

無線センサネットワークにおける一貫性のある イベント観測時刻情報取得手法

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おらず、これを一致させることは難しい。これは、CSMA/CA や RTS/CTS による衝突回避のために、隣接無線センサノード間のメッセージ配送遅延を推定することが困難であるためである。このため、異なる無線センサノードが観測した複数のイベント間の前後関係、発生時間間隔などを正確に知ることは困難である。さらに、同一のイベントを複数の無線センサノードが観測した場合にも、記録される観測時刻はそれぞれ異なることがあるため、各無線センサノードによる記録が同一のイベントによるものであることを判別することも困難である。本論文では、隣接する無線センサノードの観測領域が重複することを前提として、この重複領域で発生した共通観測イベントの観測時刻記録を用いて隣接無線センサノードの時計の間の相対オフセットと相対ドリフトを推定する手法を提案する。ここでは、各無線センサノードは観測したイベントが観測領域内で発生したことをのみを知ることができ、発生位置を知ることができないことを前提とする。そのため、記録したイベントのいずれかが共通観測イベントであるかを推定することが必要となる。そこで、隣接無線センサノードで時計の値の差が同一となっている複数のイベント発生時刻記録は、共通観測イベントの発生記録であると判定するヒューリスティックを適用する。

キーワード: 無線センサネットワーク, 観測時刻, 時計 (ローカルクロック), 相対ドリフト推定, 相対オフセット推定.

Consistent Timestamps for Event Observations in Wireless Sensor Networks

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

Abstract: In wireless sensor networks, each wireless sensor node records events occurred in its observation area with their observation time. Each wireless sensor node possesses its own local clock whose drift and offset are generally different from the others. In addition, it is difficult for the wireless sensor nodes to adjust drifts and offsets of their local clocks since transmission delays of messages between neighbor wireless sensor nodes are difficult to estimate due to CSMA/CA and RTS/CTS control for collision avoidance. Thus, it is difficult to achieve an order and an interval among events observed by different wireless sensor nodes. Moreover, even if multiple wireless sensor nodes observe the same events, their recorded observation times might be different and two observation records for the same event by multiple wireless sensor nodes are not always recognized as the records for the same event. Based on an assumption that observation areas of neighbor wireless sensor nodes are overlapped, by using observation records of the commonly observed events by neighbor wireless sensor nodes, a novel method to estimate the relative drift and offset between local clocks of the neighbor wireless sensor nodes. Here, each sensor node only detects the occurrences of events and cannot achieve the locations where the events occur. Hence, commonly observed events between neighbor wireless sensor nodes are required to be detected. Our proposed method applies a heuristic that multiple observation records in neighbor wireless sensor nodes whose intervals are the same are estimated to be commonly observed events.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Observation Time, Local Clocks, Relative Drift Estimation, Relative Offset Estimation.

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[7]。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[9]。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。

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[6], 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(図1)。

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

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

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。
ある。

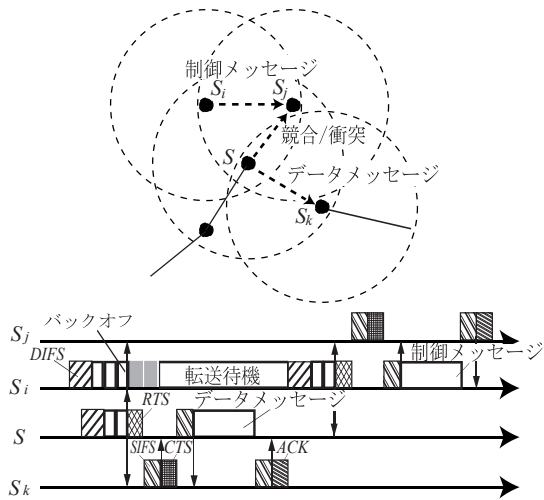


図 1 現在時刻情報を含む制御メッセージの配送遅延のゆらぎ。

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

^{*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。

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(図2) [5, 8]。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3に示すように、隣接する無線センサノード S_i と S_j とは観測領域が重複する。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。

