

# 無線センサネットワークにおける共通観測イベント 推定による一貫性のあるセンサデータ観測時刻取得手法

荒尾 彩子<sup>1,a)</sup> 梶垣 博章<sup>1,b)</sup>

**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なり、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、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。本手法の有効性を示すために、イベントログ記録に要する時間が制御メッセージ交換に要する時間よりもより安定であることを実験結果として示す。また、共通観測イベント推定成功率を高める許容計算誤差をシミュレーション実験評価する。

**キーワード:** 無線センサネットワーク, 内部時計 (ローカルクロック), 同期, イベント観測。

## Consistent Observation Time of Sensor Data by Estimation of Commonly Observed Events in Wireless Sensor Networks

AYAKO ARAO<sup>1,a)</sup> HIROAKI HIGAKI<sup>1,b)</sup>

**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 order to make clear the advantages of our proposed method, required time for event logging is evaluated to be more stable than required time for transmissions of control messages in conventional methods in experiments. Finally, the results of simulation experiments show the appropriate allowed calculation difference to judge the same event occurrence time is  $1.0 \times 10^{-7}$  second to achieve higher correct estimation ratio of commonly observed events.

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

<sup>1</sup> 東京電機大学大学院 ロボット・メカトロニクス学専攻  
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki  
University

a) arao@higlab.net

b) hig@higlab.net

## 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。各無線センサノードには、内部時計（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観測データとともにその観測時刻における時計の値が記録される。しかし、自律分散的に動作する各無線センサノードが保持する内部時計を完全に同期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、各内部時計の一定時間における値の増分は異なることを前提とする必要がある[7]。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応じて一定時間における時計の値の増分も変動することを考慮しなければならない。

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[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、一定間隔において時計の値  $C_i(t)$ ,  $C_j(t)$  間の誤差  $|C_i(t) - C_j(t)|$  を縮小すること、観測データの正しい分析のために記録されたイベント観測時刻における内部時計の値を修正することが求められる。そこで、GPS や電波時計などの外部から提供される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ことでこれらを実現する。これまでに提案されている手法では、無線センサノードの内部時計の値を含む制御メッセージを無線センサノード間で交換することによって相対ドリフト、相対オフセットを推定している。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ばらつきが大きい。このため、制御メッセージの配送遅延の推定に基づいて内部時計間の相対ドリフト、相対オフセットを推定する手法ではその誤差を縮小することが困難である。

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が可能であることに注目し、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内部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内部時計を同期させる「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内部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内部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内部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内部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、内部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とそ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推定が困難である。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

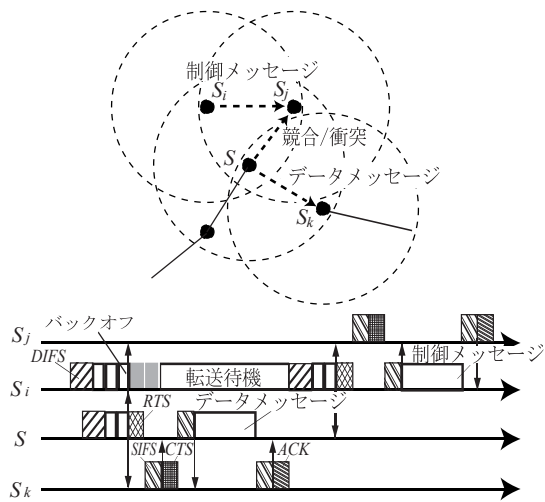


図 1 現在時刻情報を含む制御メッセージの配送遅延のゆらぎ。

送遅延のばらつきが拡大する。さらに、無線マルチホップ配送経路の中継無線ノード  $S_g$  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、 $S_g$  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  $S_g$  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ばらつきが拡大される。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、隣接する複数の無線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内部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。この推定値を用いて、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含まれるイベント観測時刻における内部時計の値を修正する。これによって、必ずしも各無線センサノードの内部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  $t$  における自身の内部時計の値  $C_i(t)$  とともに記録する。これをイベント観測ログとよぶ。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。ここで、各無線センサノード  $S_i$  では、イベント観測ログに基づいてイベント観測時刻における内部時計の値の列  $ESeq_i := \{C_i(t_0), C_i(t_1), \dots, C_i(t_{N_i})\}$  を構成する。  $C_i(t_j)$  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  $S_i$  の内部時計の値である。

