

共通イベント観測に基づくセンサノード群の時計合わせ手法

荒尾 彩子^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要: 無線センサネットワークでは、各無線センサノードが自身の観測領域内で発生したイベントをその観測時刻とともに記録する。各無線センサノードにはそれぞれの内部時計があり、そのドリフトとオフセットは必ずしも一致していない。無線センサノード対が保持する内部時計のドリフトとオフセットの推定には同期メッセージによる時刻情報の交換による手法が提案されているが、無線 LAN の衝突回避機構のために同期メッセージの配送遅延の推定に含まれる誤差が大きく、無線センサネットワークにおける適用は困難である。本論文では、同期メッセージの交換を必要としない手法として、各無線センサノードのイベント観測ログに基づいて隣接無線センサノード間の共通観測イベントを推定し、最大数の推定共通観測イベントが得られる相対ドリフトと相対オフセットを推定値とする隣接無線センサノード間の相対ドリフト、相対オフセット取得手法を提案する。さらに、複数の無線センサノードからなる無線センサネットワーク全体の時計合わせ手法として、基準無線センサノードに対する各無線センサノードの相対ドリフトと相対オフセットを推定する手法を提案する。ここでは、無線センサノードをノード、相対ドリフトと相対オフセットを推定する隣接無線センサノード間の接続をリンクとする時計合わせグラフを構成する。隣接無線センサノード間の相対ドリフトと相対オフセットの推定の信頼性が推定共通観測イベント数に対して単調増加することに注目し、無線センサネットワーク全体の相対ドリフトと相対オフセットの推定の信頼性を最大にするための時計合わせグラフ構成手法を示す。

キーワード: 無線センサネットワーク, 時計 (ローカルクロック), 同期, イベント観測, スパニングツリー。

Clock Synchronization among Wireless Sensor Nodes based on Estimation of Commonly Observed Events

AYAKO ARAO^{1,a)} HIROAKI HIGAKI^{1,b)}

Abstract: In wireless sensor networks, each wireless sensor node records all events occurred within its observation area with their observation times. Each wireless sensor node possesses its own local clock whose drift and offset are different each other. Until now, various clock synchronization methods have been proposed by exchanging synchronization messages carrying current local clock values. However, it is difficult to realize precise clock synchronization due to unpredictable transmission delay of the synchronization messages. Hence, this paper proposes novel clock synchronization method without synchronization message exchanges. Here, by using event observation logs of neighbor wireless sensor nodes, commonly observed events are estimated and the relative drift and offset providing the maximum number of commonly observed events are adopted to clock synchronization between the neighbor wireless sensor nodes. In addition, this paper proposes a method for clock synchronization among local clocks of all the wireless sensor nodes. Here, a local clock of one of the wireless sensor nodes is selected as the reference local clock and all the other local clocks are synchronized with it by estimation of relative drifts and offsets. To reduce the synchronization error in the estimation, an algorithm to configure a clock synchronization graph whose root is the reference local clock and whose links represent connections between wireless sensor nodes where the proposed clock synchronization method between neighbor wireless sensor nodes are applied is proposed.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Local Clocks, Synchronization, Event Observation, Spanning Tree.

1. はじめに

無線通信機能を備えた無線センサノードによって構成されるセンサネットワークの研究開発が活発に行なわれている。無線センサノードには、時計（ローカルクロック）があり、センサによるイベント観測時にはその観測時刻が取得、記録される。しかし、自律分散的に動作する無線センサノードが保持する時計の値を完全に一致させることは難しい [3]。これは、各無線センサノードの個体差、とりわけ時計の主要要素である水晶発振器の個体差によるものであり、各時計における一定時間における時計の値の増分は異なることを前提とすることが必要である [6]。また、水晶発振器の発振周期は気温の影響を受けることから、季節変化による気温変動に合わせて時計合わせを行なうことが求められる。本論文では、無線センサノード S_i の時刻 t における時計の値 $C_i(t)$ は、そのドリフト dt_i/dt とオフセット O_i を用いて、 $C_i(t) = (dt_i/dt)t + O_i$ で与えられるものと仮定する [7]。ドリフトとオフセットが無線センサノードごとに異なることから、一定間隔を置いて時計 $C_i(t)$ 、 $C_j(t)$ 間の誤差 $|C_i(t) - C_j(t)|$ を縮小すること、記録されたイベント観測時刻を修正することが求められる。GPS や電波時計などの外部からの現在時刻情報を導入しない、あるいはできない環境においては、複数の無線センサノード間の相対的なドリフトと相対的なオフセットを推定する。しかし、無線センサネットワークでは、CSMA/CA や RTS/CTS といった無線信号の衝突回避手法が機能しており、制御メッセージの配送遅延のゆらぎが大きいために、配送遅延の推定に基づく時計間の相対ドリフト、相対オフセットの推定が困難である。そこで本論文では、観測領域が重複する複数の隣接無線センサノードは、その重複領域で発生したイベントを同時刻に観測することに注目し、観測記録を用いて隣接センサノードが共通に観測したイベントを推定し、これに基づいてこれらの時計の間の相対的なドリフト、オフセットの推定を行う手法を提案する。また、この隣接無線センサノード間の相対ドリフトと相対オフセットの推定手法を用いて、無線センサネットワークを構成する複数の無線センサノードにおける時計合わせ手法を提案する。ここでは、隣接無線センサノード間の推定相対ドリフトと推定相対オフセットの信頼性がこれらの共通観測イベント数によって定まることに注目し、無線センサネットワーク全体として信頼性を最大とする時計合わせを実現することを目的とする。

