

センサネットワークの時刻同期手法におけるロバスト性の評価

牟田園 明[†] 菅野 正嗣^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 563-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪府立大学大学総合リハビリテーション学部 〒 583-8555 大阪府羽曳野市はびきの 3-7-30

E-mail: [†]{a-mutazono,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp

あらまし 多数のセンサノードによって構成されるセンサネットワークにおいて、効率のよい情報収集や省電力化のためにセンサノード間の時刻同期は重要である。センサネットワークの適用範囲は様々であり、その適用箇所によってネットワークの規模や配置される環境は大きく異なると考えられる。そのため、それぞれのネットワークに適した時刻同期機構を用いる必要がある。本稿では、自律分散型の同期方式であるパルス結合振動子 (PCO) モデルと集中型の同期方式であるマルチホップ RBS 方式に関して、MAC 層における遅延の揺らぎやパケット損失の影響を考慮し比較を行った。シミュレーション結果を通じて、それぞれの同期方式が性能を発揮できるネットワーク環境を明らかにした。

キーワード センサネットワーク, 時刻同期, パルス結合振動子, CSMA/CA, マルチホップ RBS, パケット損失

Evaluation of Robustness in Time Synchronization for Sensor Networks

Akira MUTAZONO[†], Masashi SUGANO^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology

1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

^{††} School of Comprehensive Rehabilitation, Osaka Prefecture University

3-7-30 Habikino, Habikino-shi, Osaka, 583-8555, Japan

E-mail: [†]{a-mutazono,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp

Abstract In sensor network the time synchronization between sensor nodes is important because of efficient information gathering or energy-saving control. Since the network size and the environment of a sensor network change variously, the technique of time synchronization suitable for each network is required. Pulse Coupled Oscillation (PCO) models how the local interaction between individuals realizes the whole synchronization. On the other hand, there is a multi-hop reference broadcast synchronization (RBS) method which obtains the time synchronization of the whole network by transmitting the difference of the time from reference nodes to the network divided into the cluster. In this paper, we perform comparison about these two techniques in consideration of jitter of delay and the loss of packet resulting from lower layer protocol. We investigated the performance of each technique under the influence of network size, wireless channel quality, etc. through the simulation experiment. We present results obtained from simulation that how each method shows their best performance.

Key words sensor networks, synchronization, pulse coupled oscillator, CSMA/CA, multi-hop RBS, packet loss

1. ま え が き

無線技術と半導体技術の発展により、近距離での通信能力を備えた低価格な小型センサの開発が可能となり、環境観測、医療計測、ホームセキュリティなどへの適用が期待されるセンサネットワーク技術が多くの研究者の注目を集めている [1]。センサネットワークで用いられるセンサノードは小容量のバッテリーしか搭載できず、一旦配置されたセンサノードのバッテ

リーを交換することは困難であるため、センサネットワークにおいて電力消費の抑制は非常に重要である。消費電力を抑えるための一般的な手法としては、センシングや情報転送に関わらない期間はセンサノードをスリープ状態にする方法がある [2]。また、センサノードがデータを送信するタイミングを調節することで、ネットワーク内に分布したセンサノードが受信した情報を効率的に収集することができる [3]。これらの省電力を目的とした動作制御は、センサノード間の時刻同期なくして行うこ

とはできない。また、時刻情報を含むデータを収集する場合もあることから、センサネットワークにおいてセンサノード間の時刻同期は必要不可欠である。

ネットワークにおける時刻同期手法としては NTP (Network Time Protocol) [4] などがあるが、有線のネットワークと異なりセンサネットワークでは、電力枯渇や故障によるセンサノードの停止や追加、さらには移動によってネットワークの形状が動的に変化することから、有線のネットワークを対象とした時刻同期機構はセンサネットワークに適用することが困難である。また、センサネットワークが多数のセンサノードで構成されることを考えると、すべてのセンサノードに同期信号を送信したり、特定のセンサノードがすべてのセンサの状態を把握するような集中型の制御は、拡張性がなく実現が難しい。そのため、大規模なセンサネットワークには、それぞれのセンサノードが周辺のセンサノードとの間でのみ情報をやり取りするような、自律分散的な制御が適していると考えられる。