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。また、同一のイベントを異なる種類のセンサを用いて観測することも考えられる。このとき、センサの観測領域の大きさがそれぞれ異なることから、センサの種類に応じて同一のイベントを異なる無線センサノードが観測することが考えられる。このときも複数のセンサノードの観測領域が互いに重複することとなる。

一般に、図3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や、同一位置で発生したイベントを異なる種類のセンサで観測する場合もあることから、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、無線センサノード  $S_i$  の観測領域に含まれるが無線センサノード  $S_j$  の観測領域には含まれない位置で発生したイベントは、 $S_i$  には観測され得るが  $S_j$  には観測されない。このようなイベントを  $S_j$  に対する  $S_i$  の単独観測イベントという。一方、 $S_i$  と  $S_j$  の双方の観測領域に含まれる位置で発生し、 $S_i$  と  $S_j$  の両方によって観測されるイベントを  $S_i$  と  $S_j$  の共通観測イベントという。ただし、このように観測領域が重複する位置で発生したイベントであっても  $S_i$  あ



るいは  $S_j$  のいずれか一方によってのみ観測される場合には、このイベントは単独観測イベントとなる。

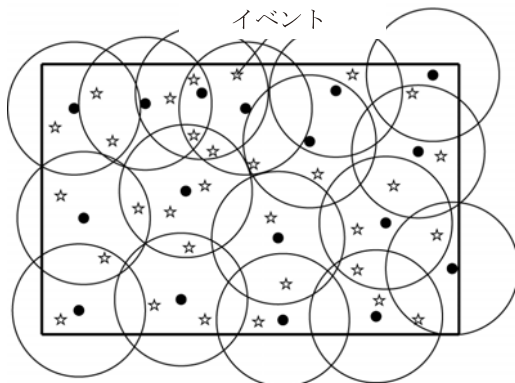


図 2 無線センサノードの観測領域による観測対象領域の被覆。

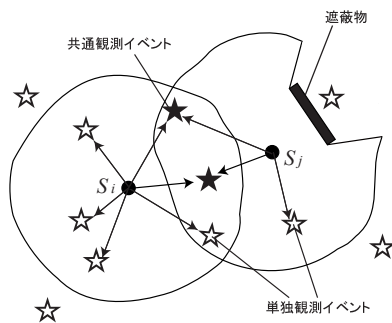


図 3 隣接無線センサノード間の共通観測イベント。

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  $t$  における内部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  $S_i, S_j$  の内部時計の値  $C_i(t), C_j(t)$  は一般的に異なっている。そのため、記録された観測時刻における内部時計の値から単純に  $S_i$  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)。

### 3.2 相対オフセット推定

前節で述べた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  $S_j$  の内部時計の値が  $C_i(t) = (dt_i/dt)t + O_i, C_j(t) = (dt_j/dt)t + O_j$  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  $O_j - O_i$

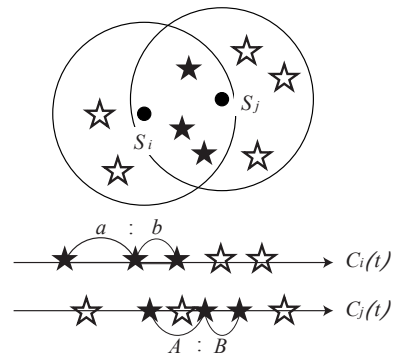


図 4 共通観測イベント観測時刻。

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、横軸を実時刻  $t$ , 縦軸を内部時計の値  $C$  とするグラフに無線センサノード  $S_i$  及び  $S_j$  の内部時計の値を平行な 2 直線で表すことができる(図 5)。この