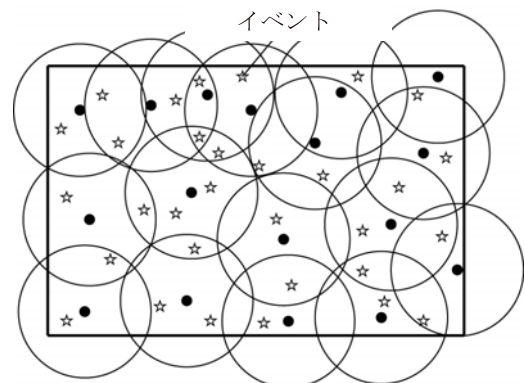


図 2 無線センサノードの観測領域による観測対象領域の被覆。

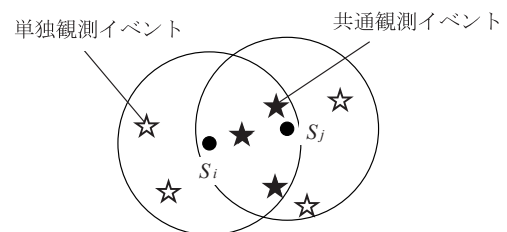


図 3 共通観測イベント。

[共通観測イベント/単独観測イベント]
隣接無線センサノード S_i, S_j の観測領域 OA_i, OA_j の重

複領域で時刻 t に発生し、観測時刻におけるそれぞれの時計の値 $C_i(t)$, $C_j(t)$ とともにイベント観測時刻列 $ESeq_i$, $ESeq_j$ に記録されるイベントを S_i と S_j の共通観測イベントという。一方、 OA_i に含まれるが OA_j に含まれない領域で時刻 t に発生し、 $C_i(t)$ とともに $ESeq_i$ に記録されるが $ESeq_j$ に記録されないイベントを S_i の S_j に対する単独観測イベントという。□

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(図4)。

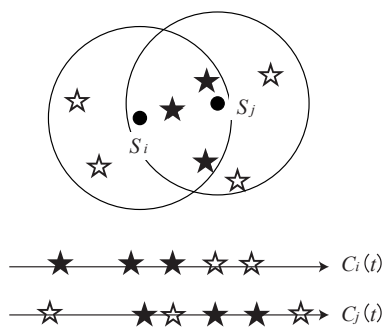


図4 共通観測イベント観測時刻。

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 (図 5). □

例えば, 図 5(a) のような無線センサノードにおけるイベント観測時刻列 $ESeq_i$ と $ESeq_j$ が与えられたとき, 推定されるオフセットによって図 5(b) や (c) のように, 1 つあるいは 2 つ, 共通観測イベントと推定されるイベントを検出することができる. しかし, 図 5(d) の相対オフセットであれば, 共通観測イベントが 3 つあると推定されることから, このときの相対オフセットを推定値として採用する.

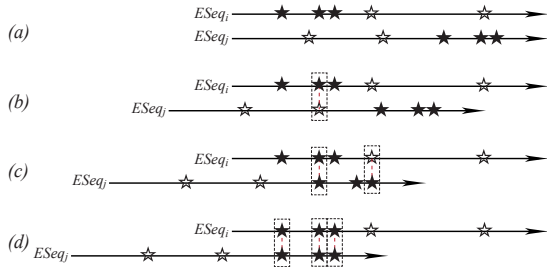


図 5 相対オフセット推定.

これを実現するアルゴリズムを構成する. ここでは, $ESeq_i$ と $ESeq_j$ に含まれるそれぞれのイベント観測時刻 $C_i(t_k^i), C_j(t_l^j)$ の組合せについて, この時計の値の対が共通観測イベントを S_i, S_j が観測, 記録したものであるとした場合の共通観測イベント数を比較する. このとき, 推定相対オフセットは $C_i(t_k^i) - C_j(t_l^j)$ となるが, これが最大となる $C_i(t_{N_i}^i) - C_j(t_0^j)$ から順次減少させて $C_i(t_0^i) - C_j(t_{N_j}^j)$ まで順次修正することで, 観測時刻の差が一致するものについて重複して共通観測イベント数を確認する手間を削減している. なお, 以下の示すアルゴリズムでは, すべての可能な相対オフセットについて検証することとしているが, あらかじめ相対オフセットの上限が与えられているのであれば, それによって検証範囲を縮小することが可能である.

[オフセット推定アルゴリズム]

- 1) 隣接無線センサノード S_i, S_j の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 $Soff_{ij} = C_i(t_{n_i}^i) - C_j(t_0^j)$, 共通観測イベント数を $CO_{ij} = 0$ とする.
- 3) 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 $C_i(t_k^i) = C_j(t_l^j) + Soff_{ij}$ 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.
- 4) $CO_{ij} \geq MCO_{ij}$ ならば, $MCO_{ij} = CO_{ij}$ および推定オフセット $Eoff_{ij} = Soff_{ij}$ とする.