パルス結合振動子 (PCO: Pulse Coupled Oscillator) モデルは、蛍の発光や心臓のペースメーカー細胞など、生物界における個体間の局所的な相互作用によって、自律分散的に全体の同期を達成する仕組みをモデル化したものである [5]。パルス結合振動子モデルは、集中型の制御なく、近隣の振動子との局所的な相互作用のみによって、大規模な時刻同期を達成する。自律分散型時刻同期機構では、このパルス結合振動子モデルをセンサネットワークに適用し、センサ端末間の相互作用によって同期を確立する。

一方で、自律分散型に対する集中型の制御として、RBS (Reference Broadcast Synchronization) [6, 7] がある。RBS は実時間ではなく、相対的な時間をやりとりすることで高い精度の時刻同期を達成する。まず RBS では、基準ノードが参照パケットを送信し、参照パケットを受信したセンサノードは受信時刻を近隣ノードに知らせる。そして、他ノードの受信時刻の平均と、自らの受信時刻の誤差をもとに時刻同期を図る。既存の時刻同期機構では、MAC (Media Access Control) 層で発生する伝送遅延が、時刻同期の精度に大きな影響を与えるが、RBS では相対的な時刻を時刻同期の要素として用いることで、この影響を受けずにすむ。しかし RBS は、集中型の制御方式であるため、ネットワークの規模の拡張性に欠ける。そこで、RBS を大規模なネットワークに適用できるように拡張したものが、マルチホップ RBS である [6]。マルチホップ RBS では、まずクラスタリングを行い、各クラスタのクラスタヘッドを RBS の基準ノードとする。続いて、RBS によってそれぞれのクラスタ単位で同期し、基準となるクラスタの同期時刻をマルチホップで伝達することで、ネットワーク全体の時刻同期を図る。

これまでの研究では、PCO の基本的な特性や消費電力に関する性能評価はなされているが [8, 9]、他の時刻同期手法との比較は十分に行われていない。また、それらの研究は理想的な条件下の評価にとどまっており、同期の精度や同期に要する時間に大きな影響を与える、遅延やパケット損失などの影響を考慮していない。また、通常のパケット送受信ではなく、非常に短い時間のパルスのやり取りに基づく同期を取り扱っているが、そのための専用の回路を設けることは、コストの観点から現実的ではない。そこで本稿では、IEEE 802.15.4 [10] に基づいたパケット通信を下位層プロトコルとし、その上位層で動作するパケットレベルの PCO を対象として、高精度の同期や、高速の同期を必要としないアプリケーションに対して適用することを考えている。さらに、PCO とマルチホップ RBS に関して、

下位層の影響を考慮したうえで、時刻同期性能を比較する。性能評価指標としては、時刻同期に要する時間や時刻同期の精度、時刻同期状態に達するセンサノードの割合などを採用する。MAC 層の通信プロトコルとして、センサネットワークでの標準プロトコルとして考えられている IEEE 802.15.4 などで用いられる CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を採用する。そして、その上位層における時刻同期機構として、PCO とマルチホップ RBS を実装し、シミュレーション実験によって比較評価を行い、それぞれの方式が適したネットワーク環境を明らかにする。

本稿ではまず、2 章でネットワークモデルや同期の定義について説明する。次に、3 章でパルス結合振動子を用いた時刻同期方式を示し、4 章ではマルチホップ RBS が同期を達成する仕組みを説明する。そして、5 章でシミュレーションによる結果を示し、6 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 対象とするシステム

2.1 ネットワークモデル

センサノードは一定の通信能力を持ち、通信する相手や、距離に応じて通信範囲を変えることはできないものとする。また、全てのセンサノードは同じ機能を持つものとする。センサノードは内部時刻を刻む振動子を装備しており、振動子の周期は全て同じものとする。振動子の内部時刻 $C_i(t)$ を振動回数 $a_i(t)$ 、位相 $b_i(t)$ 、周期 T_i を用いて式 (1) に表す。本稿では全てのセンサノードの振動子の位相を一定の幅の中に収めることを時刻同期と定義する。また、初期状態で各センサノードは時刻同期しておらず、位相はランダムに設定されるものとする。

$$C_i(t) = a_i(t)T_i + b_i(t) \quad (1)$$

センサノードの MAC 層プロトコルとしては、CSMA/CA を採用する。CSMA/CA では、パケットの送信を行う前にキャリアセンスを行い、回線が空いているかどうかを確認する。回線が使用中であった場合、一定時間以上回線が空いていることを確認してからパケットの送信を行う。このような制御を行っても、送信ノード同士が離れており互いの存在を確認できない場合、いわゆる「隠れ端末問題」によるパケットの衝突が発生する。それぞれの衝突したパケットは受信ノードにより棄却される。