2. 関連研究

ネットワークによる通信が可能な複数のコンピュータに搭載された時計を合わせる「分散時計合わせ問題」は古くから議論されている。この問題に対するアプローチの基礎は、論文 [1] のクリスチャンのアルゴリズムにある。ここでは、2つのコンピュータの間で時刻要求制御メッセージと時刻応答制御メッセージが交換され、この制御メッセージには各送信コンピュータ自身の現在の時計の値が記録されている。しかし、時刻応答制御メッセージに含まれる時計の値が取得された時点における自身の時計の値を正確には知ることができないため、このメッセージの配送遅延を推定することが必要となる。ところが、この制御メッセージが送信された時点における自身の時計の値も得ることができない。そこで、時刻要求制御メッセージを送信した時点における自身の時計の値を用いて配送遅延を推定することが行なわれている。このように、時計の値を含んだ制御メッセージを交換する手法では、制御メッセージの配送遅延推定が時計合わせの精度に大きな影響を与える。

TSPN[5]、RBS[2]、FTSP[4] はいずれも無線センサネットワークを対象とした時計合わせプロトコルである。TSPN は、隣接するふたつの無線センサノード間での現在時刻情報の交換を基礎とする手法である。これに対し、RBS はリーダ無線センサノードの隣接無線センサノード間で現在時刻情報を交換する手法、FTSP は現在時刻情報のフラッディング広告を基礎とする手法となっている。しかし、無線マルチホップ通信を行なうセンサネットワークでは、隣接無線センサノード S_i と S_j との間で交換される制御メッセージの配送遅延は予測困難である。これは、 S_i や S_j の隣接無線センサノードが制御メッセージの送受信を行なうこと、あるいはこれらが無線マルチホップ配送経路を転送されるセンサデータメッセージの送受信を行なうことによるものである。そのため、無線センサネットワークでは制御メッセージの交換によってセンサノード間の相対ドリフト、相対オフセットを推定することは以下に示す理由により困難であるといえる。

まず、現在時刻情報を含んだ制御メッセージが S_i から S_j へと送られる場合、無線 LAN プロトコルの CSMA/CA による衝突回避により、 S_i はランダムバックオフで与えられた時間だけ待機してから制御メッセージを送信する。 S_i の待機時間中に S_i のいずれかの隣接無線センサノードのバックオフタイマが切れた場合には、そのメッセージ送信が完了するまでの時間は S_i のバックオフタイマは一時停止される。これによって、 S_i から S_j への制御メッセージ配送遅延のゆらぎが拡大する。さらに、無線マルチホップ配送経路の中継無線ノード S が S_i または S_j の通信範囲内に含まれる場合には、隠れ端末問題による無線信号の衝

¹ 東京電機大学大学院 未来科学研究科 ロボット・メカトロニクス専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

a) arao@higlab.net
b) hig@higlab.net

突を回避するために RTS/CTS 制御が用いられる。これによって、 S が前ホップ隣接無線ノードから転送されるデータメッセージを受信している時間中と S が次ホップ隣接無線ノードへと転送するデータメッセージを送信している時間中には、 S_i から S_j への制御メッセージ配送は待機される。つまり、センサデータの無線マルチホップ配送によっても時刻情報を含んだ制御メッセージの配送遅延のゆらぎが拡大される。これは、無線マルチホップ配送性能がその性能に大きな影響を及ぼす無線センサネットワークにおいては無線信号の衝突回避が重要な問題であるため、解決が困難な問題である。しかし、現在時刻情報を隣接無線センサノード間で交換する従来手法では解決困難な問題は、現在時刻情報を交換しないことによって解決できる可能性がある。

本論文では、隣接する複数のセンサノードが同一のイベントを同時に観測する可能性がある点に注目し、隣接無線センサノードの時計の間の相対的なドリフトと相対的なオフセットを推定する手法を提案する。さらに、無線センサネットワークを構成する無線センサノードの時計合わせを実現するとともに、各無線センサノードによる観測記録におけるイベント観測時刻を修正する。これによって、必ずしも各無線センサノードの時計のドリフトとオフセットが同一ではない無線センサネットワークによって観測されたイベントの正しい発生順序、発生間隔などを得ることができる。

3. 提案手法

3.1 共通観測イベント

各無線センサノードには、その観測領域内のイベントの発生を検知するセンサとその通信範囲内に位置する隣接無線センサノードとの無線通信を行なう無線通信モジュールが搭載されている。観測領域内で発生したイベントを検知した無線センサノード S_i は、イベント種別と関連パラメータをイベント観測時刻 t における時計の値 $C_i(t)$ とともに記録する。本論文では、発生したイベントは直ちに観測されることを前提とし、イベント発生時刻とこれを観測することが可能なすべての無線センサノードによるイベント観測時刻は等しいものとする。また、本論文では、イベント種類は単一であることと簡素化して議論する^{*1}。したがって、各無線センサノード S_i では、イベント観測記録に基づいてイベント観測時刻列 $ESeq_i := |C_i(t_0), C_i(t_1), \dots, C_i(t_{N_i})|$ を構成することができる。 $C_i(t_j)$ は、時刻 t_j に S_i の観測領域内で発生したイベント $e_i(t_j)$ を S_i に搭載されたセンサが観測した時点における S_i に搭載された時計の値である。