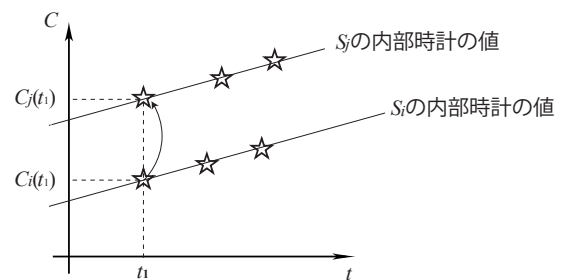


図 5 相対オフセット(相対ドリフト=1)。

とき、 $C_i(t) - C_j(t) = O_i - O_j$  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、その観測時刻における内部時計の値  $C_i(t)$  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それらの観測時刻における内部時計の値が等しい、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における内部時計の値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における内部時計の値の列  $ESeq_i$  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  $t_1$  における内部時計の値  $C_i(t_1)$  が含まれている. このイベントの  $S_j$  による共通観測イベント観測時の内部時計の値  $C_j(t_1)$  の値も  $ESeq_j$  に含まれているが, それぞれの観測時刻における内部時計の値の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 (それぞれの内部時計の値は異なる) ことから, 相対ドリフトが1である場合, 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内部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における内部時計の値がそれぞれ  $C_i(t)$ ,  $C_i(t')$ ,  $C_j(t)$ ,  $C_j(t')$  であるとすると,  $C_i(t') \neq C_j(t')$  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  $S_j$  による観測時刻における内部時計の値  $C_i(t)$ ,  $C_i(t')$ ,  $C_j(t)$ ,  $C_j(t')$  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  $C_i(t') - C_i(t) = C_j(t') - C_j(t)$  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における内部時計の値の列に発生時刻における無線センサノードの内部時計の値が含まれるイベントには, 偶然に観測時刻における内部時計の値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内部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における内部時計の値の列  $ESeq_i$ ,  $ESeq_j$  があるとき, それぞれの内部時計の値  $C_i(t)$ ,  $C_j(t)$  の相対オフセット  $O_i - O_j$  は,  $ESeq_i$ ,  $ESeq_j$  に含まれていて, 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 相対ドリフト及び相対オフセット推定

前節では, 無線センサノード  $S_i$ ,  $S_j$  に搭載された内部時計の値  $C_i(t)$ ,  $C_j(t)$  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. 相対ドリフトが1ではない場合, 内部時計の値のグラフは, 図6のように表される.

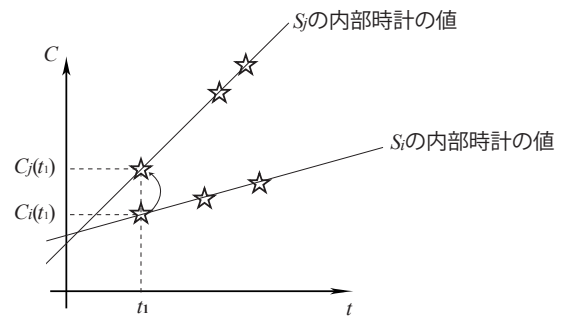


図6 相対オフセット (相対ドリフト  $\neq 1$ ).

このとき, 相対オフセットは各共通観測イベントの時計の値の差が異なるため推定された共通観測イベントの個数分算される.

前節で説明した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. ここでも, 前節と同様にそれぞれのイベント観測時刻における内部時計の値の列  $ESeq_i$ ,  $ESeq_j$  から内部時計の値  $C_i(t_k^i)$ ,  $C_j(t_l^j)$  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, 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して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内部時計の値  $C_i(t_{k'}^i)$ ,  $C_j(t_{l'}^j)$  ( $k \neq k'$ ,  $l \neq l'$ ) 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, 前節で述べたヒューリスティックに従ってこれが最大となる相対ドリフト, 各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.

4. 評価

本論文では, 隣接無線センサノードの保持する内部時計の間の相対オフセットと相対ドリフトの推定をこれらの共通観測イベントの観測時刻における内部時計の値を用いて行なう手法を提案した. このとき, 各無線センサノードが観測するイベントが共通観測イベントであるか, 単独観測イベントであるかを決定することが困難であることから, これを推定するヒューリスティック手法を示した. このような手法を考案したのは, 衝突回避機構を含む無線 LAN プロトコルの適用環境においては従来手法における隣接無線センサノードの保持する内部時計の値を含む制御メッセー

ジの配送遅延の推定誤差を縮小することが、困難であることによるものである。本章では、制御メッセージの交換を伴わない提案手法の有効性を示すために、無線 LAN プロトコルによる配送遅延とセンサノードによる観測時刻における内部時計の値の取得に要する時間のばらつきを比較する。さらに、前章で述べたアルゴリズムを適用するにあたって内部時計の値を変換する際に生じる計算誤差についての評価を行なう。そして、この評価に基づいて定めた許容誤差を用い、提案手法による共通観測イベントの推定成功率をシミュレーション実験評価する。