本稿で用いる CSMA/CA は、IEEE 802.15.4 [10] を参考にしたものであり、図 1 にそのアルゴリズムを示す。各センサノードは、変数 NB および BE を保持する。 NB は CSMA/CA アルゴリズムがバックオフを試行した回数で、この値はあらかじめ 0 に初期化される。 BE はバックオフ指数で、チャンネルの状態を評価するまでの待ち時間に関連し、この値はあらかじめ $MinBE$ に初期化される。

2.2 同期モデル

現実のネットワークでは、遅延や干渉、パケットの損失によって全てのノードが完全に同期することは難しい。さらに、適用するアプリケーションによって、必要となる同期の精度も異なってくる。そこで本稿では、同期を判定するパラメータとして、また、目標とする同期精度の指標として同期ウィンドウ w を用いる [11]。位相が同期ウィンドウに含まれるセンサノードの集合をグループとし、そのグループ内のセンサノードは互いに同期しているものとみなす。同期ウィンドウは次のような性質をもつ。

- グループ内のセンサノード数が最大となるよう適用範囲

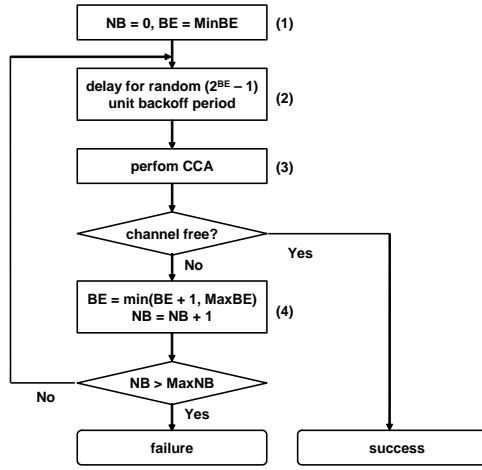


図 1 CSMA/CA アルゴリズム

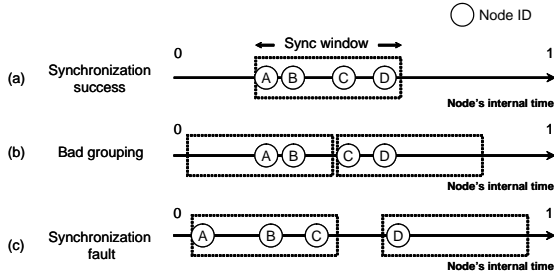


図 2 同期ウィンドウによるネットワーク同期の定義

を設定

- どのセンサノードも必ずいずれかのグループに含まれる同期ウィンドウによるネットワーク同期の定義を図 2 に示す。白い丸はある時刻でのセンサノードの位相の値を表している。図 2(a) のように全てのセンサノードが 1 つのグループに含まれたとき、そのグループは完全同期状態であるとする。このとき、図 2(b) のようなグループ分けを行ってはならない。また、図 2(c) のように同期ウィンドウによって同期を判定した結果、最大グループのノード数を全ノード数で割った値を、ネットワーク内で時刻同期するノードの割合とする。

3. 自律分散型時刻同期機構

3.1 Mirollo and Strogatz model

文献 [5] では、パルス結合振動子モデルをセンサネットワークに適用した時刻同期機構である M&S (Mirollo and Strogatz) モデルが示されている。振動子はそれぞれタイマによって定められた位相 $\phi \in [0, 1]$ と、位相によって定められる状態 $x \in [0, 1]$ に基づいて動作する。

N 個の振動子の集合 $O = \{O_1, \dots, O_N\}$ について考える。振動子は時間の経過と共に変化する位相 ϕ_i 、状態 x_i をもち、 x_i は関数 f_i で与えられる。

$$x_i = f_i(\phi_i) \quad (2)$$

$f_i(0) = 0$ 、 $f_i(1) = 1$ であり、位相 ϕ_i は周期 T_i で 0 から 1 に遷移する。位相が 1 に達したとき振動子は発火し、位相は 0 に戻る。ただし、 $\frac{d\phi_i}{dt} = \frac{1}{T_i}$ である。時刻 τ_i に振動子 j が振動子 i の発火の刺激を受けたとき、 i と j は結合関係にあるといい、振動子 j の状態は ε だけ変化する。

$$x_j(\tau_i^+) = \begin{cases} x_j(\tau_i) + \varepsilon, & \text{if } x_j(\tau_i) + \varepsilon < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