また、各無線センサノード S_i は、その通信範囲内に位置する隣接無線センサノードとの無線通信を行なうことがで

きる。したがって、隣接無線センサノードとイベント観測時刻列 $ESeq_i$ を互いに交換することが可能である。各無線センサノードにおいては、搭載された無線通信モジュールの通信範囲がセンサの観測領域を包含するのが一般的である。無線センサネットワークでは、複数の無線センサノードを配置し、観測対象領域全体をいずれかの無線センサノードに搭載されたセンサの観測領域で被覆することによって、観測対象領域で発生したすべてのイベントを記録する。これを実現するためには、隣接無線センサノード間で観測領域が重複することは避けられない。

一般に、図 1 に示すように、各無線センサノードの観測領域は各方向について一定の距離以下となるが、その距離は方向によって異なる。特に、観測の障害となる遮蔽物が存在する場合には、遮蔽物よりも遠方を観測することはできない。また、先に述べたように観測対象領域の被覆が求められる場合が多いことから、隣接無線センサノード間の観測領域は重複するのが一般的である。このとき、この重複領域で発生したイベントは、 S_i と S_j のいずれによっても観測され、観測時刻におけるそれぞれの時計の値とともに記録される。本論文では、このようなイベントを共通観測イベント、それ以外のイベントを単独観測イベントとよぶ。

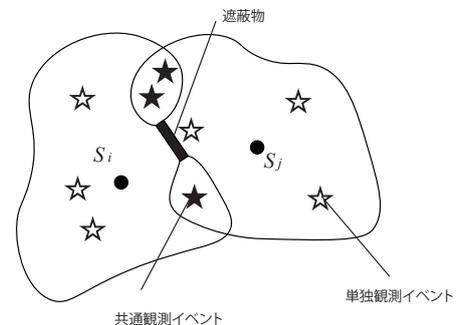


図 1 共通観測イベント。

各無線センサノード S_i は、その観測領域 OA_i で発生したイベントを搭載されたセンサで観測するが、そのイベントが観測領域内で発生したことをのみを検知することが可能であり、観測領域内の発生位置を特定することはできない。そのため、観測したイベントが隣接無線センサノード S_j との共通観測イベントであるか、 S_i の S_j に対する単独観測イベントであるかを知ることはできない。各無線センサノードで観測されたイベントはその観測時刻 t における時計の値とともに記録されるが、 t における各無線センサノード S_i, S_j の時計の値 $C_i(t), C_j(t)$ は一般的に異なっており、記録された観測時刻から単純に S_i と S_j の共通観測イベントを特定することはできない。

^{*1} イベント種別を考慮することによって、より時計誤差を縮小した時計合わせを実現することができる。

3.2 相対オフセット推定

この共通観測イベントを用いて、隣接無線センサノード S_i と S_j の時計が $C_i(t) = (dt_i/dt)t + O_i$, $C_j(t) = (dt_j/dt)t + O_j$ で与えられるとき、それぞれのイベント観測時刻列 $ESeq_i, ESeq_j$ から、相対ドリフト $dt_j/dt_i = (dt_j/dt)/(dt_i/dt)$ および相対オフセット $O_j - O_i$ を推定する手法を考える。本節では、相対ドリフトは1であるとして相対オフセットの推定手法について述べ、相対ドリフトと相対オフセットの双方の推定手法については次節で説明する。

$C_i(t)$ と $C_j(t)$ の相対ドリフトが1, すなわち, $dt_j/dt_i = 1$ であると仮定すると, $C_i(t) - C_j(t) = O_i - O_j$ すなわち同一時刻における時計の値の差は相対オフセットに等しくなる。したがって, S_i と S_j の共通観測イベントのひとつを特定することができれば, その観測時刻の差は相対オフセットに等しい。

ここで, 2章で述べたように, 複数の無線センサノードが同時に観測した共通観測イベントであったとしても, その観測時刻 $C_i(t)$ と $C_j(t)$ は異なる, すなわち, $C_i(t) \neq C_j(t)$ となることがある。逆に, 発生した時刻 t と t' が異なる, すなわち, $t \neq t'$ であるイベントであっても観測時刻が等しい, すなわち, $C_i(t) = C_j(t')$ であることがある。このように, 各無線センサノードの記録したイベント観測時刻を各々比較する方法では共通観測イベントを特定することができない。

そこで本論文では, 隣接無線センサノード間の複数の共通観測イベントを用いて相対オフセットを推定する手法を提案する。無線センサノード S_i のイベント観測時刻列 $ESeq_i$ には, 隣接無線センサノード S_j との間の共通観測イベントの観測時刻における時計 $C_i(t)$ の値が含まれている。このイベントの S_j による観測時の時計 $C_j(t)$ の値も $ESeq_j$ に含まれているが, それぞれの観測時刻列を個別に比較しても共通観測イベントを特定することはできない。ここで, 共通観測イベントは, これが発生した位置を観測領域に含む複数の隣接無線センサノードによって同時刻に観測される (それぞれの時計の値は異なる) ことから, 複数の共通観測イベントの発生間隔におけるそれぞれの時計の値の差は等しい。すなわち, S_i と S_j による時刻 t, t' に発生した共通観測イベントの観測時刻がそれぞれ $C_i(t), C_i(t'), C_j(t), C_j(t')$ であるとする, $C_i(t) \neq C_j(t')$ かつ $C_i(t) \neq C_j(t)$ であるとしても $C_i(t') - C_i(t) = C_j(t') - C_j(t)$ は満たされる。

