全に棄却されるものとする。このように、ネットワークを長寿命化させるため、リレーノードをスリープさせると通知が受信できず、通信の質が低下してしまう。一方、通知を取り逃さないようにすることで通信の質を高品質に保とうとすると、リレーノードが早々に死滅してしまうため、短寿命のネットワークとなってしまう。このように、高い通信品質と長寿命化を実現するのは難しい。

本研究では、このような通信品質と長寿命化の両立を、通知失敗確率によるリレーノードのスリープ制御により実現した。通知失敗確率とは経過した全タイムスロットにおいて、通知失敗回数/全通知回数で表される。シミュレーションを行う際、あらかじめ通知失敗確率の許容値として適当な値を定め、その値に収束するようリレーノードのスリープ周期を調整する。許容値以上に失敗が起こるようであればスリープする機会を減らし、逆に許容値を下回るようであれば、スリープする機会を増やし調整を行う。通信開始後、過渡状態を経て定めた通知失敗確率に収束する。収束後は安定的にリレーノードのスリープが行われるが、過渡状態においてはその限りではない。過渡状態では、連続的に急激に許容値の上下に変動する。リレーノードが連続的にエンドノードからの通知を逃した場合、連続的なデータの欠落をより多く引き起こしてしまうため、この過渡状態での制御が特に重要課題となっている。

通知失敗確率によりリレーノードのスリープを行うため、リレーノードは通過した全タイムスロットにおいて、エンドノードからの全通知回数と及び通知が失敗した回数を把握しなければならない。そこでエンドノードからの通知の成否のフィードバックが行われる。そのフィードバックが行われる様子と、リレーノードの各状態によるエンドノードからの通知の成否をともに以下の遷移図に示す。

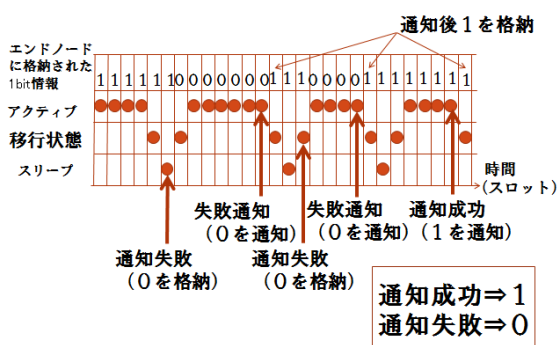


図3 リレーノードの状態による通知受信の成否

横軸はタイムスロット（通信開始後の経過時間）、縦軸はリレーノードの各状態及びエンドノードに格納された通知の成否に関する 1bit 情報である。また、移行状態とは、アクティブからスリープへ、またはスリープからアクティブへと状態を移行する際、必ず1スロット経なければならない状態である。移行状態では、リレーノードは電力を大量に消費し、また、エンドノードからの通知の受信もできない状態である。格子内の円形はリレーノードを表している。エンドノードには初期値として1が代入されており、また、リレーノードへ情報を通知後、1を格納するものとする。エンドノードからリレーノードへの通知が正常に行われた場合、そのまま1をリレーノードへ通知する。しかし、リレーノードがエンドノードからの通知を受信できなかった場合、エンドノードは0を通知する。エンドノードはアクティブになると必ず情報の通知を試み、それ以外のタイムスロットではスリープ状態を維持する。リレーノードは、エンドノードから通知があるまで、自身の状態をアクティブに保ち続ける。そして、エンドノードからの通知受信後、1スロットの移行状態を経てスリープ状態となる。そのスリープ状態にある時にエンドノードが情報を通知しようとしたとする。この時、リレーノードは通知を受信することができず、この通知情報は棄却される。そのため、リレ