このような刺激を与えあうことにより、時間の経過にもなると互いの振動子が同期するようになる。本稿では、全ての振動子を同じ位相に合わせる完全同期状態を目的としているため、 f_i として次式を用いる [5]。

$$\forall i, f_i(\phi_i) = \frac{1}{b} \ln[1 + (e^b - 1)\phi_i] \quad (4)$$

パラメータ b は、状態遷移関数の強度であり、 b の値が大きいほど早く同期することができる。このとき、関数 f_i の逆関数を g_i とする。

$$\forall i, g_i(x_i) = \phi_i = \frac{e^{bx_i} - 1}{e^b - 1} \quad (5)$$

発火の影響を受けた結果、センサノードの位相が τ_i から τ_i^+ に変位したとき、その変位量 δ_i は次のように表すことができる。

$$\tau_i^+ = g_i(f_i(\tau_i) + \varepsilon) \quad (6)$$

$$\delta_i = \tau_i^+ - \tau_i \quad (7)$$

3.2 遅延を考慮したパルス結合振動子による時刻同期機構

M&S モデルでは遅延を考慮しておらず、近隣のセンサノードの発火の影響を瞬間的に受けることを前提としている。しかし実際には、センサノードが発火してその情報を送信するまでにアクセス遅延が生じるので、その遅延時間 δ を考慮して同期しなければならない。つまり、発火の影響を受けた位相より δ 先立って自身が発火をするように、位相を変化させなければならない。そのためには、どれだけの遅延を経てパケットが届いたかを知る必要がある。

Reachback Firefly Algorithm (RFA) [11] では、MAC 層によるアクセス遅延を伝えるために、タイムスタンプが用いられている。まず、センサノードが発火した時刻を記憶しておき、CSMA/CA により一定時間待った後に回線が空いていることを確認してからデータを送信する。このときに、待ち時間をタイムスタンプとしてデータに含ませることで、送信ノードが発火してから遅延を受信ノードは知ることができる。

タイムスタンプによってアクセス遅延時間を知ることができるが、発火と同時に位相を変化させることはできないので、M&S モデルの必要条件を満たすことはできない。また、発火の影響を受けたと同時に位相を変化させた場合、次のような不具合が生じる。ノード A が発火して、ノード B がその情報を受信するまでの間に発火した場合、ノード B はノード A の発火の影響を反映させることができない。また、時刻 $t_1, t_2 (t_1 < t_2)$ の 2 つの発火の影響を受けるとき、本来変化させるべき位相は $\delta(t_1) + \delta(t_2 + \delta(t_1))$ であるところを、 $\delta(t_1) + \delta(t_2)$ だけ変位させてしまう。これらのことを避けるために、RFA では発火を受けてもすぐに位相を変化させずに、変化量をスタックに積んでおき、自身が発火してから一定時間 W 待った後に、スタックの値を呼び出して位相を変化させる。このときの待ち時間 W は、CSMA/CA のバックオフ時間よりも長くなければならない。

RFA によって、MAC 層のアクセス遅延が PCO の同期精度に与える影響を取り除くことができる。しかし、同期にかかる時間はアクセス遅延によるところが大きい。1 回の通信にかかるバックオフ時間が長ければ、全体の動作時間も長くなる。発火の周期 T を小さくすることで、短時間に多くの相互作用をもたらすことができるが、 T はアクセス遅延よりも十分に大きくなければ RFA は成り立たない。同期するまでにセンサノード間で多くのやり取りが必要なためにアクセス遅延が積み重なり、時間がかかることが PCO の問題点である。

