

時計合わせのための通信を伴わないセンサデータ同期手法

永野 克拓[†] 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内部時計の値が記録される。しかし、各無線センサノードが保持する内部時計を同期させることは難しく [1], 同期していない内部時計を備えた無線センサノードが取得した観測データをそのまま分析に用いることはできない。したがって、この観測データ群を分析する以前にこれらを同期させ、内部時計の値を適切なものに修正することが求められる。

図1に示すように無線センサノード S_i が備える内部時計 C_i の更新速度に対する無線センサノード S_j が備える内部時計 C_j の更新速度の比を C_j の C_i に対する相対ドリフト a_{ji} という。また、 $C_i(t) = 0$ となる時刻 t における C_j の値 $C_j(t)$ を C_j の C_i に対する相対オフセット o_{ji} という。本論文では、無線センサノード S_i, S_j が取得した観測データの同期を無線センサノードが取得した観測データに記録された観測時刻における内部時計の値を修正することで実現する。例えば、 o_{ji} と a_{ji} を用いて S_j が記録した時刻 t における内部時計の値 $C_j(t)$ を $(C_j(t) - o_{ji})/a_{ji}$ に変換する。すなわち、同時刻における S_i の内部時計 C_i の値に変換する。

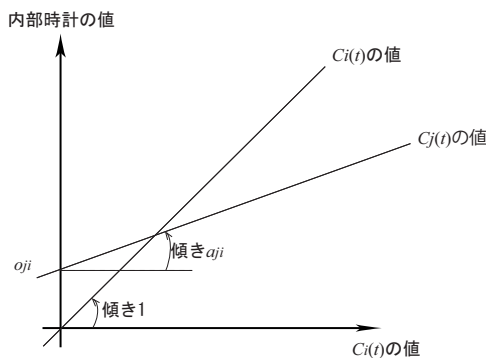


図1: 相対オフセットと相対ドリフト。

2 提案手法

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、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、隣接無線センサノード 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。一方、 S_i によって観測されるが S_j によっては観測されないイベントを S_j に対する S_i の単独観測イベントという。共通観測イベントは、 S_i と S_j によって同時刻に観測、記録されることから、共通観測イベントのイベント観測ログに記録された内部時計の値の対 $(C_i(t), C_j(t))$ を2対以上特定することができれば、 o_{ji} と a_{ji} を得ることができ、時刻 t における C_j の値 $C_j(t)$ を同時刻における $C_i(t)$ の値 $(C_j(t) - o_{ji})/a_{ji}$ に変換することができる。つまり、特定された2対の共通観測イベント観測時刻における内部時計の値の対を $(C_i(t_0), C_j(t_0))$ と $(C_i(t_1), C_j(t_1))$ とすると、 a_{ji} と o_{ji} は次式で与えられる。

$$a_{ji} = (C_j(t_1) - C_j(t_0)) / (C_i(t_1) - C_i(t_0))$$

$$o_{ji} = (C_i(t_1)C_j(t_0) - C_i(t_0)C_j(t_1)) / (C_i(t_1) - C_i(t_0))$$

各無線センサノード S_i は、その観測領域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ことを前提とする。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。共通観測イベントは、同時刻 t に S_i と S_j によって観測、記録されるが、それぞれの内部時計の値 $C_i(t), C_j(t)$ が記録されるため、必ずしも $C_i(t) = C_j(t)$ は満たされない。そこで、共通観測イベント観測ログの内部時計の値の対 $(C_i(t), C_j(t))$ を推定することによって、 o_{ji} と a_{ji} を推定する手法を提案する。

正しい o_{ji} と a_{ji} を用いて時刻 t における C_j の値 $C_j(t)$ を同時刻における $C_i(t)$ の値 $(C_j(t) - o_{ji})/a_{ji}$ に変換するならば、共通観測イベント観測ログの S_j の内部時計 C_j の値 $C_j(t)$ は、 S_i の内部時計 C_i の値 $C_i(t)$ に変換される。すなわち、 $C_i(t) = (C_j(t) - o_{ji})/a_{ji}$ が満たされる。この等式は、 S_i と S_j のイベント観測ログに記録されたすべての共通観測イベントにおいて満たされる(図2)¹。逆に、多数の共通観測イベントではないイベン

¹ 共通観測イベント対でない場合でもこの等式が満たされることがある。

トの観測時刻の内部時計の値の対 $(C_i(t_k), C_j(t_l))$ において、誤って推定された相対オフセット o_{ji} と相対ドリフト a_{ji} によって $C_i(t_k) = (C_j(t_l) - o_{ji})/a_{ji}$ が満たされる確率は低いと考えられる²。すなわち、 o_{ji} と a_{ji} の推定値に対して、 $C_i(t_k) = (C_j(t_l) - o_{ji})/a_{ji}$ を満足するイベント観測時刻の内部時計の値の対 $(C_i(t_k), C_j(t_l))$ が多数存在するならば、この推定値は正しく、この内部時計の値の対は共通観測イベントの観測ログによるものである、というヒューリスティックの適用が妥当である。