まず、内部時計の値を保持した制御メッセージの配送遅延のばらつきとセンサノード単独によるイベント観測時刻における内部時計の値の取得に要する時間のばらつきとを比較する。ここでは、無線 LAN に接続されたコンピュータが配置されている研究室において、互いに IEEE802.11 のアドホックモードで通信する Raspberry Pi の間の配送遅延のばらつきを測定する。ただし、実験に用いる Raspberry Pi の内部時計が正確に同期していないことを前提とすることから、両者の内部時計の値を用いるのではなく、送信側 Raspberry Pi が 1 秒間隔で送信するメッセージを受信側 Raspberry Pi が受信する際の内部時計の値を記録し、その受信間隔のばらつきを求めることとする。制御メッセージの交換がそれぞれの Raspberry Pi において時計合わせのプログラムを実行するプロセス間で行われることを想定すると、送信側/受信側双方の Raspberry Pi における内部処理に要する時間と無線 LAN プロトコルの衝突回避機構を含むデータメッセージの配送時間とを合わせた配送遅延のばらつきを得ることができる。一方、提案手法の基礎となるセンサによるイベント観測による内部時計の値の記録については、図 7 に示すように、ファンクションジェネレータによって 1 秒間隔で LED を発光させ、これを 0.10m 離れた位置に設置したフォトトランジスタによって検出したものを Raspberry Pi に入力し、割込みによってこの入力を通知されたプロセスが内部時計の値を記録することにより実現する。この場合も Raspberry Pi の内部処理に要する時間のばらつきによって記録される時間は必ずしも一定間隔にはならない。

図 8-10 に実験結果を示す。図 8 は制御メッセージの配送遅延測定における送信側 Raspberry Pi が記録した内部時計の値による制御メッセージ送信間隔である。ほぼ一定間隔で送信されており、その標準偏差は 0.0000338 秒である。これに対し、図 9 は制御メッセージの配送遅延測定における受信側 Raspberry Pi が記録した内部時計の値による制御メッセージの受信間隔を示している。無線 LAN プロトコルの衝突回避機構の影響もあり、1 秒の等間隔とはならず 0.70 秒から 1.3 秒の範囲でばらつきがあることがわかる。1,000 回の測定結果の標準偏差は 0.0506 秒である。一方、図 10 はセンサによる観測時刻における内部時計の

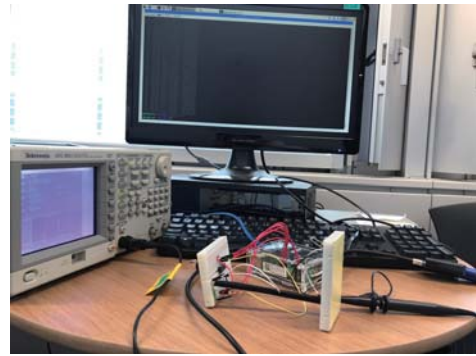


図 7 取得される内部時計の値の分散を評価する実験。

値の間隔である。図 9 と比較してばらつきが大きく縮小されていることがわかる。1,000 回の測定結果の標準偏差は 0.000601 秒である。以上により、提案手法における、内部時計間の相対オフセットと相対ドリフトを推定するための基礎データである内部時計の値のばらつきは、制御メッセージの配送遅延のばらつきよりも大きく縮小されており、より信頼性の高いものであることがわかる。