そこで, 各無線センサノードによって観測されるイベントの発生時刻にはある程度以上のランダム性が含まれていることから, 共通観測イベント推定を上記命題の逆を適用するヒューリスティックが考えられる。すなわち, 時刻 t, t' に発生した共通観測イベントの S_i と S_j による観測時刻 $C_i(t), C_i(t'), C_j(t), C_j(t')$ が $C_i(t') \neq C_j(t')$

かつ $C_i(t) \neq C_j(t)$ というように異なっているとしても $C_i(t') - C_i(t) = C_j(t') - C_j(t)$ が満たされるイベント対が存在するならば, このイベントはいずれも共通観測イベントである可能性がある。

異なる無線センサノードのイベント観測時刻列に発生時刻における無線センサノードの時計の値が含まれるイベントには, 偶然に観測時刻の差が一致する単独観測イベント対や単独観測イベントと共通観測イベントの対が含まれる場合もあり得る。そこで, 可能な相対オフセットのうち, イベント発生時刻における時計の値の差が一致することで共通観測イベントであると推定されるイベントをより多く含むようなものを相対オフセットとして推定するものとする。

[相対オフセット推定手法]

無線センサノード S_i, S_j のイベント観測時刻列 $ESeq_i, ESeq_j$ があるとき, それぞれの時計 $C_i(t), C_j(t)$ の相対オフセット $O_i - O_j$ は, $ESeq_i, ESeq_j$ に含まれ発生時刻が同じであると推定される推定共通観測イベントの数が最大となるものである。□

3.3 相対ドリフト推定

前節では, 無線センサノード S_i, S_j に搭載された時計の値 $C_i(t), C_j(t)$ について, これらの相対ドリフトは1であることを仮定して説明した。このアルゴリズムを拡張して, 相対ドリフトと相対オフセットの双方を推定する手法を示す。ここでも, 前節と同様にそれぞれのイベント観測時刻列 $ESeq_i, ESeq_j$ から時計の値 $C_i(t_k^i), C_j(t_l^j)$ を取り出し, 相対オフセットが $C_i(t_k^i) - C_j(t_l^j)$ である場合の共通観測イベント数を推定する。ただし, 相対オフセットは上記とは異なる時計の値 $C_i(t_{k'}^i), C_j(t_{l'}^j)$ ($k \neq k', l \neq l'$) を取り出し, $(C_i(t_{k'}^i) - C_i(t_k^i))/(C_j(t_{l'}^j) - C_j(t_l^j))$ を相対ドリフトの推定値とする。すべての可能な相対ドリフトについて, 共通観測イベント数を推定し, これが最大となる相対ドリフト, 相対オフセット推定値を採用するものとする。なお, 本手法を適用するためには, 3つ以上の共通観測イベントが必要である。したがって, これが十分に期待できるだけの時間だけイベント観測を継続することが求められる。また, 本手法においても, 相対オフセットと相対ドリフトに上限が定められるのであれば, その上限以下の範囲に探索範囲を縮小することができる。

[ドリフト/オフセット推定アルゴリズム]

- 1) 最大共通観測イベント数を $MCO_{ij} = 0$ として初期化する。
- 2) 仮オフセットを $Soff_{ij} = C_i(t_{n_i}^i) - C_j(t_0^j)$, $k = n_i$, $l = 0$ とする。
- 3) $Sdri_{ij} = (C_i(t_{k'}^i) - C_i(t_k^i))/(C_j(t_{l'}^j) - C_j(t_l^j)) > 0$ となるすべての k', l' について 4) から 6) までの手順を適用する。
- 4) 共通観測イベント数を $CO_{ij} = 0$ とする。

- 5) S_i のイベント観測時刻列 $ESeq_i := |C_i(t_0^i), C_i(t_1^i), \dots, C_i(t_{N_i}^i)|$ に含まれるすべてのイベント観測時刻 $C_i(t_{k''}^i)$ ($0 \leq k'' \leq N_i$) について, S_j のイベント観測時刻列 $ESeq_j := |C_j(t_0^j), C_j(t_1^j), \dots, C_j(t_{N_j}^j)|$ に含まれるすべてのイベント観測時刻 $C_j(t_{l''}^j)$ ($0 \leq l'' \leq N_j$) と $(C_i(t_{k''}^i) - C_i(t_k^i)) / (C_j(t_{l''}^j) - C_j(t_l^j)) = Sdri_{ij}$ を満たす l'' を探索する. k'' に対してこのような l'' が存在するならば, CO_{ij} をインクリメントする.
- 6) $CO_{ij} \geq MCO_{ij}$ ならば, $MCO_{ij} = CO_{ij}$ および推定オフセット $Eoff_{ij} = Soff_{ij}$, 推定ドリフト $Edri_{ij} = Sdri_{ij}$ とする.
- 7) $Soff_{ij} = C_j(t_{n_j}^j) - C_i(t_0^i)$ であるならば 9) へ.
- 8) オフセット更新 $Uoff_{ij} = \min(C_j(t_l^j) + Soff_{ij} - C_i(t_k^i))$ (ただし $C_j(t_l^j) + Soff_{ij} - C_i(t_k^i) > 0$) を与える k, l を探索する. $Soff_{ij} = Soff_{ij} - Uoff_{ij}$ と仮オフセットを更新し, $CO_{ij} = 0$ として 3) へ戻る.
- 9) このときの $Eoff_{ij}$, $Edri_{ij}$ を推定オフセット, 推定ドリフトとして終了する.