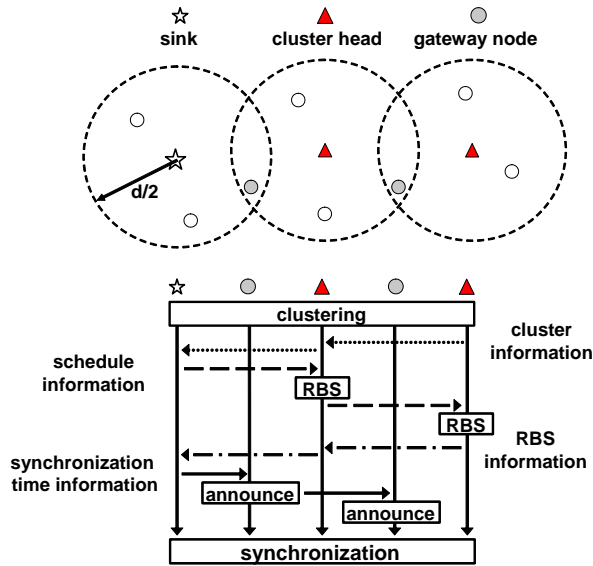


図3 マルチホップRBS

4. 集中型時刻同期機構

4.1 RBS

RBS [6] は、タイムスタンプを用いない時刻同期手法である。RBSの特徴は、送信者と受信者の時刻を合わせるのではなく、受信者同士の時刻を合わせようとしている点にある。まず、基準ノードと呼ばれるあるセンサノードからタイムスタンプを含まない参照パケットが送信される。参照パケットを受信したノードは、パケット到着時刻を参照時刻として周辺のセンサノードとの時刻比較に用いる。RBSのアルゴリズムを以下に示す。

- step1. 基準ノードは参照パケットを送信する。
- step2. 参照パケットを受信した n 個のセンサノードはそれぞれ受信した時刻を記憶する。
- step3. センサノードは参照パケットを受信した他のセンサノードと受信時刻を交換する。
- step4. 交換した受信時刻と自らの受信時刻との誤差の平均時間 $\text{Offset}[i]$ を計算する。

ただし、 n は参照パケットを受信するセンサノードの数であり、 T_r は参照パケットをセンサノード r が受信した時刻である。 $\text{Offset}[i]$ は式 (8) で与えられる。

$$\text{Offset}[i] = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T_i - T_k) \quad \forall i \in n \quad (8)$$

RBSの最大の長所は、同期の精度がアクセス遅延の影響を受けないことにある。参照パケットを受信したノード間の参照時刻の誤差は、パケットが送信されて受信されるまでの誤差であるので、パケットが送信されるまでの経過時間であるアクセス遅延は無視することができる。

4.2 マルチホップRBS

RBSが対応しているのは、基準ノードの通信範囲内に全てのセンサノードが配置されている場合である。しかし、センサノードの通信距離よりも広範囲にわたるネットワークでは、単純にRBSを適用することができない。そこで、ネットワーク全体をクラスタに分割し、クラスタごとにRBSを適用して、複数のクラスタに属するゲートウェイノードと呼ばれるセンサ

表1 シミュレーションにおけるパラメータ設定値

パラメータ	デフォルト値
センサノード数	200
観測領域半径	100 m
センサノードの通信距離	50 m
パケット損失率	0.001
同期ウィンドウサイズ	0.1
位相変位幅 ϵ (PCO)	0.0008
状態遷移関数の強度 b (PCO)	5
発火周期 T (PCO)	0.16 sec
最大シミュレーション時間 (PCO)	100 sec

ノードが、クラスタ間の相対的な時刻を通知するようなかたちで、マルチホップに同期時刻情報をネットワーク全体に伝達していく手法がマルチホップRBSである。

マルチホップRBSによってネットワーク全体の時刻同期を達成するためには、全てのクラスタがゲートウェイノードを介して連結していなければならない。また、クラスタ数が大きくなれば、クラスタ間での通信回数が多くなり、ネットワーク全体の同期にかかる時間が大きくなってしまふ。したがって、必要最小限のクラスタ数でクラスタリングが実現されることが望ましい。そこで本稿では、既存のクラスタリング手法のうち、マルチホップRBSに適したクラスタリング手法として、LIDCA (Lowest ID Clustering Algorithm) [12] を用いる。LIDCAではセンサノードがネットワーク全体の情報を知ることなしに、簡単な方法でクラスタリングを行うことができる。