ーノードではこの情報はわからないが、エンドノードでは、この時リレーノードが通知受信に失敗したことを 1bit 情報の 0 を格納することにより記憶する。ここで格納した情報は、後にリレーノードがアクティブになった時に、リレーノードへ通知する。これにより、過去に受信失敗が起こったことをリレーノードへフィードバックすることが可能となる。その後、フィードバック通知を受け取ったリレーノードは、その通知結果に応じて自身の連続スリープ数を調整する。そして、エンドノードは、リレーノードにフィードバック情報通知後、新たに 1 を格納することで、情報の更新を行う。また、これはリレーノードが移行状態にある時も同様であり、移行状態にあるためリレーノードがエンドノードからの情報を受信できなかったという情報は、後にリレーノードがアクティブとなった時に 1bit 情報の 0 を通知することで改めて知らされる。その後の処理に関しても同様である。

最後に、リレーノードがアクティブ状態にある際にエンドノードが情報の通知を行った場合、リレーノードは受信可能状態であるため、通知の受信が成功する。1bit 情報の 1 を通知することで、通知前のタイムスロットにおいて、リレーノードによる通知情報の取り逃しがなかったことがフィードバックされる。このように、タイムスロットとともにリレーノード、エンドノードの状態は変化していく。

4. リレーノードのスリープ法の提案

センサネットワークの品質と長寿命化を両立するため、本研究では、以下に示す2つのスリープ法を提案する。

施策1：

エンドノードの通知失敗確率が規定値を超えない限りは、リレーノードのスリープ時間（スロット）を+1する。規定値を超えた場合、リレーノードのスリープ時間を-1する。

施策 2 :

エンドノードの通知失敗確率が規定値を超えない限りは、リレーノードのスリープ時間（スロット）を+1する。規定値を超えた場合、リレーノードのスリープ時間を $\div 2$ （半減）する。奇数の場合、半減の際は切り捨てとする。

以上のように、リレーノードはエンドノードからの通知失敗の有無についてフィードバックを受け通知失敗確率を算出する。また、どちらの提案法においても、スリープ時間の最小値は1とする。以降、施策1及び施策2について、図を用いて解説する。

提案した2つのスリープ法のうち、施策1について、以下の遷移図を用いて解説する。

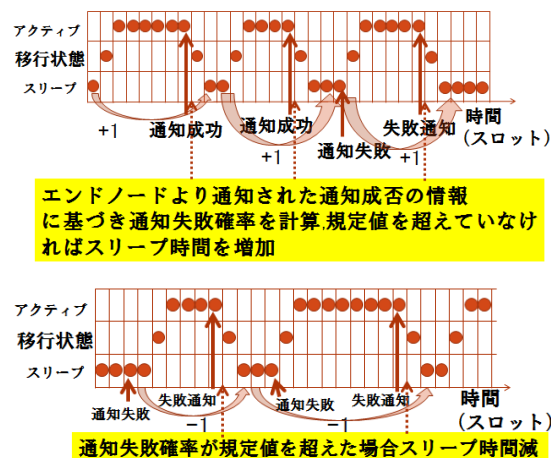


図 4 施策1のスリープ法におけるリレーノードのスリープ遷移図

上図のうち、上段の遷移図では、エンドノードからの通知後計算した通知失敗確率が規定値を下回っている場合の、下段ではエンドノードからの通知後計算した通知失敗確率が規定値を上回っている場合の、リレーノードのスリープ数の遷移を表している。スリープ数1であったリレーノードは、通知成功のフィードバックをもらってすぐに通知失敗確率を計算する。通知失敗確率が規定値を超えない場合、次のスリープでは2スロット連続でスリープするというように、スリープするスロット数を+1す

る。次にまた通知失敗確率が規定を超えていない場合、次のスリープでは更に1スロットスリープ数を追加する。これを、通知失敗確率の規定値を上回らない限り繰り返す。

下段の遷移図では、通知失敗確率を計算し、規定値を超えていた場合、リレーノードは次のスリープ数を-1している様子が表されている。次のスロットでも、その次のスロットでも、リレーノードは通知失敗確率が規定値を上回っている限り、次のスリープ数（スリープ時間のスロット数）を1ずつ減らしていく。なお、このスリープ数の減少の最小値は1とし、スリープ数が0となることはないこととする。