□

3.4 無線センサネットワークの時計合わせ

本節では, 前節で提案した隣接無線センサノード間で相対ドリフトと相対オフセットを推定する手法を用いて, 複数の無線センサノードで構成される無線センサネットワークで各無線センサノードの時計合わせを行ない, これにより, イベント観測ログに記録されたイベント観測時刻を適切に変換することにより, 異なる複数の無線センサノードによって観測された同一のイベントの観測時刻を同一にすること, 異なる複数の無線センサノードそれぞれによって観測された単独観測イベントの発生順序と観測時刻の前後関係との間の矛盾を解消することを実現する. これらを目指すことから, 本論文では各無線センサノードが備える時計を「正しい時計」に合わせることを想定していない. 本論文での無線センサネットワークでの時計合わせでは, 無線センサネットワークを構成する複数の無線センサノードのうちの1個を基準無線センサノード, その保持する時計を基準時計とし, すべての無線センサノードの時計を基準時計に合わせることをとする. 基準無線センサノードは, 無線センサネットワークを構成する複数の無線センサノードのいずれであっても構わない. 例えば, 外部環境の時計との誤差が小さい時計を保持する有線ネットワークに接続された無線シンクノードに隣接し, この無線シンクノードとの間で従来の時計合わせ手法を適用している無線センサノードを基準無線センサノードとすることが考えられる. ただし, 本論文では, 基準無線ノードがどのようなものであるかを特に限定しないこととする.

基準無線センサノード $N^b (= N_0^n)$ に隣接し, この基準無

線センサノードとの間で共通観測イベントを持ち得る隣接無線センサノード N_1^n との間で共通観測イベントを推定し, N^b と N_1^n の保持する時計の間の相対ドリフトと相対オフセットを得ることにより, N_1^n のイベント観測ログに記録されたイベント観測時刻を変換する. そして, 時計合わせ操作を終えた無線センサノード N_i^n と時計合わせ操作を終わっていない隣接無線センサノード N_{i+1}^n との間でこの時計合わせ操作を順次行なう, すなわち, N_i^n と N_{i+1}^n との間で共通観測イベントを推定し, N_i^n と N_{i+1}^n の保持する時計の間の相対ドリフトと相対オフセットを得ることにより, N_{i+1}^n のイベント観測ログに記録されたイベント観測時刻を変換する. これにより, 無線センサネットワークを構成するすべての無線センサノードの時計を基準無線センサノード N^b の時計に合わせることができ, このとき, 隣接無線センサノード N_i^n と N_{i+1}^n との間で時計合わせ操作を行なったという関係から, 無線センサノードをノード, 時計合わせを行なった隣接無線センサノード間の接続をリンクとするグラフを構成すると, このグラフは N^b を根とする木となる. ここでは, N_i^n は N_{i+1}^n の親ノードとなる.

一般に, この木の任意のノードである無線センサノード N_i^n とその子ノードである無線センサノード N_{i+1}^n との間の時計合わせ操作には, これらの間の共通観測イベント推定に誤りが含まれる可能性がある, すなわち, 相対ドリフトと相対オフセット推定に誤差が含まれる可能性があることから, 根ノードである基準無線センサノード N^b と N_{i+1}^n との間の時計合わせの信頼性は, N^b と N_i^n との間の時計合わせの信頼性より低くなると考えられる. したがって, センサネットワーク全体としてより信頼性の高い時計合わせを実現するためには, 木の高さを低くすることが求められる. 一方, 本論文で提案する共通観測イベント推定に基づく時計合わせ手法においては, 次章に示す共通観測イベントの推定成功率のシミュレーション実験結果から, 共通観測イベントを持ち得る隣接無線センサノード間の共通観測イベント推定の成功率, すなわち, 推定相対ドリフトと推定相対オフセットの誤差の大きさは, 推定される共通観測イベント数に強く依存していることがわかる. そのため, $0 \leq j < i$ について N_j^n と N_{j+1}^n との間の時計合わせの信頼性が低く評価されるならば, N^b と N_i^n との間の時計合わせの信頼性も低く評価されなければならない. すなわち, $0 \leq j < i$ について N_j^n と N_{j+1}^n との間の時計合わせの信頼性が低く評価されるならば, N^b と $N_i^n (i > j)$ との間の時計合わせの信頼性はすべて低く評価されなければならない.

そこで, 基準無線センサノード $N^b (= N_0^n)$ と無線センサノード N_i^n との間の時計合わせの信頼性を以下のように評価する. 隣接無線センサノード N_i^n と N_{i+1}^n との間の時計合わせの信頼性は, これらの間で推定された共通観測イベント数の増加とともに高くなることから, リンク $\langle N_i^n, N_{i+1}^n \rangle$ の信頼性の評価値 $LR(N_i^n, N_{i+1}^n)$ は N_i^n と N_{i+1}^n との間の推定共

通観測イベント数とする。また、 N^b と N_i^n との間の時計合わせの信頼性の評価値は、 N^b から N_i^n への唯一のパスを構成するすべてのリンクの信頼性の評価値の最小値とする。すなわち、 $NR(N_i^n) := \min_{0 \leq j < i} LR(N_j^n, N_{j+1}^n)$ とする。例えば、 N^b と N_1^n, N_1^n と N_2^n, N_2^n と N_3^n, N_3^n と N_4^n, N_4^n と N_5^n のそれぞれにおいて推定された共通観測イベント数がそれぞれ 5, 6, 3, 2, 4 であるとき、 $LR(N^b, N_1^n) = 5, LR(N_1^n, N_2^n) = 6, LR(N_2^n, N_3^n) = 3, LR(N_3^n, N_4^n) = 2, LR(N_4^n, N_5^n) = 4$ であり、 N^b と N_i^n との間の時計合わせの信頼性の評価値は、 $NR(N_1^n) = 5, NR(N_2^n) = 5, NR(N_3^n) = 3, NR(N_4^n) = 2, NR(N_5^n) = 2$ となる。ここでは、 N_3^n と N_4^n との間の共通観測イベント数が 2 であると推定されている。提案手法では、可能な相対ドリフトと相対オフセットを推定するために任意の 2 対のイベントが共通観測イベントであると仮定して他の共通観測イベントを探索する手法を用いていることから、推定値 2 は極端に信頼性が低いと考えられる。この結果、 N^b と N_4^n との間の時計合わせは信頼性を低く評価し、さらに N^b と N_5^n との間の時計合わせの信頼性も低く評価している。

