

分散配置する複数センサノードのキャリブレーション手法の検討

A Study on Calibration Method for Distributed Multiple Sensor Nodes

○松島隆明*, 神田和也*

○Takaaki Matsushima*, Kazuya Kanda*

*鶴岡工業高等専門学校

*Tsuruoka National College of Technology

キーワード: キャリブレーション手法 (calibration method), センサネットワーク (sensor networks), センサノード (sensor node), 分散配置 (distributed deployment), MICA2 MOTE (MICA2 MOTE)

連絡先: 〒997-8511 鶴岡市井岡字沢田104 鶴岡工業高等専門学校 電気電子工学科 神田研究室
神田 和也, Tel.: (0235)25-9095, Fax.: (0235)24-1840, E-mail: kanda@tsuruoka-nct.ac.jp

1. はじめに

近年の半導体技術及び無線通信技術の急速な進歩を背景に無線センサネットワークが注目されている。多く分野で研究が盛んに行われており、今までにない新しいセンシングシステムが検討されている。現在、いくつかの実用的アプリケーションが提案されており、実証実験が行われているシステムも数多くある。多方面の分野に展開する上で解決すべき課題として、位置推定、時刻同期、低消費電力化などがある。特にセンサを用いた物理現象の計測とキャリブレーションは常に存在する課題であり、避けて通ることはできない。

本研究では、アクセスの制限や動的な環境変化などの制約の多い複数のセンサ端末を簡便に、かつ効果的にキャリブレーションするという課題に対し、これを解決するための手法を提案することを目的とする。

はじめに、世界で最も普及し、研究開発用に提供されているプラットフォームMICA2 MOTE(以下MICA2)を用いて温度計測実験を行い、結果を示す。結果から解決すべき課題を明確にする。

続いて提案手法の検討および検証を行うため簡易のセンサ端末を製作し、これを有線で接続したものをテストベッドとして製作し、MICA2とテストベッドで行った温度測定結果を示す。

次に2つの段階から成るキャリブレーション手法の提案を行い、実験の結果を用いて手法の処理手順を実際に示す。なお、本研究で使用するキャリブレーションとは、一般的な測定器の校正ではなく、センサネットワークをひとつの計測系とみなし、各端末の個体差を補正し真値により近い統一した値に収束させる事と定義する。無線センサネットワークにおけるキャリブレーションはネットワーク内の処理で行われることが目標であるが、本研究においては、データを収集するPCで処理を行う

ものとする。仮定するセンサ端末の状態は、配置密度が高く位置情報が明確であり、時刻同期がなされているものとする。

2. 計測上の課題

無線センサネットワークはまったく新しいアプリケーションを可能にする一方で、今までに無い計測上の課題を生み出している。センサから有用な計測結果を取得するためには結果の正確さと精密さについて常に検討されていなければならない。従来の単一センサのキャリブレーションは特定の条件と既知の測定対象をセンサに与えることによって、つまりセンサ出力と期待された値を比較することによって行われる。これはセンサの製造工程や出荷前、出荷後にも手動で行うことができる。センサ単体だけでなく、装置の一部として組み込まれた状態でも行われていなければならない。計測装置が時間とともに経時変化やその他の要因の影響を受けるために、正しい測定を行うためには定期的にキャリブレーションを行うことが必要である。しかし、数百から数千個またはそれ以上のセンサ端末で構成される大規模なセンサネットワークでは手動によるものや、単一センサと同じ手法をとることは現実的ではない。また以下のようなセンサ端末の状況も従来手法の実行を難しくする。

- センサへのアクセスの制限
- センサの設置状況の複雑で動的な環境変化
- センサのドリフト（経時変化、腐食、損傷等）

上記の条件をクリアするための手法がいくつか提案されている¹⁾。しかし、ほとんどのものが位置推定を行うためのものであり、温度や照度などを対象にしたキャリブレーション手法を扱っているものは少数である。複雑な計算によってキャリブレーション可能なことを示す手法も存在するが、センサネットワークに使用される端末に搭載するマイ

クロプロセッサは、電源の要求から、一般に処理速度を抑え、低消費電力動作が可能なものが採用される。そのような状況から、複雑な手法を実装するのはあまり現実的でないと考える。本研究では温度を対象にした、簡便かつ効果的な手法の提案を目的とする。

3. MICA2による基礎実験

3.1 MICA2の概要

MICA2は米国Crossbow社が販売しているセンサネットワーク用のプラットフォームである。MICA2のハードウェア仕様をTable1に示す。

Table 1 The specification of MICA2.