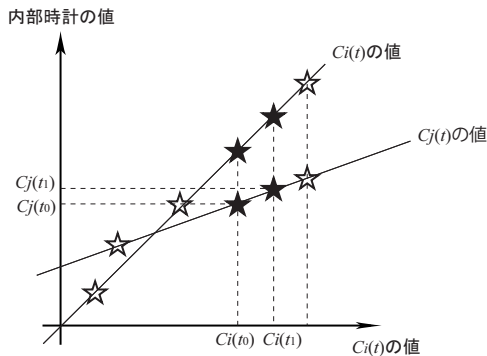


図 2: 共通観測イベント発生時刻における内部時計の値。

3 実装パラメータ設定

本論文で提案する共通観測イベント推定に基づくセンサデータ同期手法では、内部時計の値を変換する計算の丸め誤差や、イベントの発生時刻から無線センサノードにおいてそのイベントが記録される時刻までの時間とそのゆらぎによって、共通観測イベントにおいても変換した内部時計 C_i の値とイベント観測ログに含まれる C_i の値が等しくなることがある。これによって、共通観測イベントの検出が困難になることを回避するために、変換した内部時計の値とイベント観測ログに含まれている値との差の絶対値が定められた閾値を下回る場合には、これらの値が等しいとして扱う。ただし、この閾値を必要以上に大きく設定すると、単独観測イベントを共通観測イベントと誤って検出することがより起きやすくなり、また、この閾値を必要以上に小さくとれば、共通観測イベントが特定しづらくなることとなる。

この問題を確認するためにシミュレーション実験を行なった。図 3 に示すように $40\text{m} \times 70\text{m}$ の方形領域内に 2 つの無線センサノード S_i と S_j を配置する。センサ間距離は 10m , 20m , 30m であり、各無線センサノードの観測可能領域は自身を中心とする半径 20m の円内である。イベントの発生場所は、この方形領域内に均等分布し、イベントの発生は平均 10 回/秒のポアソン過程に従うものとする。観測時間を 1 秒から 10 秒として、安全率を 95% とした内部時計の変換値を等しいとする範囲の閾値の最大値、最小値をそれぞれ最大閾値、最小閾値として求めたものを図 4 に示す。すなわち、閾

² イベント発生頻度等に依存する。

値を最大閾値よりも大きくすると共通観測イベントでないイベント対を共通観測イベントであると判定する事例が生じ、閾値を最小閾値よりも小さくすると共通観測イベントであるイベント対を共通観測イベントでないと判定する事例が生じるという値である。閾値として許される値の範囲は共通観測イベント数に対して単調に短縮するが、その短縮の特性はセンサノード間距離の短縮、観測時間の延長のそれぞれに対して異なることが考えられる。論文 [2] におけるイベント発生頻度の増加による影響評価をもふまえて設定あるいは推定によって得られる実環境パラメータに応じて適切な閾値を選択する手法が必要である。

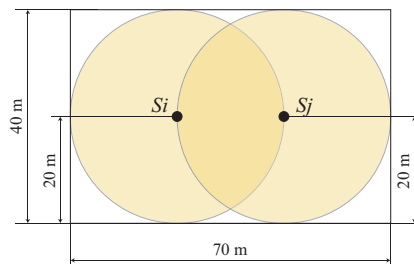


図 3: シミュレーション実験の設定

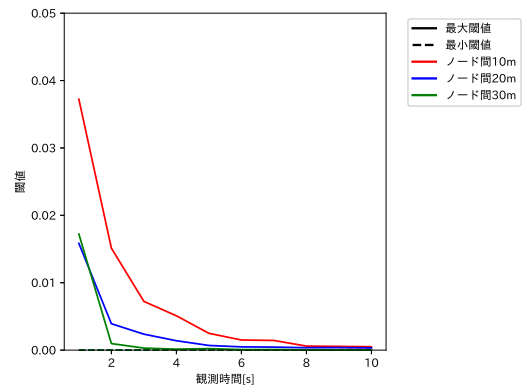


図 4: 環境パラメータと閾値

4 まとめ

本論文では、1 対の隣接無線センサノード間のセンサデータを同期する手法として、これらの無線センサノード間の共通観測イベントを推定する手法を提案した。ただし、この推定を正しく実現するためには、内部時計の変換値が「等しい」と判定する範囲を適切に定めることが必要である。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 永野, 松垣, "時計合わせのための通信を伴わないセンサデータ同期手法," 信学技報, vol. 123, No. 148, pp. 35-40 (2023).