この時計合わせの信頼性という指標を用いて、無線センサネットワーク全体における時計合わせの信頼性を基準無線センサノード N^b と各無線センサノード N との間の時計合わせの信頼性の平均 $\sum_N NR(N)/n$ を最大とする木を構成するアルゴリズムを提案する。無線センサネットワークのすべての無線センサノードをノードとし、共通観測イベントを持ち得る隣接無線センサノード間を接続する無線通信リンクをリンクとするグラフを無線センサネットワークグラフ $WSNG$ とする。このとき、すべての無線センサノードをノードとし、時計合わせアルゴリズムを適用する隣接無線センサノード間を接続する無線通信リンクをリンクとするグラフは $WSNG$ のスパニングツリーのひとつである。このグラフを時計合わせグラフ CSG とすると、 CSG は基準無線センサノードを根とする $WSNG$ のスパニングツリーである。このとき、 $\sum_N NR(N)/n$ を最大とする CSG を構成するアルゴリズムを考える。

例えば、図 3 に示すように、無線センサネットワークの各無線通信リンク $\langle N_i, N_j \rangle$ に $LR(N_i, N_j)$ が与えられている場合を考える。時計合わせグラフ CSG の初期値は、リンクをひとつも含まないグラフである。そして、リンクの信頼性の評価値が最大であるもの（この例では 6）であるリンクから順次信頼性の評価値が低いものを追加していく。図 4 は、信頼性の評価値が 4 以上のすべてのリンクが追加された状態である。このとき、 CSG は 7 つの連結成分から構成されている。ここで、各連結成分に含まれる信頼性の評価値が 3 以下のリンクは除去し、また、各連結成分が木になるように信頼性の評価値が 4 であるリンクの一部を取り除くことによって得られる CSG が図 5 である。続

けて、信頼性の評価値が 3 であるすべてのリンクを追加し、得られた各連結成分に含まれる信頼性の評価値が 2 以下のリンクを除去し、また、各連結成分が木となるように信頼性の評価値が 3 であるリンクの一部を除去したものが図 6 である。最後に、信頼性の評価値が 2 であるすべてのリンクを追加し、各連結成分が木となるように信頼性の評価値が 2 であるリンクの一部を除去したものが図 7 であり、これが本論文で提案する時計合わせグラフの構成手法である。なお、このときに図 8 に示す N^b を基準無線センサノードとする場合における N^b と各無線センサノードとの間の時計合わせの信頼性は図 8 に示す通りである。

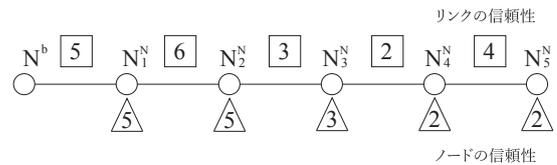


図 2 リンクの信頼性に基づく無線ノードの時計合わせの信頼性評価。

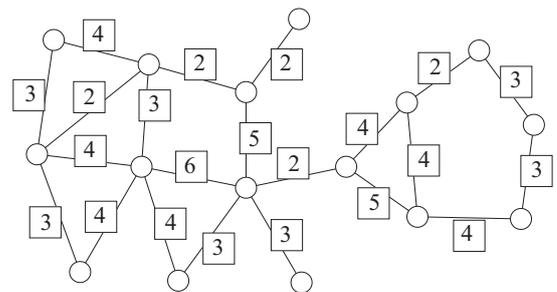


図 3 初期時計合わせグラフ。

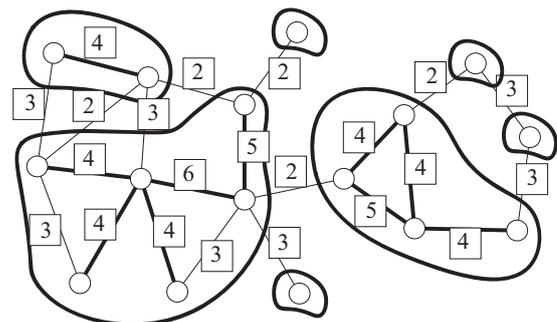


図 4 信頼性 4 のすべてのリンクを追加した時計合わせグラフ。

以上により、 $\sum_N NR(N)/n$ を最大とする CSG を構成するアルゴリズムは以下で与えられる。[時計合わせグラフ構成アルゴリズム]

- 1) すべての無線センサノードをノードとし、リンクを持たない初期時計合わせグラフ CSG を用意する。
- 2) すべてのリンク $\langle N_i, N_j \rangle$ について、 $maxLR := \max LR(N_i, N_j)$ を求める。
- 3) $currentLR := maxLR$ とする。