提案した2つのスリープ法のうち、施策2について、以下の遷移図を用いて解説する。

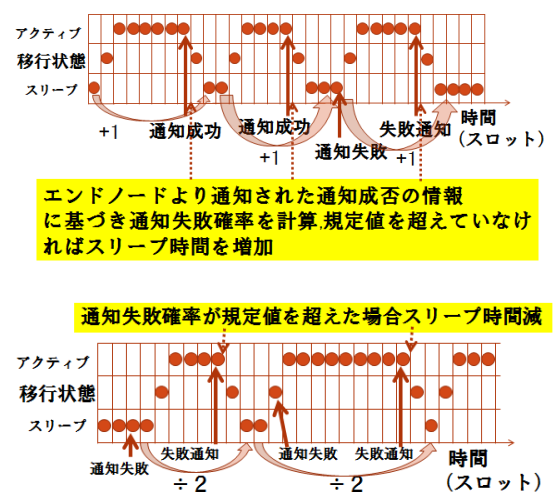


図 5 施策2のスリープ法におけるリレーノードのスリープ遷移図

上図のうち、上段の遷移図では、エンドノードからの通知後計算した通知失敗確率が規定値を下回っている場合の、下段ではエンドノードからの通知後計算した通知失敗確率が規定値を上回っている場合の、リレーノードのスリープ数の遷移を表している。施策1同様、スリープ数1であったリレーノードは、通知成功のフィードバックをもらってすぐに

通知失敗確率を計算する。通知失敗確率が規定値を超えない場合、次のスリープではスリープスロット数を+1する。次にまた通知失敗確率が規定を超えていない場合、次のスリープでは更に1スロットスリープ数を追加する。これを、通知失敗確率の規定値を上回らない限り繰り返す。ここまでは施策1と同様の挙動をする。

下段の遷移図では、リレーノードのスリープ中にエンドノードから通知があった後、通知失敗確率を計算し、規定値を超えていた場合、リレーノードは次のスリープ数を半減(÷2)している様子が表されている。次のスロットでも、その次のスロットでも、リレーノードは通知失敗確率が規定値を上回っている限り、次のスリープ数(スリープ時間のスロット数)を半減させていく。なお、このスリープ数の減少の最小値は1とし、スリープ数が0となることはないこととする。

5. シミュレーション諸元

本研究で使用するシミュレーション諸元を以下に示す。

表1 本研究でのシミュレーション諸元

パラメータ	値
リレーノード数	1
エンドノード数	1
通知失敗確率の規定値	0.2
エンドノードからリレーノードへの通知成否F B	あり

リレーノード、エンドノード共に1であり、エンドノードからリレーノードへ通知の成否のフィードバックが行われるシステムを想定している。そして、通知成否の情報に基づき計算される通知失敗確率の規定値は0.2(20%)と想定する。ここで、エンド

ノード数1となっているが、これは最も基本的な環境で評価を行うためである。今回のシミュレーションではエンドノード数1であるが、複数のエンドノードが存在する環境でも、その複数のノードをまとめ、1つの大きなエンドノードとみなすことでシミュレーションが可能である。通知失敗確率の規定値を0.2(20%)としているため、20%の失敗までを許容するシステムであり、この20%を上回るか下回るかにより、リレーノードのスリープの仕方を最適化する。

本研究では、リレーノードのスリープの仕方を考察するが、エンドノードのスリープの仕方はマルコフモデルを適応した下図のようになる。

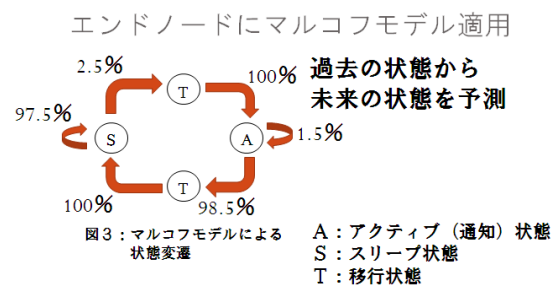


図6 エンドノードにマルコフモデルを適用

アクティブ状態からアクティブ状態への変遷の確率は1.5%、スリープ状態から移行状態を経てアクティブ状態への変遷の確率は2.5%としている。そして、アクティブ状態から移行状態を経てスリープ状態へ変遷する確率、スリープ状態からスリープ状態へ変遷する確率はそれぞれ、上記の確率を100%から引いたものとなる。なお、移行状態から次の状態へへ変遷する確率は100%とする。この設定値からもわかる通り、本研究で想定するシステムでは、基本的にエンドノードはスリープ状態にある。そして、リレーノードへ通知を行う必要がでてきた時のみ、アクティブ状態となり情報の通知を行う。