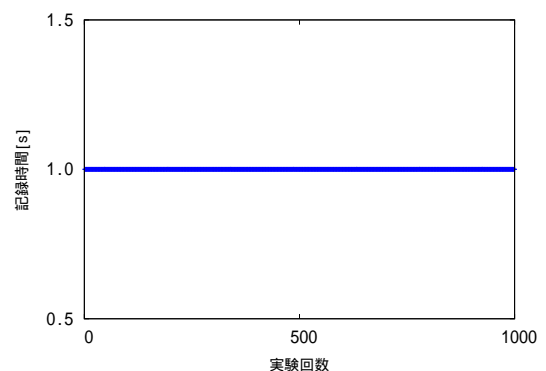


図 8 制御メッセージの送信間隔。

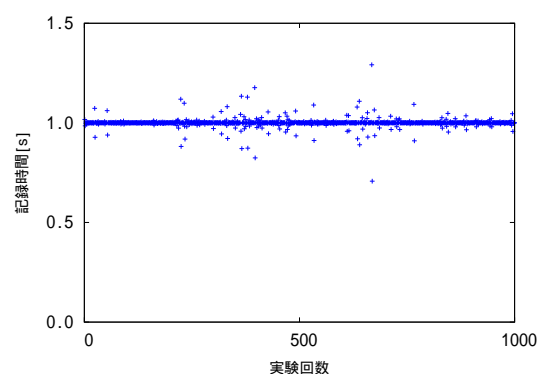


図 9 制御メッセージの受信間隔。

次に、観測可能領域が重複するために、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



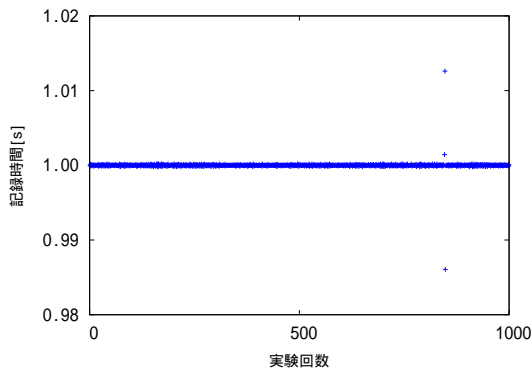


図 10 センサデータ取得間隔.

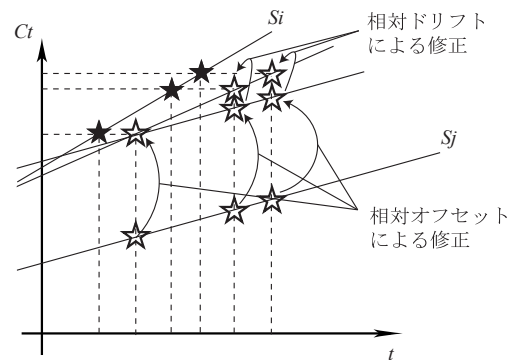


図 12 誤った共通観測イベント推定.

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  $S_i, S_j$  の内部時計の値は  $C_i(t) = (dt_i/dt)t + O_i, C_j(t) = (dt_j/dt)t + O_j$  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 11 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<sup>\*1</sup>。しかし、共通観測イベントの推定に誤りがある場合には、図 12 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  $t \neq t'$  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。

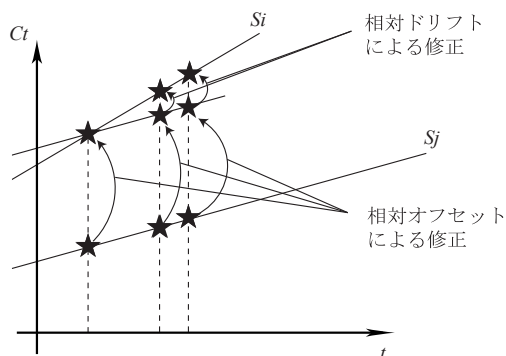


図 11 正しい共通観測イベント推定.

このように、無線センサノード  $S_j$  の  $S_i$  に対する相対ドリフトと相対オフセットを推定する際には、推定される相対ドリフトと相対オフセットに対応してイベント観測時刻における  $S_j$  の内部時計の値  $C_j(t)$  を  $S_i$  の内部時計の値に変換し、その値が等しいものを探索することで共通観測イベントの推定を行なう。このとき、内部時計が離散値をとることと時計の値の変換は有限桁数の演算(除算を含む)によって行なわれることから、許容計算誤差を定め、変換した内部時計の値との差が許容計算誤差以下である場合にはその値が等しいと判定することが必要である。この許容計算誤差が小さすぎる場合には、共通観測イベントが単独観測イベントと誤判定される頻度が高くなることが考えられ、逆に、許容計算誤差が大きすぎる場合には、単独観測イベント対を誤って共通観測イベントと判定する頻度が高くなることを考えられる。そこで、この内部時計の値の許容計算誤差と共通観測イベント推定の成功率との関係をシミュレーション実験評価することにより、適切な許容計算誤差を求める。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 0-20m とし、イベントの発生領域を  $20\text{m} \times 40\text{m}$  の長方形領域、イベント発生密度を  $0-10/m^2$  秒、変換した内部時計の値が等しいと判定する許容計算誤差を  $0-1.0 \times 10^{-3}$  秒としたときの共通観測イベントの推定成功率を評価する。シミュレーション実験の結果を図 13-17 に示す。許容計算誤差が小さい場合には、共通観測イベントを単独観測イベントと推定するために推定成功率が低い。特に許容計算誤差が 0 秒である場合(図 13)には、著しく推定成功率が低くなっている。許容計算誤差が大きくなるとともに推定成功率は高くなるが、許容計算誤差が  $1.0 \times 10^{-7}$  秒を越えると共通観測イベントの推定成功率は低下する。これは、単独観測イベント対が共通観測イベントと誤推定されることによるものである。以上より、許容計算誤差は  $1.0 \times 10^{-7}$  秒とすることが適切である。なお、無線センサノード間距離が短いほど、イベント発生頻度が高いほど推定成功率は高くなっているが、これは共通観測イベント数が増加することによるものである。