マルチホップRBSの基本的な動作を、図3に示す簡単なネットワークとフローチャートで説明する。マルチホップRBSでは、時刻同期の中心となるシンクと呼ばれるセンサノードが、ネットワーク全体の動作を制御する。まずシンクは、各クラスタの情報を収集しネットワーク全体の木構造を構築する。隣接するクラスタ同士が同時にRBSを実行すると、干渉が発生してしまうため、シンクはクラスタリングの状況に応じて、干渉が発生しないようなRBSの実行スケジュールを決定し、それをクラスタヘッドにマルチホップで送信する。スケジュール情報を受け取ったクラスタヘッドは、自身のクラスタ内でRBSを実行し、クラスタ内の全てのセンサノードの同期が取れていることを確認すると、シンクに対してRBSが完了したことを伝える。シンクは全てのクラスタでRBSが完了したことを確認すると、ネットワーク全体の時刻をシンクが属するクラスタの同期時刻に合わせるべく、同期時刻情報をクラスタ内にブロードキャストする。同期時刻情報を受け取ったゲートウェイノードは、クラスタ間の同期時刻の誤差を計算し、クラスタ内の他のセンサノードに同期時刻を伝えると共に、次のクラスタへと同期時刻情報を伝播していく。こうして、ネットワーク全体に時刻同期情報が行き渡り、全てのセンサノードが同期を果たすことになる。マルチホップRBSでは、1つのパケットが持つ役割は大きく、パケット損失による情報の欠落の影響が大きいと考えられるので、ACKを用いた確実な通信方法によってデータ交換を行う。

5. シミュレーションによる評価

5.1 シミュレーションモデルおよび性能尺度

本稿では、CSMA/CAの上位層として動作するシミュレーションプログラムを、PCOとマルチホップRBSのそれぞれに作成し、性能比較を行う。観測領域は円形とし、その領域内に

センサノードを配置する．シミュレーションにおけるそれぞれのパラメータを，表 1 のように設定し，特に断りがない場合は，この値を使用する．PCO の周期を 10000 シンボル (0.16 秒)，最大シミュレーション時間を 100 秒とする．本稿では，時刻同期するセンサノードの割合，ネットワーク全体が時刻同期する確率，時刻同期を確立するまでの時間，時刻同期の精度を評価指標として比較を行う．

PCO では，完全同期状態に達したネットワークが不安定であるために，同期の流れとは反する刺激を与え合い，完全同期状態が崩れてしまうことがある．そこで本稿では，PCO が 5 周期連続して完全同期状態を保持したとき，マルチホップ RBS では，全てのクラスタにクラスタ間同期時刻が行き渡った時点で，ネットワークが完全同期状態にあるとき，ネットワークが同期を確立したとみなす．また，それまでにかかる時間を，ネットワーク全体が時刻同期を確立するまでの時間とする．マルチホップ RBS と PCO いずれにおいても，同期条件を満たさなかったときは，この時間に含まれない．また，センサノードの位相の分散を時刻同期の精度とする．分散の値が小さいほど，正確な時刻同期ができたとみなす．本稿では，同期ウィンドウに含まれるセンサノード数が最大のグループの位相平均を分散の基準値とする．センサノード数を n ，位相を x_i ，最大グループの位相平均を \bar{x} ，位相平均との位相誤差を e_i としたとき，分散値 v は次の式によって与えられる．

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (9)$$

$$e_i = \begin{cases} \bar{x} - x_i, & |\bar{x} - x_i| < 0.5 \\ 1 - |\bar{x} - x_i|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

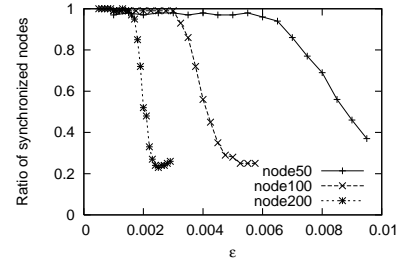
本章ではまず，ここで述べたシミュレーションモデルにおいて，PCO の動作を決定づける重要な制御パラメータである ε について考察する．次に，ネットワークの規模に対する拡張性と，パケット損失に対するロバスト性の観点から，2 つの同期手法を比較評価する．