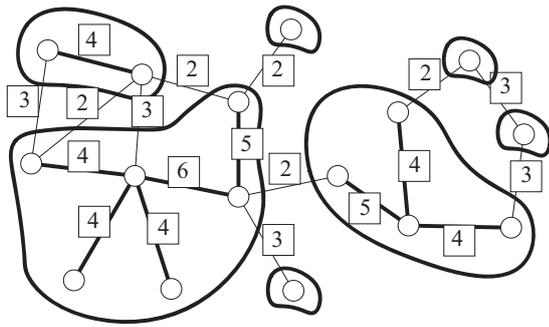


図 5 信頼性 4 以下の冗長なリンクを除去した時計合わせグラフ。

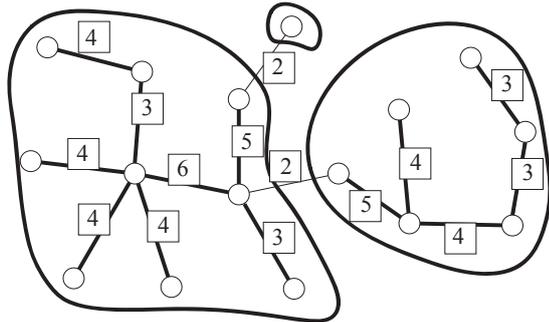


図 6 信頼性 3 以上の必要なリンクを用いた時計合わせグラフ。

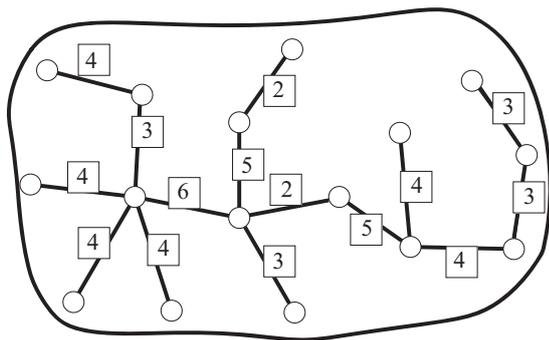


図 7 完成した時計合わせグラフ。

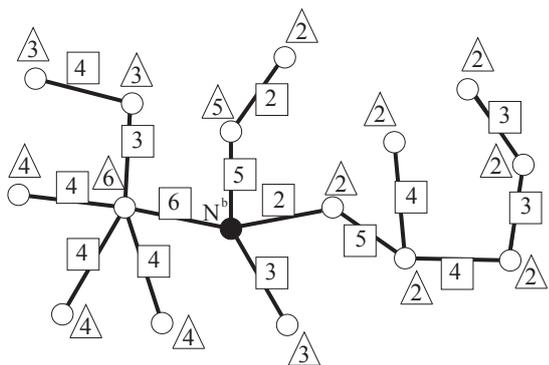


図 8 各無線センサノードの時計合わせの信頼性。

- 4) $LR(N_i, N_j) = currentLR$ である各無線通信リンク $\langle N_i, N_j \rangle$ について、 N_i と N_j が CSG の異なる連結成分に含まれるノード同士であるならば、リンク $\langle N_i, N_j \rangle$ を CSG に加える。
- 5) CSG の各連結成分が木になるように、4) で加えられた

リンクから冗長なものを取り除く。

- 6) CSG の連結成分が 1 つ (CSG が連結グラフ) となったのであれば、現在の CSG が求める時計合わせグラフであるとして終了とする。 CSG の連結成分が 2 つ以上であるならば、 $currentLR := currentLR - 1$ として 4) へ。

□

このアルゴリズムによって構成された時計合わせグラフ CSG のノードである無線センサノード N_j は、その親ノードである無線ノード N_i との間で隣接無線センサノード間の時計合わせアルゴリズムを適用し、共通観測イベントの推定から、推定相対ドリフトと推定相対オフセットを得る。そして、これらを用いてイベント観測ログに含まれるイベント観測時刻を変換することで時計合わせを行なう。このとき、基準無線センサノード N^b と無線センサノード N_i^n との時計合わせは、 CSG の N^b から N_i^n への唯一のパス p_{CSG} に沿って、そのパスに含まれる無線センサノードが隣接無線センサノード間で順次時計合わせアルゴリズムを適用することによってなされる。一方、 N^b と N_i^n との間の時計合わせは、無線センサネットワークグラフ $WSNG$ 上の N^b から N_i^n への任意のパス p に沿って、そのパスに含まれる無線センサノードが隣接無線センサノード間で順次時計合わせアルゴリズムを適用することによってなすことができる。このとき、 p_{CSG} に沿った時計合わせによる N^b と N_i^n との間の時計合わせの信頼性は、他の任意の経路 p に沿った時計合わせによる N^b と N_i^n との間の時計合わせの信頼性以上になる。

[定理] 経路 p に沿って隣接無線センサノード間の時計合わせアルゴリズムを適用することによって得られる基準無線センサノード N^b と無線センサノード N との間の時計合わせの信頼性を $NR(N, p)$ とすると、 $NR(N, p_{CSG}) = \max_p NR(N, p)$ である。 □

[系] 時計合わせグラフ CSG のリンクに沿った隣接無線センサノード間の時計合わせアルゴリズムの適用により、 $\sum_N NR(N)/n$ は最大となる。 □