Processor	Atmel ATMega128L
RF Transceiver	Chipcon CC1000
RF frequency band	313.9~316.1MHz
Power source	AA Battery 2x
External I/O	DIO,10bitADC,I2C,UART,etc

MICA2にはセンサ類は搭載されていないため、オプションのセンサボードMTS310CAを搭載する。外観写真をFig.1に示す。MTS310CAはTable2に示すセンサを搭載した基板である。温度センサのみを使用した。

Table 2 On-board sensors.

Photocell	CdSe Cell
Temperature	Thermistor
Microphone	Condenser Microphone
Accelerometer	2-Axis Accelerometer
Magnetometer	2-Axis Magnetometer

3.2 評価実験

本実験では、MICA2の温度、電源電圧を測定し、センサ出力のばらつきや電源電圧との相関を確認する。実験環境をFig.2に示すように恒温槽(三洋電

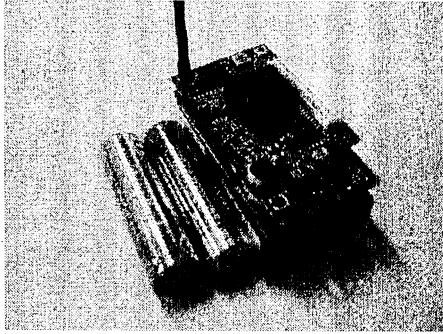


Fig. 1 MTS310CA mounted on a MICA2.

機社製MIR-153)に8台のMICA2を40[mm]等間隔に並べる。MICA2のアンテナの指向性を考慮してすべてアンテナは垂直に立てた状態にした。PCに接続されているMICA2を取り付けたMIB510は恒温槽外に配置した。恒温層の扉にはアクリルの窓があり、窓の前に基地局のMICA2のアンテナを真下に垂らすことで通信が行えることを確認した。槽内の温度は30[°C]に設定する。MICA2の管理およびデータ収集ソフトウェアとしてWindows環境で動作する、MoteView1.4B (Crossbow社製 以下、MoteViewと呼ぶ)を用いた。なお、実験に使用したMICA2を識別するため以下、Node1, Node2, …と記すことにする。

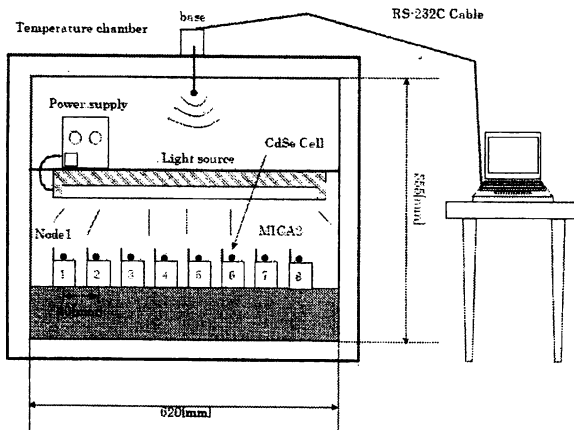


Fig. 2 Schematic description of Experimental environment.

3.3 実験結果

個体差を明確に示すために評価環境内でMICA2を1時間稼働させたときの電源電圧、温度測定値をFig.3, Fig.4に示す。恒温槽内温度の安定を待つため、測定を開始する前に1時間以上運転を行っている。そのため温度が安定するまでのデータは除外している。また、Fig.4に示す温度測定結果には恒温槽の温度制御による周期的な温度変動が現れている。この温度変動の2周期分を抽出した温度測定グラフをFig.5に示す。Fig.3とFig.4の結果から電源電圧と温度測定値との相関関係は見られなかった。

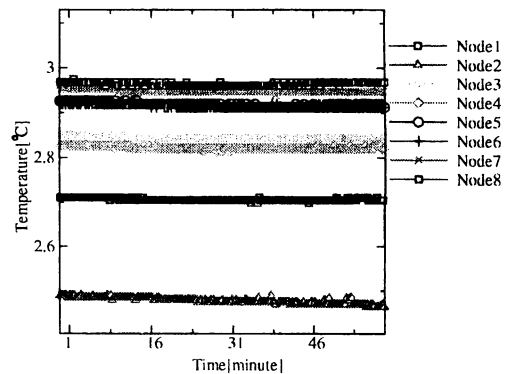


Fig. 3 Experimental result of battery voltage.