5.2 ネットワークに応じた PCO の状態変位幅 ε の設定

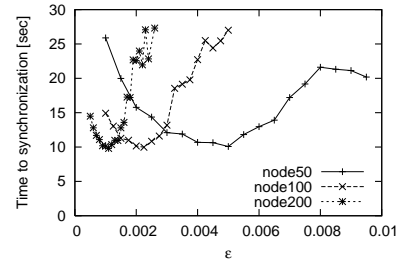
PCO の同期に影響を与える制御パラメータとして，発火の影響を受けた際の変位幅 ε がある． ε を適切に設定しなければ，PCO は同期を達成することができない．図 4 に，ノード数に応じて ε の値を変化させたときの様子を示す． ε が小さければ，センサノードは互いに少しずつ刺激を与え合い，同期状態へと近づいていくため，同期する確率は高くなるが，センサノード間の結びつきが弱いネットワークでは同期を確立するまでの時間が長くなる．また， ε が大きすぎたとき，発火周期内にセンサノードが受ける刺激の量が過剰になってしまい，ネットワーク全体が安定した状態に収束しないので，同期する確率は著しく低下してしまう．すなわち， ε には同期に到達する確率と，時間の観点から最適な値が存在すると考えられる． ε の最適値を決定する要因は，センサノードと連結しているセンサノード数であるが，これにはネットワークの全ノード数だけではなく，観測領域の広さも影響を与えると思われる．さらに，センサノードの配置が一様ではない場合には，連結しているセンサノード数のばらつきやネットワークのトポロジの影響も考慮する必要がある．このように ε の最適値を求めることは単純ではないので，今後の課題とする．

5.3 ネットワークの規模に対する拡張性

図 5 に，ネットワークの規模がそれぞれの同期手法に与える



(a) 時刻同期するセンサノードの割合



(b) 時刻同期を確立するまでの時間

図 4 ε が PCO に与える影響

影響を示す．センサノードの配置密度が密な環境において，マルチホップ RBS は高精度な同期を短時間に確立できることが，図 5(b), 5(c) から分かる．しかし，センサノードの配置密度が疎になるにつれてマルチホップ RBS は，著しく同期の精度を低下させている．一方で PCO は，時刻同期を確立するまでの時間は長くなるものの，安定した性能を示している．これは，センサノードの通信距離 d で RBS を行うとき，クラスタ内の両端のセンサノード間で通信を行う必要があることから，クラスタの半径が， $d/2$ に制限されてしまい，1 ノードあたりのリンクするノード数が，PCO に比べて小さくなってしまいうからである．このように，PCO とマルチホップ RBS が性能を発揮する環境は異なっており，適用されるアプリケーションやネットワーク環境に応じて，それぞれの手法を使い分けることが望まれる．

5.4 パケット損失に対するロバスト性

図 6 に，パケット損失がそれぞれの同期手法に与える影響を示す．5.3 節で述べたように，PCO とマルチホップ RBS は，性能を十分に出すことができる環境が異なるため，ここではセンサノードの通信距離を，PCO が 50m，マルチホップ RBS が 100m に設定して比較を行う．図 6(a) より，どちらの手法もパケット損失が頻発する不安定な環境でも，ほぼ全てのセンサノードを同期させることができている．これはパケット損失に対して，マルチホップ RBS では再送を行っているためであり，PCO では繰り返し刺激を与え合うことで，パケット損失の影響を補っているためである．しかし，マルチホップ RBS では，多くのセンサノードを同期させることはできるものの，パケットロスによって生じたクラスタ内での同期誤差が，マルチホップ通信によりクラスタ間を伝播することで大きくなり，全てのセンサノードが確実に時刻同期することは難しい (図 6(b))．この影響は図 6(c) から時刻同期の精度にも見られる．また，マルチホップ RBS は通信距離を PCO の 2 倍に設定しているため，