- 5) $Soff_{ij} = C_j(t_{n_j}^j) - C_i(t_0^i)$ であるならば 7) へ.
 - 6) 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.
 - 7) $Eoff_{ij}$ を推定オフセットとして終了する.
-

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図 6 に示す. 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. 本手法による相対オフセットと相対ドリフト推定には, 以下の性質がある.

[性質 1] 相対ドリフトが 1 でないとき, 異なる複数の相対オフセット値が推定されるが, その数は共通観測イベント数以上である. なお, 相対ドリフトの推定値は 1 つだけである.

[性質 2] 性質 1 で示した複数の相対オフセット値は, 単独観測イベントを共通観測イベントと誤って推定していないのであれば, 推定されるいずれの相対オフセット値を用いても時計の値は同じ値に補正される.

[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.

□

図6の場合, (a) に示すような $C_i(t_k^i)$ と $C_j(t_l^j)$ とが共通観測イベントを観察した S_i と S_j の時計の値としたとき, 相対ドリフトの推定値として $C_i(t_{k+1}^i) / C_j(t_{l+2}^j)$ を用いた様子を (b), $C_i(t_{k-1}^i) / C_j(t_{l-1}^j)$ を用いた様子を (c) に示す.

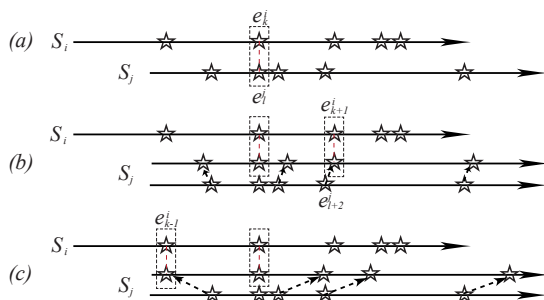


図6 相対ドリフト推定.

4. 評価

本章では, 前章で述べた提案手法における相対ドリフト, 相対オフセット推定に用いたヒューリスティック手法, すなわち, 推定共通観測イベント数が最大となるドリフトとオフセットを推定値として用いる方法の有効性を検証する.

提案手法では, 時刻 t におけるセンサノード S_i, S_j の時計の値は $C_i(t) = (dt_i/dt)t + O_i, C_j(t) = (dt_j/dt)t + O_j$ で与えられ, 相対ドリフト dt_j/dt_i と相対オフセット $O_j - O_i$ を推定するが, 図7に示すように, 正しい共通観測イベントを推定した場合には, 推定ドリフトと推定オフセットによって移動した直線 $C_j(t)$ は直線 $C_i(t)$ に重なり, $C_j(t)$ 上のすべての共通観測イベントは C_i 上の共通観測イベントに重なる*2. しかし, 共通観測イベントの推定に誤りがある

*2 この考察により, 「共通観測イベントが n 個正しく推定されるな

場合には, 図8に示すように, 発生時刻が異なるにもかかわらず修正したイベント観測時刻が等しくなる点が $t \neq t'$ かつ $C_i(t) = T(C_j(t'))$ (ただし, $T()$ は推定した相対ドリフトと相対オフセットによる修正を表す.) に移動する. この場合には, 直線 $C_i(t)$ と直線 $T(C_j(t))$ は重ならない. すなわち, 推定された相対ドリフト, 相対オフセットは誤りであり, 以降, 相対ドリフトと相対オフセットが一定であったとしても, S_i と S_j の時計の値は異なるままである. ただし, 誤りの推定による共通観測イベント数が正しい共通観測イベント数よりも多くなるのは, イベント発生密度が非常に高いために偶然 $t \neq t'$ かつ $C_i(t) = T(C_j(t'))$ を満足するイベント観測記録が多数存在する場合に限られる.

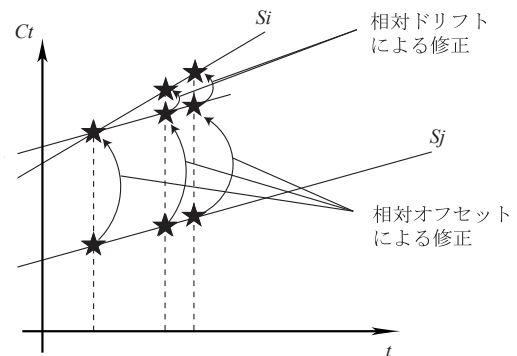


図7 正しい共通観測イベント推定.