\*1 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。

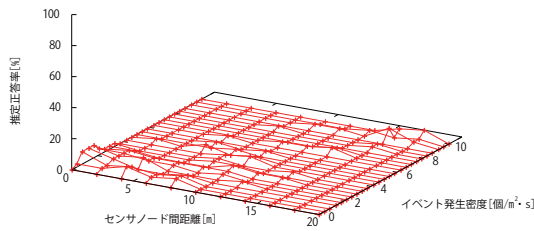


図 13 推定成功率 (許容計算誤差 0 秒).

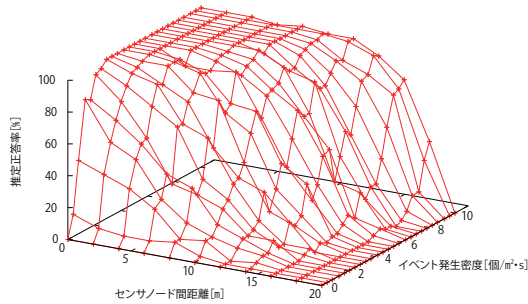


図 14 推定成功率 (許容計算誤差  $1.0 \times 10^{-9}$  秒).

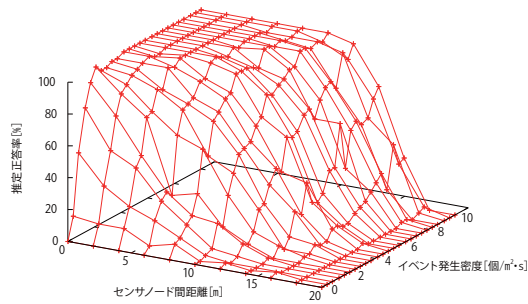


図 15 推定成功率 (許容計算誤差  $1.0 \times 10^{-7}$  秒).

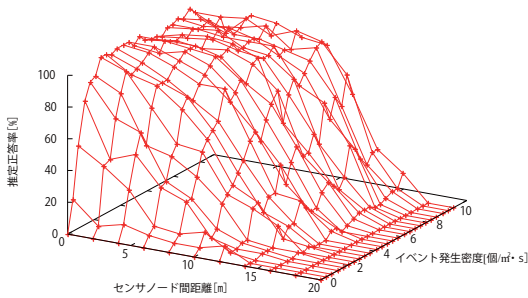


図 16 推定成功率 (許容計算誤差  $1.0 \times 10^{-5}$  秒).

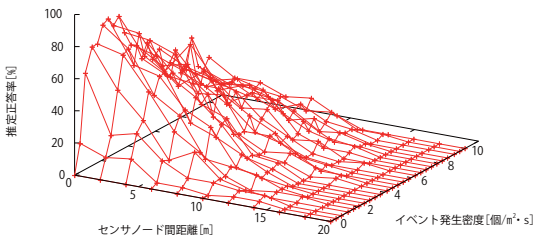


図 17 推定成功率 (許容計算誤差  $1.0 \times 10^{-3}$  秒).

する無線センサ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、提案手法の実装においてイベントログの記録に要する時間の方が無線通信による制御メッセージの交換に要する時間よりもより安定であることを実験結果により示すとともに、共通観測イベント推定において推定成功率をより高くする許容計算誤差を適切に定めるためのシミュレーション実験を行なった。

### 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).

## 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