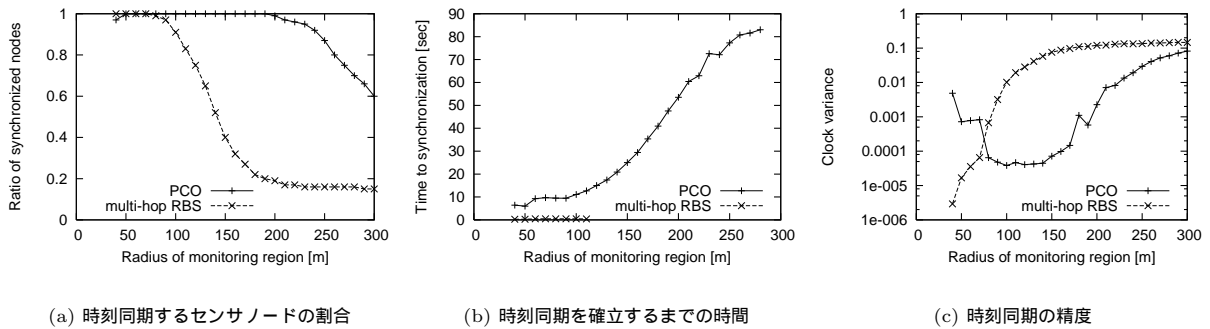


図 5 観測領域の半径を変化させたときの比較

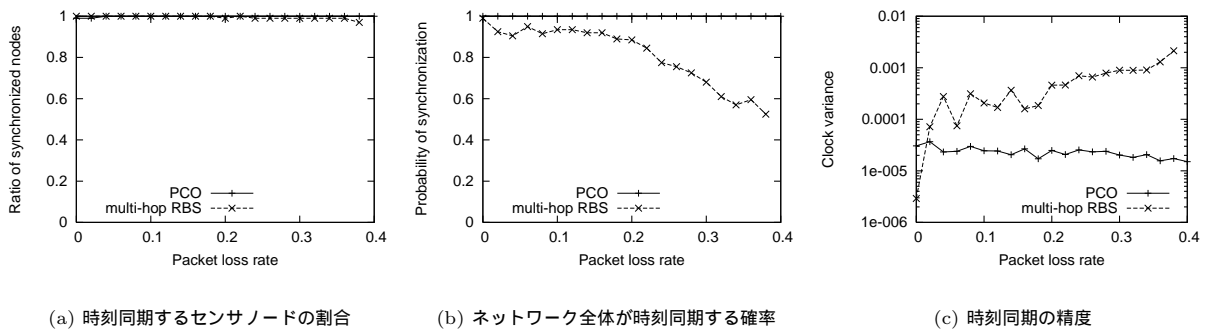


図 6 パケット損失が時刻同期に与える影響

より多くの電力消費を伴う。このことから、不安定な通信環境においても完全な時刻同期が求められるようなネットワークにおいては、PCO が有効であるといえる。

6. まとめ

本稿では、CSMA/CA による遅延を考慮したセンサネットワークにおいて、マルチホップ RBS と PCO 二つの時刻同期手法を、スケーラビリティとパケット損失に対するロバスト性の観点から比較評価した。その結果、自律分散型の同期手法である PCO は、集中型の同期手法であるマルチホップ RBS に対して、無線通信品質によらない安定度の高い時刻同期を、広範囲の観測領域にわたって実現できることを示した。一方でマルチホップ RBS は、センサノードの配置密度が高く確実な通信環境において、高精度の時刻同期を短時間に確立できることを示した。今後の課題としては、ネットワーク環境に応じた PCO の ε の設定アルゴリズムや、マルチホップ RBS に適したクラスタリング手法の検討などが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(A)16200003、および基盤研究(C)19500060 によっている。ここに記して謝意を表す。

文献

- [1] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci: "Wireless sensor networks: A survey", *Computer Networks*, **38**, pp. 393–422 (2002).
- [2] F. Sivrikaya and B. Yener: "Time synchronization in sensor networks: A survey", *IEEE Network Magazine's special issue on Ad Hoc Networking: Data Communications and Topology Control*, **18**, 4, pp. 45–50 (2004).
- [3] N. Wakamiya and M. Murata: "Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks", *IEICE Transactions on Communications*, **E88-B**, pp. 873–881 (2005).
- [4] D. L. Mills: "Internet time synchronization: The network time protocol", *IEEE Transaction on Communications*, **29**, pp. 1482–1493 (1991).
- [5] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz: "Synchronization of pulse-coupled biological oscillators", *Journal on Applied Mathematics*, **50**, 6, pp. 1645–1662 (1990).
- [6] J. Elson, L. Girod and D. Estrin: "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts", *Proceedings of Operational Systems and Design Implementation (OSDI)*, Vol. 36, pp. 147–163 (2002).
- [7] J. Elson, R. Karp, C. Papadimitriou and S. Shenker: "Global synchronization in sensor networks", *Proceedings of the 6th Latin American Symposium on Theoretical Informatics (LATIN'04)*, pp. 609–624 (2004).
- [8] Y. W. Hong and A. Scaglione: "A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **23**, 5, pp. 1085–1099 (2005).
- [9] S. F. Bush: "Low-energy sensor network time synchronization as an emergent property", *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 93–98 (2005).
- [10] "IEEE Standards 802 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)", IEEE Inc. (2003).
- [11] G. Werner-Allen, G. Tewari, A. Patel, M. Welsh and R. Nagpal: "Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects", *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '05)*, pp. 142–153 (2005).
- [12] A. Ephremides: "A design concept for reliable mobile radio networks with frequency-hopping signaling", *Proceedings the IEEE*, Vol. 75, pp. 56–73 (1987).