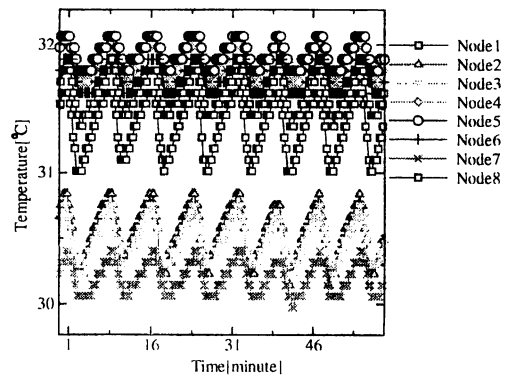


Fig. 4 Experimental result of temperature in the Temperature chambers.

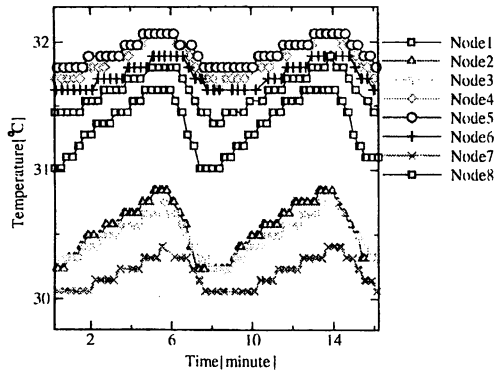


Fig. 5 Experimental result of temperature in the Temperature chambers. (Two period)

4. テストベッドによる実験

4.1 センサ端末仕様

本研究では提案する手法を検討, 実験するためのテストベッドをPIC (米国Microchip Technology社製) を用いて製作する. 今回はセンサ端末に16F819, 端末とPCの接続に16F88を用いた. 16F819と16F88は共に内部発信回路を持っており, 周辺回路をほとんど必要としない. センサ端末の16F819はAD変換端子が5チャンネルと多く, 今後のセンサ増設や変更を考慮して選択した. また, 16F88はフラッシュROMとSRAMの容量が大きくプログラムが複雑になっても十分対応できることから採用をした. プログラムはC言語を使い, CCS社のクロスコンパイラを用いて開発を行った. センサ端末には, スイスのSensirion社が製造するデジタル温湿度センサSHT11を使用する. センサとアナログ回路, A/D変換, メモリ, インターフェース回路がシングルチップ上に形成されており, 2線式のデジタルインターフェースからデジタル出力で相対湿度と温度データを得ることができる. MICA2に接続するセンサボードMTS400CAに搭載されていることや信号増幅回路等の周辺回路の必要が無く, 端末をシンプルにできることから採用することにした. センサの仕様をTable3に示す. また, 外観写真をFig.6に示す.

Table 3 Summary of the Sensirion SHT11's Specifications.³⁾

Sensor Type	Sensirion SHT11	
Channels	Humidity	Temperature
Range	0to100[%]	-40[°C]to80[°C]
Accuracy	±3.5[%RH](typical)	±2[°C]
Resolution(Max.)	12bit	14bit
Operating Range	2.4to5.5[V]	
Interface	2-Wire digital interface	

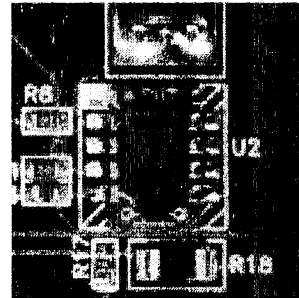


Fig. 6 Photo of the SHT11.