なお、ここでマルコフモデルを適用しているのは、[2]で実際にエンドノードにマルコフモデルを

適応しての評価が行われていたからである。本シミュレーションでのエンドノードの挙動は、全てこのモデルに従うものとする。

6. シミュレーション結果及び考察

スリープ法の性能を評価するため、次の3つの特性を評価する。①リレーノードの総スリープ数、②通知失敗確率の規定値への収束、③連続通知失敗回数の総出現回数。これらの特性について、比較を行う。なお、比較は全て過渡的な状況において行うものとする。これは、過渡的な応答において連続して通知失敗が起こることを避けることが重要であるためである。以後、実際に施策1及び2の各種性能の比較を行っていく。

タイムスロット0から1万スロットにおいて、リレーノードの連続スリープスロット数の遷移の測定結果を次に示す。

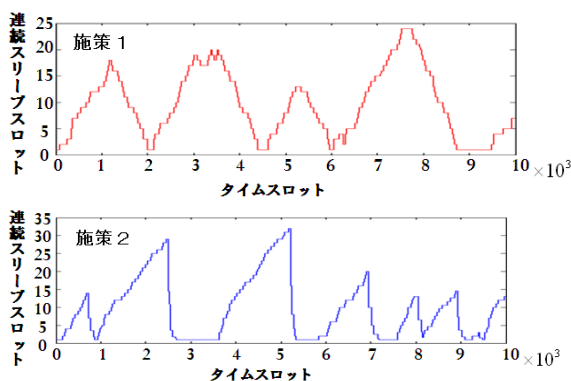


図7 リレーノードの連続スリープ数の遷移

上図より、施策1、施策2ともにタイムスロット経過とともになだらかに連続スリープ数が増加していることがわかる。また、スリープ数の減少時は、施策1はなだらかに（-1ずつ）、施策2では急激に（半減ずつ）減少している様子が確認できる。このように、どちらの施策においても、リレーノードの連続スリープ数は増加と減少を繰り返していく。

また、この時、タイムスロット1万の期間までのリレーノードの総スリープ数は以下となる。

施策1：1894 スロット

施策2：1876 スロット

このように、若干であるが、施策1の方が多くスリープ状態できることがわかる。これはつまり、施策1の方がより長寿命での利用を実現できていることを表している。

タイムスロット0から10万スロットにおいて、通知失敗確率の遷移の測定結果を以下に示す。

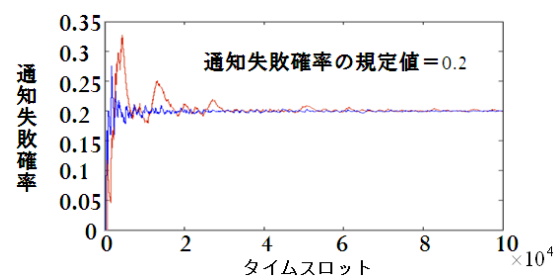


図8 通知失敗確率の遷移 赤：施策1 青：施策2

図より、タイムスロットの経過とともに、通知失敗確率の規定値である0.2に収束していく様子が確認できる。過渡状態は4万スロット付近まで続き、その後、規定値に収束する。収束の早さを考えた場合、施策2の方がより高速に収束している。これは施策2の方が急激にスリープ数を減少することができるので、通知結果を過剰に取り逃すことを回避できるためである。これは、過渡状態における連続的な通知失敗を防げるので、通信品質が施策1に比べ優れているということがわかる。

