

1 はじめに

センサネットワーク全体の時刻同期は、省電力トポロジの構築、現象の位置、速度の検出等に利用でき、重要な研究課題の一つである。時刻同期の手法として、センサノード(以下、単にノードとよぶ)に GPS を搭載する方法[1]が提案されているが、同期精度が向上される一方で、モジュール単価や消費電力の増大、設置場所に制限を受ける。また、NTP (Network Time Protocol) のような Pull 型の時刻同期手法では、双方向通信によって同期を行うため、単方向通信による時刻同期に比べ通信コストが高く、シンクノードの常時接続も必要となる。上記を考慮し、ネットワーク上に、自律的に選出したタイムマスタノード(TM)に全てのノードを同期させるプロトコル FTSP[2]が提案されている。FTSP は頑健かつ μ 秒オーダーでの時刻同期を達成している。しかし、通信にフラッディングを基本とした通信プロトコルであり、通信コストの面で問題が残る。一方、無線アドホックネットワークでは、効率的な経路確立を目的に、マルチキャストツリーを用いてフラッディングを行う OLSR プロトコル[3]がある。しかし、OLSR マルチキャストツリーの構築が煩雑である。

本稿では、簡便にマルチキャストツリーを構築し、それを用いて全ノードの時刻同期を図る手法を提案する。まず、TM を自動選出した後、TM を根としたマルチキャストツリーを構築し、それを利用して全ノードの時刻同期を行う。これにより、通信コストの低減が図れる。TM が消失した場合には、現在の木構造を出来るだけ保持するように、TM の隣接ノード群の中から新たな TM の再選出を行い、迅速に相互の再同期を図る。2 章以後、提案手法の詳細を述べ、シミュレーションによる実験結果を示す。

2 提案手法

提案手法では、MAC 層にコンテンションベース方式を用いたセンサモジュールを想定する。図 1 に時刻修正の手法を示す。これは、FTSP[2]と同一手法である。複数の時刻において、自身の上位ノードからのグローバル時刻を受信し、その時点のローカル時刻と共に、データポイントとしてそれらを保持する。複数のデータポイントが得られた後に、直線回帰によるオフセットおよびクロック・ドリフトの推定を行い、自身の時刻を修正する。MAC 層でのタイムスタンプによる単方向時刻同期であり、2 点間において μ 秒オーダーの時刻同期が見込める。

図 2 に時刻同期のためのマルチキャストツリーの一例を示す。各ノードは周期 T 毎に送信を行い、単一の TM へと全体の同期を図る。ネットワーク上に TM が存在しない場合、TM の立候補と、選出が自律的に行われ、ネットワークに唯一の TM を決定する。その通信過程に並行して、TM を根としたマルチキャストツリーの構築を行う。

周期的な送信の際に、マルチキャストツリー上をフラッディングさせて前述のデータポイントの取得をする。マルチキャストツリーを用いることによって、フラッディング時の通信路の輻輳や衝突の回避と、通信コストの低減を図る。

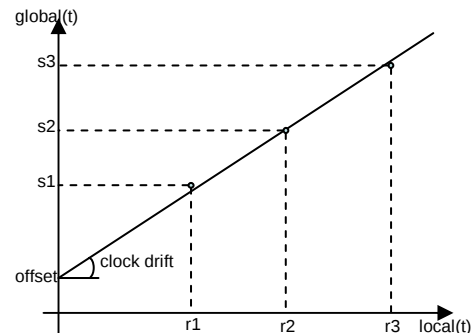


図 1 直線回帰による時刻修正

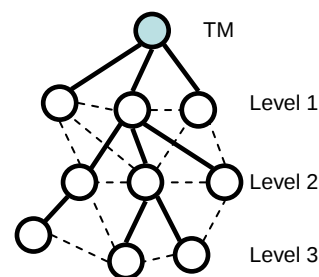


図 2 TM を根としたマルチキャストツリー作成例

ID	: パケット送信元のID
IDroot	: 現在所属しているTMのID
IDprev	: 一つ前に所属していたTMのID
IDparent	: 自身のマルチキャストツリー上の親ID
L	: 現在のTMからのホップ数
G	: TMが変更された回数
Ctotal	: 下位の隣接ノードの総数
Cadopt	: 現在自身に所属しているノードの総数

図 3 パケットに搭載する制御用情報

周期的な送信パケットには、図 3 の制御用情報を搭載する。G の値は、存在していた TM が消失し、次の TM が立候補した際に 1 加算される。絶対時刻保持端末は 0 で初期化され、その他の端末では、変数 G が取り得る最大の値に初期化される。Ctotal は、L が 1 だけ大きい隣接ノードの総数(子供の総数)である。また、Cadopt は、IDparent として自身の ID を搭載しているノードの総数である。すなわち、Cadopt は現在のマルチキャストツリートポロジにおいて自身とリンクを持っている子供の数であり、 $Cadopt \leq Ctotal$ である。

2.1 TM の決定

各ノードの初期状態や、既存の TM の消失を確認した隣接ノードは、自身を TM として立候補する。特に既存の TM が消失した場合、TM から送信されるパケットを一定時間受信しなかった TM の隣接ノードは、TM が消失したとみなし、G を 1 増加させた上で、自身を TM とする。これにより、TM の隣接ノード全てがそれぞれ新たな TM 候補として送信を始めるが、それらの中からまた唯一の TM へと収束する。パケットを受信した際には、図 4 の処理により自身の所属する TM を判断し、TM の所属変更を行う。所属変更の際に L の値を送信側の L より 1 大きい値に変える。

