

共通観測イベント推定による隣接センサノード間 時計合わせ手法における推定信頼性の評価手法

宮澤 茉莉[†] 桧垣 博章[†]

東京電機大学大学院 未来科学研究科 ロボット・メカトロニクス学専攻[†]

1 はじめに

無線センサネットワークを構成する各無線センサノードは、内部時計を備えており、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の内部時計を完全に同期させるのは困難である [3]。これは、各無線センサノードの水晶発振器の個体差によるものであり、各内部時計のドリフトは異なることを前提とすることが必要である [6]。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、定期的に時計 C_i, C_j の値の誤差 $|C_i(t) - C_j(t)|$ を縮小することが求められる。

2 関連研究

RBS[2], FTSP[4], TSPN[5] は、無線センサノードの内部時計を同期するプロトコルである。これらでは、論文 [1] のクリスチャンのアルゴリズムを基礎として、2つの無線センサノード間でそれぞれの現在の内部時計の値を含む制御メッセージを交換する。この手法で高精度な同期を実現するためには、各制御メッセージの配送遅延を高精度に推定することが求められる。しかし、これらの制御メッセージは CSMA/CA を採用する IEEE802.11 などの無線 LAN プロトコルを用いて配送することが想定されるため、晒し端末間および隠れ端末間の無線信号衝突回避機構であるにより、メッセージ配送遅延の分散が大きくなる傾向がある。そのため、内部時計の値を含む制御メッセージを互いに交換する手法では、高精度な同期を実現することは困難である。

3 提案手法

3.1 相対ドリフト/相対オフセット推定アルゴリズム

各無線センサノードは、観測範囲で発生したイベントをその発生時刻における内部時計の値とともにイベ

ントログとして記録する。観測対象領域が広域である場合、複数の無線センサノードの観測範囲によってこの観測対象領域を被覆するのが一般的であり、この場合、隣接する無線センサノードの観測範囲は重複する。この重複領域で発生し、双方の無線センサノードによって観測され、イベントログとして記録されたものを共通観測イベント、いずれかの無線センサノードのみによって観測され、イベントログとして記録されたものを単独観測イベントとよぶ。それぞれのイベントログに記録されるイベント発生時刻は、それぞれの無線センサノードの内部時計の値である。

隣接無線センサノード S_i, S_j の時刻 t における内部時計 C_i, C_j 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、各共通観測イベントは S_i と S_j によって同じ時刻に観測されることから、2つの共通観測イベントの発生時刻を t_p, t_q とすると (t_p と t_q は取得不可能である)、 C_i に対する C_j の相対ドリフト $dt_j/dt_i = (C_j(t_q) - C_j(t_p)) / (C_i(t_q) - C_i(t_p))$ を取得することができる。これによって、時刻 t_r に S_j によって観測され、発生時刻を $C_j(t_r)$ として記録されたイベントを S_i が観測して C_i を参照して記録した場合の値は $(dt_i/dt_j)(C_j(t_r) - C_j(t_p)) + C_i(t_p)$ となる。もし、この値と等しい C_i の値とともに記録された S_i のイベントログが存在するならば、これらは共通観測イベントのものであると考えられる。

ただし、各無線センサの記録したイベントログのいずれが共通観測イベントのものであり、いずれが単独観測イベントのものであるかを決定することは不可能である。そこで、提案手法では、 S_i と S_j のそれぞれ2つずつのイベントログを共通観測イベントであると仮定して、これ以外の共通観測イベントを上記の方法で探索する。これをすべてのイベントログの組合せに対して行ない、共通観測イベントと推定されるイベントログ対の数が最も多くなる場合の相対ドリフトおよびそこから導出される相対オフセットを推定値とする。

3.2 信頼性評価

前節で提案した隣接無線センサノードの内部時計間の相対ドリフト/相対オフセット推定手法では、必ずしも正確な結果を得ることはできない。これは、これらの推定の根拠となる共通観測イベントの推定がヒューリスティックによるものであるためである。本手法では、

Reliability Evaluation in Clock Synchronization between Neighbor Sensor Nodes based on Estimation of Common Observing Events