タイムスロット1万までのシミュレーションを1万回行った際の連続通知失敗回数の総出現回数の遷移の測定結果を次に示す。

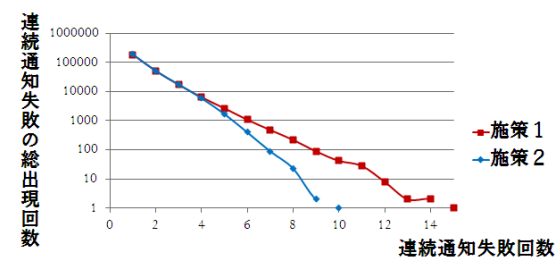


図 9 タイムスロット 1 万までのシミュレーションを 1 万回試行時の連続通知失敗回数の総出現回数

図より, 施策 2 の方が連続して失敗が起こりにくいことがわかる. これは, データが連続して欠落することがより少ないことを表しており, 通信品質が施策 1 と比べ優れていることを示している.

5. まとめ

本研究では, センサネットワークにおいて, 通信の高品質とネットワークの長寿命をどちらも実現する, 最適なネットワークの構築を実現した. 実現にあたり, リレーノードにスリープ時間を設け, そのスリープ方法を考察した. 最適なセンサネットワーク環境を評価するため, リレーノードの総スリープ数, 通知失敗確率の規定値への収束, 連続通知失敗回数の総出現回数を, それぞれ過渡状態に着目して測定・比較を行った.

結果, リレーノードの総スリープ数では施策 1 が, 通知失敗確率の規定値への収束及び連続通知失敗回数の総出現回数では施策 2 が, それぞれ優れていることがわかった. 過渡状態での連続的な通知失敗は通信品質の大きな低下を引き起こすので, スリープ数の多少の減少を許容してでも, 高品質の通信を実現する施策 2 での通信を行うのが望ましい.

文 献

- [1] W.R. Heinzelman, et al., IEEE System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on , vol.2, Jan. 2000
- [2] Subramanian, R.; Fekri, F. "Sleep Scheduling and Lifetime Maximization in Sensor Networks: Fundamental Limits and Optimal Solutions" IEEE 2006 , pp.218 - 225
- [3] Ying-Hong Wang; Kuo-Feng Huang; Cheng-Che Lin; Chih-Wei Hung "The Optimal Sleep Control for Wireless Sensor Networks" 2009 , pp: 95 - 102

- [4] Zhen Zhao; Elanchezian, A.; de Oliveira, J.C. "Sleeping policy cost analysis for sensor nodes collecting heterogeneous data" 2009 , pp: 635 - 640
- [5] Miao Peng; Yang Xiao; Wang, P.P. "Error Analysis and Kernel Density Approach of Scheduling Sleeping Nodes in Cluster-Based Wireless Sensor Networks" 2009 , pp: 5105 - 5114
- [6] Kumar, B.; Yadav, R.K.; Challa, R.K. "Comprehensive Performance Analysis of MAC Protocols for Wireless Sensor Networks" 2010 , pp: 342 - 347
- [7] Ergen, S.C.; Varaiya, P. "PEDAMACS: Power Efficient and Delay Aware Medium Access Protocol for Sensor Networks" 2006 , pp: 920 - 930

学会発表実績

- (A) 査読付き論文
なし
- (B) 査読付き小論文
なし
- (C) 査読なし論文
小金井朗王, ○榎田洋太郎, ○田久修
「コグニティブ MIMO 無線システムにおける, プライマリシステムの伝送速度を保証する送信方法選択法の検討」電子情報通信学会 2011 年総合大会 2011 年 3 月
小金井朗王, ○榎田洋太郎, ○田久修
「センサーネットワークにおけるリレーノードのスリープに関する一検討」電子情報通信学会 東京支部学生会「研究発表会」2013 年 3 月
小金井朗王, ○榎田洋太郎, ○田久修
「周波数共有時にプライマリシステムの最低レート保証を可能にするアンテナ選択手法」ソフトウェア無線研究会 2011 年 11 月
- (D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表
なし