*Autonomous Local-time Synchronization Method for Wireless Sensor Networks

†Katsumi Onodera, ††Ryouhei Kawano, ††Toshiaki Miyazaki

†Graduate School of Information Systems, The University of Aizu

†† School of Computer Science and Engineering, The University of Aizu

```

TM_selection(){
  if (パケットのIDprev == 自身のIDroot)
    送信側のTMに所属変更;
  else if (パケットのG < 自身のG)
    送信側のTMに所属変更;
  else if (パケットのIDroot < 自身のIDroot)
    送信側のTMに所属変更;
  else if (パケットのIDroot == 自身のIDroot &&
    パケットのL < 自身のL)
    送信ノードの下位ノードに所属変更;
  else
    自身の所属を変更しない;
  end if
}

```

図4 TM選出アルゴリズム

2.2 マルチキャストツリーの生成

時刻同期の際に TM からのグローバル時間が配布されるが、フラッディングによる一時的な通信量の増加が発生するため、輻輳やパケットの衝突が発生し時刻同期の精度に影響を及ぼす。ここでは、マルチキャストツリーを作成し、その葉に該当するノードは、そこでフラッディングを終了することにより通信路の輻輳回避を行う。最良の親は、隣接ノードリストに存在するLが自身のLより小さい値のノードから、送信前に図5の処理により決定する。図6が全体の動作を表す擬似コードとなる。

```

Node_selection(){
  隣接リストから自身よりLが小さいノードを選出;
  その中でCtotalが最大のノードを選出;
  その中でCadoptが最大のノードを選出;
  その中でIDが最大のノードを親に決定;
  if (親が決定していない)
    自身をTMとする;
  end if
}

```

図5 送信前の親ノードの決定処理

```

Make_MT(){
  int timer=0;
  while(ノードが生存)
    if(パケットを受信した) TM_selection();
    end if
    if(TMノードが存在しない)
      自身がTMとなる;
    end if
    if(timer >= 周期T)
      timer=0; Node_selection();
    end if
    timer++;
  end while
}

```

図6 マルチキャストツリー生成のための提案プロトコル

3 実験結果

FTSP [2]で使用されているフラッディングによる時刻同期手法と、提案手法で使用されているマルチキャストツリーで、時刻同期時のパケット衝突の可能性をシミュレーションにより比較した。図7は、シミュレータ上で構築されたマルチキャストツリーの一例である。左下のTMから、木構造が構築されていることがわかる。図8は、トポロジ制御を考慮せずにフラッディングによって一度にパケットを受ける可能性があるノード数と、提案手法で構築されるマルチキャストツリーによるフラッディングによって一度にパケットを受ける可能性があるノード数と、提案手法によって削減されるフラッディングパケットの割合である。図からわかるように、トポ

ロジを考慮せずにフラッディングを行った場合、ネットワークのノードの密度が大きくなると親ノード数が線形に大きくなるのに対し、マルチキャストツリーを用いた場合には、親ノード数が対数関数的な増加に止まり、各ノードが、同時にパケットを受ける可能性が大幅に減っている。また、フラッディングに用いられるパケット数も大幅に削減されている。

4 まとめ

本稿では、センサネットワークにおいて、動的に構築したマルチキャストツリー構造を用いて、時刻同期を図る手法を提案した。シミュレーションにより、過去に提案されている同種の方法に比べ、通信路の混雑を軽減し、かつネットワーク全体の消費電力量の低減を図れることがわかった。今後は、実環境での実証実験を行い、プロトコルの詳細評価を行う。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成金(課題番号:18500060)およびテレコム先端技術研究支援センター(SCAT)研究助成金による。

参考文献

- [1] Dai, H. and Han, R, "Tsync: A lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks," ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Vol. 8, No. 1, pp.125-139, 1994
- [2] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon and A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol," Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2004
- [3] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC 3626, IETF Network Working Group, 2003

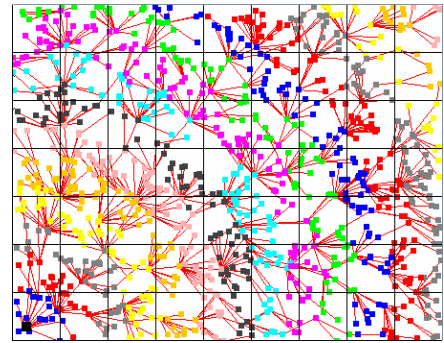


図7 マルチキャストツリー例

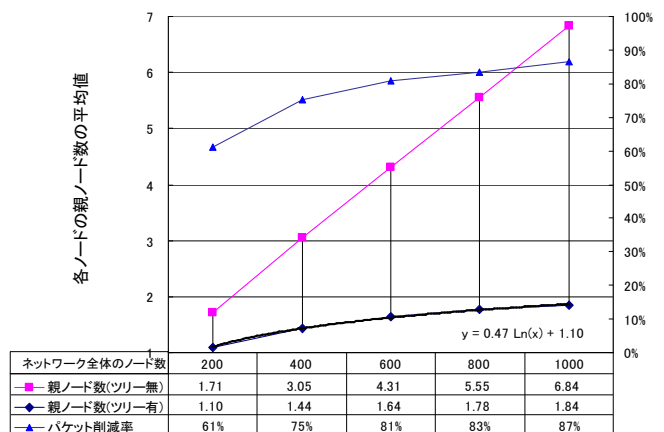


図8 マルチキャストツリーを用いない場合と用いた場合の比較。隣接ノード（親ノード）の平均値と、両者のフラッディングパケット削減率