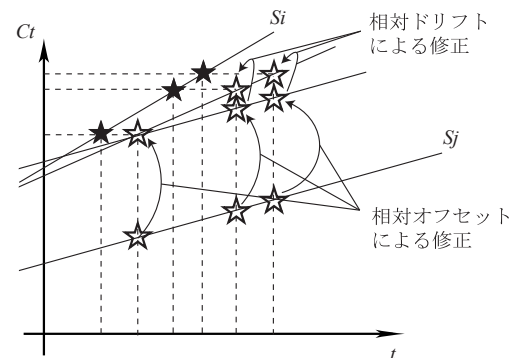


図8 誤った共通観測イベント推定.

この考察を検証するために, シミュレーション実験によって提案手法の有効性を検証する. ここでは, 観測範囲の半径が 10m, 無線ノード間距離が 10m のふたつの無線センサノードによる観測環境を想定する. ここで, 発生時刻が [0s, 900s] の一様分布乱数, 発生位置が観測範囲全体に対する一様分布乱数で定まるイベントを 0-49 個ランダムに発生させる. これを相対ドリフトが [0.1, 10] の一様分布乱数, 相対オフセットが [0s, 9s] の一様分布乱数で与えられる時計 $C_i(t), C_j(t)$ を用いて観測する場合の共通観測イベントの

らば, 正しい相対オフセットが n 個推定され, それらに対応する相対ドリフトは等しい. という性質が導かれる.

推定成功率を評価する。

評価結果を図9に示す。ここでは、発生イベント数に対する共通観測イベント推定の正答率、すなわち、正しい相対ドリフト、相対オフセットを推定する確率を示している。提案アルゴリズムでは、最低3つの共通観測イベントが必要であることから、発生イベント数が極少ない場合には、推定正答率はほぼ0である。ただし、発生イベント数の増加とともに推定正答率も単調に増加し、イベント数15で推定正答率90%、イベント数19で推定正答率95%となっている。以上により、十分な数の共通観測イベントがある場合には精度の高い相対ドリフト、相対オフセット推定が可能であることが示された。

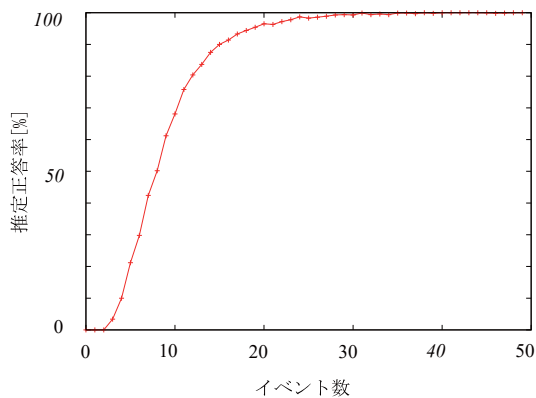


図9 推定正答率.

5. まとめ

本論文では、無線センサネットワークにおいて各無線センサノードに搭載された時計の相対オフセットと相対ドリフトを推定する手法を提案した。従来手法では、各無線センサノードが自身の時計から取得した現在時刻情報を隣接無線センサノードと交換することで、時計の相対的なドリフトとオフセットを推定していた。ここでは、現在時刻情報を含んだ制御メッセージの配送遅延をより正確に推定することで時計合わせの精度を向上させていたが、センサデータメッセージの無線マルチホップ配送が行なわれ、衝突回避のための諸待機制御が導入された環境では、この精度向上は困難である。本論文では、無線センサノードが、隣接無線センサノードと観測領域を重複させている状況を想定し、この重複領域で発生した共通観測イベントをそれぞれのセンサが同時刻に観測することに注目した手法を提案した。ここでは、各無線センサノードが観測、記録したイベントのいずれが共通観測イベントであるかを特定する問題がある。そこで、各無線センサノードが記録したイベント観測時刻列から発生間隔が共通するイベント観測時刻群を抽出することで、これらが共通観測イベントであり、それをより多数検出できるドリフト、オフセットが隣接無線センサノードに搭載された時計間の相対ドリフト、相対オフセッ

トであると推定する手法を考案した。また、これに基づいたアルゴリズムを構築した。

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] Qu, Y., and Georgakopoulos, S.V., “A Distributed Area Coverage Algorithm for Maintenance of Randomly Distributed Sensors with Adjustable Sensing Range,” *IEEE Global Communications Conference*, pp. 286–291 (2013).
- [6] 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).
- [7] Tanenbaum, A.S. and Steen, M., “Distributed Systems Principles and Paradigms,” *Prentice Hall* (2002).
- [8] Tuba, E., Tuba, M., and Simian, D., “Wireless Sensor Network Coverage Problem Using Modified Fireworks Algorithm,” *Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 696–701 (2016).
- [9] 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).