[†]Mari Miyazawa and [†]Hiroaki Higaki

[†]Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

各無線センサノードが観測したイベントがその観測範囲において発生したことは確実であるが、その発生位置を特定しないことを前提としている。このため、無線センサノードが記録したイベントログからは、それが共通観測イベントのものであるか単独観測イベントのものであるかを決定することは不可能である。

例えば、共通観測イベントのもので推定した隣接無線センサノードのイベントログが、それぞれの観測範囲で同時に発生した異なる単独観測イベントのものである場合がある。このため、提案アルゴリズムにおいては、無線センサノード S_j が観測したイベントの発生時刻 (内部時計 C_j で取得) を無線センサノード S_i の内部時計 C_i の値に変換したとき、 S_i が観測した異なるイベントの発生時刻と一致したならば、同時に発生した単独観測イベントの場合と区別することが不可能であるために、これらのイベントログは共通観測イベントのものであると推定する。このような「偶然」の発生確率は、イベント発生頻度が高いほど高くなるものの、その影響は限定的である。そのため、共通観測イベントが一定数存在する程度に十分なイベントログを用いれば、推定した相対ドリフト/相対オフセットは信頼に足るものであり、その数が多い程信頼性が高いと考えられる。

共通観測イベントの推定において、変換した内部時計の値の比較を行なっているが、ここには適切な閾値を設けることが必要である。イベントを観測した無線センサノードでは、センサモジュールが割込みコントローラを介して CPU に割込み、内部時計の値を読み取って記録する。したがって、共通観測イベントを観測した複数の無線センサノードにおいて、その内部時計の値を読み取る時刻は必ずしも同一ではない。また、この内部時計は水晶発振器を用いたデジタル時計であることから、これを読み取った値には、時刻精度による量子化誤差が含まれる。したがって、共通観測イベント推定において、変換した内部時計の値を「等しい」とする判定には、妥当な閾値を設定しなければならない。この閾値が小さい場合には、本来共通観測イベントのものであるイベントログを異なるイベントのもので誤判定する (偽単独観測イベント) 頻度が高くなり、閾値が大きい場合には、本来単独観測イベントのものであるイベントログを共通観測イベントのものであると誤判定する (偽共通観測イベント) 頻度が高くなる。これによって、相対ドリフト/相対オフセットの推定を誤ることに加え、その推定値の信頼性評価を誤ることになる懸念がある。

そこで、閾値に対する偽単独観測イベントの発生確率を見積るためにシミュレーション実験を行なった。ここでは、内部時計の精度を 10^{-9} 秒、相対ドリフトを 0.9~1.1 として、共通観測イベントを 4~50 個発生させ、その内部時計の変換値がどれだけの差異を持つかの分布を調査した。変換値の差異の分布は、共通観測イベント数に依存することがなかったため、すべての場合

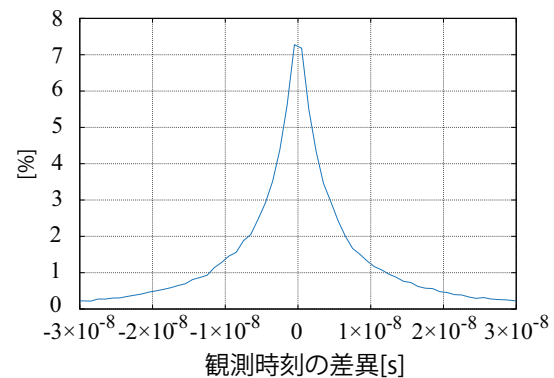


図 1: 共通観測イベント発生時刻の変換内部時計値の差異。

をまとめた実験結果を図 1 に示す。なお、閾値の拡大にともなって偽共通観測イベント数が増加することから、閾値の決定には、偽共通観測イベントの発生確率についての実験結果が必要であり、この実験結果を得て適切な閾値を決定する。

4 まとめ

本論文では、共通観測イベント推定に基づく隣接無線センサノードの内部時計間の相対ドリフト/相対オフセットの推定手法における推定結果の信頼性を推定共通観測イベント数で評価することを提案し、その実現のために、偽単独観測イベント数と偽共通観測イベント数を削減する閾値の設定が必要であることを明らかにした。

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] 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).