

共通観測イベントを指標としたイベント観測時刻補正

荒尾 彩子 桧垣 博章

東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科

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、その観測領域内部で発生するイベントを検知し、測定によってイベントのパラメータを獲得するセンサ、センサデータを無線マルチホップ通信によってシンクノードに収集したり、無線センサノード間で相互に交換するために用いられる無線通信モジュール、制御用マイコンを動作させるとともにイベント観測時刻を取得するための時計、時計によるイベント観測時刻と観測したイベントの種類、獲得パラメータを記録するメモリなどから構成される。複数の無線センサノードで観測された多数のデータを処理する応用においては、各発生イベントについてその発生時刻（厳密には観測時刻）を正確に記録することが求められる。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一致させる時計合わせプロトコル [1–3] が提案されているが、多数のセンサノードで構成される大規模センサネットワークでの適用は、大きな通信オーバーヘッドを要するため困難である。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 で特徴付けられ、 $C_i(t) = dt_i/dt + O_i$ で与えられるものと仮定する [4]。このとき、各センサノードから集約したイベント観測時刻から dt_i/dt と O_i を推定し、これに基づいて各イベントの観測時刻を補正する手法を提案する。

2 提案手法

2.1 共通観測イベント

各無線センサノード S_i では、イベント観測時刻列 $ESeq_i := |C_i(t_0), C_i(t_1), \dots, C_i(t_{N_i})|$ が記録される。 $C_i(t_j)$ 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瞬間における S_i に搭載された時計の値である。この観測イベント情報はシンクノードへ無線マルチホップ配送され、データベースへと格納される。ここで、図1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とよぶ。

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

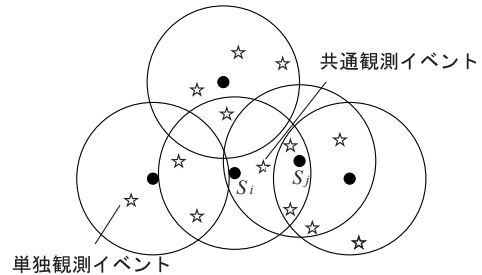


図1: 共通観測イベント。

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でき、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いずれかの隣接無線センサノードとの共通観測イベントであるか、 S_i のみが単独で観測したイベントであるかを知ることができない。もちろん、各共通観測イベントについて、いずれの隣接無線センサノードと重複する観測領域で発生したかを特定することはできない。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共通観測イベントを特定することはできない²。

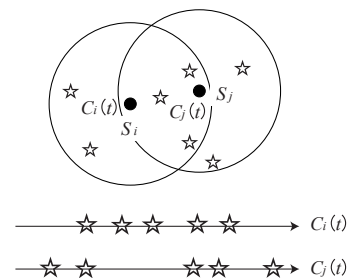


図2: 共通観測イベント観測時刻。

2.2 相対オフセット/相対ドリフト推定

無線センサノード S_i と S_j の時計が $C_i(t) = dt_i/dt + O_i$, $C_j(t) = dt_j/dt + O_j$ 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。まず、相対ドリフトは1であるとして相対オフセットを推定する手法について述べる。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

Revision of Event Observation Time based on Drift and Offset Estimation of Local Clocks based on Commonly Observed Events.

Ayako Arao and Hiroaki Higaki

Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

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み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。たとえ S_i と S_j が共通観測イベントの発生時刻における時計の読みが異なっている $C_i(t') \neq C_j(t')$ かつ $C_i(t) \neq C_j(t)$ としても $C_i(t') - C_i(t) = C_j(t') - C_j(t)$ は満たされる。

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を仮定すると、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、共通観測イベントの発生時刻における S_i と S_j における時計の読みが $C_i(t') \neq C_j(t')$ 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とする。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について、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推定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が最大となるものである。□

例えば、図3(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3(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3(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。

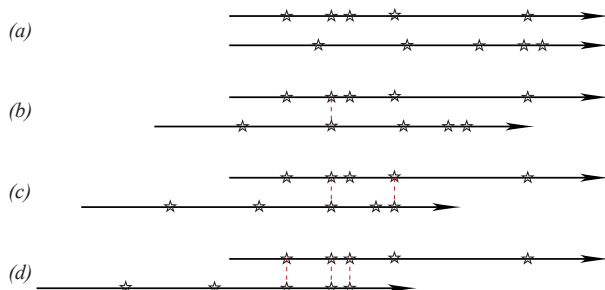


図3: 推定共通観測イベント数に基づく相対オフセット推定。

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、時計の値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。

次に、 $dt_j/dt_i \neq 1$ として、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、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、相対オフセット推定値を採用するものとする。

3 まとめ

本論文では、時計が必ずしも同期していない無線センサノードによって取得されたイベント観測情報に付与されたイベント観測時刻を補正するために、共通観測イベントを手掛かりにして、隣接無線センサノードに搭載された時計の間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した。提案手法の適用によって、特に多数の無線センサノードで構成される大規模無線センサネットワークにおいて、時計合わせプロトコルを導入することによるオーバーヘッドの影響を回避することができる。観測時刻の補正を行なうためには、本論文で推定した相対ドリフト、相対オフセットに基づいて何らかの共通時計に基づく時刻に変換する手法が必要であり、これを検討するのが今後の課題である。このとき、推定された相対ドリフト、相対オフセットに誤差が含まれる場合への対応が問題となる。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).