4. 評価

本章では、観測可能領域が重複するために共通観測イベントを持ち得る隣接無線センサノード対において、そのイベント観測ログから提案アルゴリズムによって推定される共通観測イベントの数とその推定の正答率との関係をシミュレーション実験によって評価する。ここでは、隣接無線センサノードの観測可能距離を 10m、隣接無線センサノード間の距離を 1-19m とし、イベントの発生領域を 20m × 40m の長方形領域、イベント観測時間を 100 秒、イベント発生回数を 2-50 回とした場合において、3 章で提案した隣接無線センサノード間の共通観測イベント推定を行なった。なお、各イベントの発生時刻、観測時刻の精度は 10^{-2}

秒としており、共通観測イベントの推定においては相対ドリフト、相対オフセットを用いたイベント観測時刻の変換により 10^{-2} 秒の精度で観測時刻が同一となったものを共通観測イベントとしている。図9は、共通観測イベントの推定成功率を無線センサノード間距離とイベントの単位面積、単位時間あたりの発生頻度についてまとめたものである。無線センサノード間距離が短いほど、イベントの発生頻度が高いほど共通観測イベント数が増加し、これにともなって共通観測イベントの推定成功率が高くなっていることが分かる。

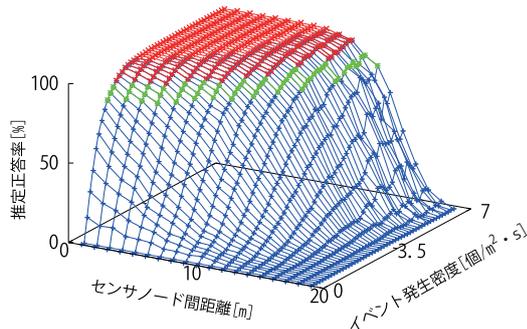


図9 共通観測イベント推定成功率.

また、推定共通観測イベント数と共通観測イベント推定の成功率との関係を表1にまとめる。ここでは、イベント発生頻度の単位は $10^{-5}/m^2$ 秒であり、それぞれのイベント発生頻度について、1,000回ずつ試行した場合の結果を示している。イベントの発生頻度が高いほど推定共通観測イベント数の分布は多い方へと偏るが、いずれにおいても推定成功率は推定共通観測イベント数に対して単調に増加し、特に4以上の共通観測イベントが推定された場合にはほぼ100%の成功率となることが示されている。したがって、3.4節で示した時計合わせグラフの構成において、推定共通観測イベント数を隣接無線センサノード間の時計合わせの信頼性の指標として用いることは妥当であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、ドリフトとオフセットが異なる時計を保持する無線センサノードによって記録されたイベント観測ログに記録されたイベント観測時刻を矛盾のないものに変換する時計合わせを実現するために、このイベント観測ログの比較によって隣接無線センサノード間の共通観測イベントを推定し、それに基づいて相対ドリフトと相対オフセットを得る手法を提案した。本手法は、隣接無線センサノード間の同期メッセージ交換による相対ドリフト、相対オフセット推定を行なわないことから、メッセージの配送遅延推定が困難な無線センサネットワークでの適用において有効である。また、ひとつの無線センサノードの保持する時計を基準時計として、無線センサネットワークを構成する

表1 推定共通観測イベント数と推定成功率.

発生頻度	0.278		0.417		0.556	
	成功率	回数	成功率	回数	成功率	回数
0	0.000	1				
2	0.010	395	0.001	145	0.000	39
3	0.945	236	0.863	146	0.736	86
4	1.000	198	1.000	202	0.984	126
5	1.000	117	1.000	188	1.000	147
6	1.000	42	1.000	159	1.000	164
7	1.000	6	0.989	93	1.000	181
8	1.000	2	1.000	44	1.000	124
9	1.000	2	1.000	13	1.000	76
10	1.000	1	1.000	8	1.000	37
11			1.000	1	1.000	14
12			1.000	1	1.000	3
13						
14					1.000	2
15					1.000	1

すべての無線センサノードの保持する時計を対象として時計合わせを実現するための手法を提案した。ここでは、時計合わせの誤差を無線センサネットワーク全体として縮小するために、どの隣接無線センサノード間で相対ドリフトと相対オフセットの推定アルゴリズムを適用するかを示す時計合わせグラフを構成する手法を示した。提案する手法では、推定共通観測イベント数が隣接無線センサノード間の時計合わせの信頼性の指標となることを用いて、すべての無線センサノードの時計合わせの信頼性平均を最高とする時計合わせグラフが構成される。提案手法の適用した場合の時計合わせによって生じる推定イベント観測時刻の誤差が、従来の同期メッセージ交換によって生じる誤差よりも縮小されることを実験評価することが今後の課題である。

参考文献

- [1] Cristian, F., "Probabilistic Clock Synchronization," Distributed Computing, Springer, vol. 3, no. 3, pp. 146–158 (1989).
- [2] Jeremy, E., Lewis, G. and Deborah, E., "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts," Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, pp. 147–163 (2002).
- [3] Kopetz, H. and Ochsenreiter, W., "Clock Synchronization in Distributed Real-Time Systems," IEEE Transactions on Computers, vol. C-36, no. 8, pp. 933–940 (1987).
- [4] Miklos, M., Branislav, K. and Gyula, S., "The Flooding Time Synchronization Protocol," Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 39–49 (2004).
- [5] Saurabh, G., Ram, K. and Mani, B.S., "Timing-Sync Protocol for Sensor Networks," Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 138–149 (2003).
- [6] Tanenbaum, A.S. and Steen, M., "Distributed Systems Principles and Paradigms," Prentice Hall (2002).
- [7] Wu, Y.-C., Chaudhari, Q. and Serpedin, E., "Clock Synchronization of Wireless Sensor Networks," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 28, no. 1, pp. 124–138 (2011).