4.2 通信仕様

設計製作したセンサ端末の回路の構成図をFig.7に示す. 電源電圧は5[V]である. 端末間の通信はI2Cバスを用いた. I2Cバスは2線式のシリアルバス規格で, 複数のICとデータ通信を行うことができる. PICにはシリアル通信用のレジスタが内蔵されており, このレジスタを用いることで通信できる. またラインドライバなどのICも必要としない. 16F819はSHT11との通信と基地端末に使用する16F88との通信制御のみを行う.

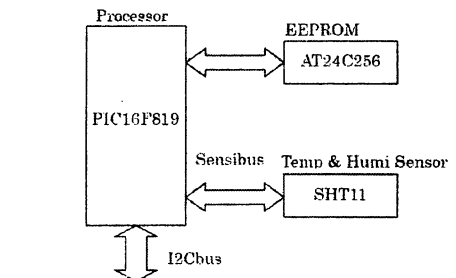


Fig. 7 Block diagram of the sensor unit.

提案する手法を検証するため, 製作したセンサ

端末を用いたテストベッドの構成図をFig.8に示す。各端末とPCとの通信は基地端末を介して行われる。通信方式はマスター-スレーブ方式で、各端末の測定データを取得し、測定データに端末番号を付加してPCへRS-232C経由で転送する。PCにて時刻を付加し、集められた測定データをプログラムによって処理を行い各端末の補正値を算出する。

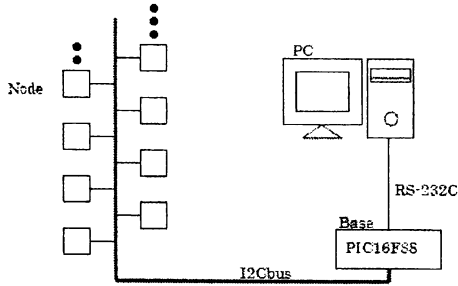


Fig. 8 Construction of Communication system of the Testbed.

4.3 実験

MICA2による評価実験と同様の環境を用いて温度測定を行った。10台のセンサ端末のセンサ部が40[mm]の等間隔となるように並べた。無線通信ではないため、必要な配線は恒温槽の左側面の測定穴より取り出した。温度を14bitで測定するため、センサの仕様により高速なサンプリングは行えず、6秒間隔で温度データを取得するよう設定した。

4.4 実験結果

1時間連続測定データをFig.9に、温度変動の約2周期分を抽出したグラフをFig.10にそれぞれ示す。Fig.10より、センサ間で応答速度、変化率などの特性に違いがあることが確認できる。また、それぞれ個体差を有していることがわかる。

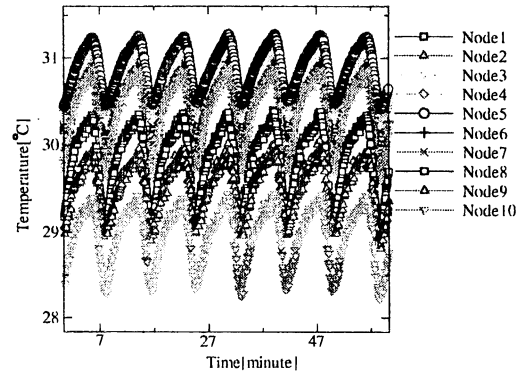


Fig. 9 Experimental result of using SHT11 in the Temperature chambers. (One hour)

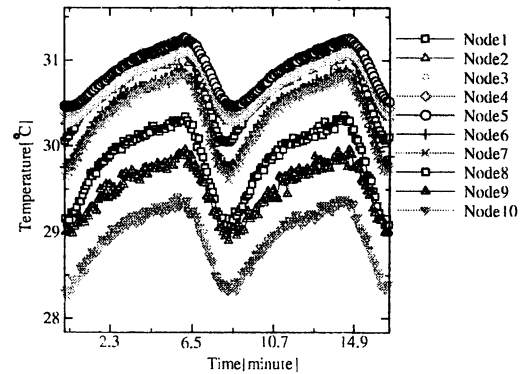


Fig. 10 Experimental result of using SHT11 in the Temperature chambers. (Two period)

5. キャリブレーション手法の提案

5.1 手法

提案するキャリブレーション手法の目的は複数のセンサ端末をひとつの計測系として捉え、系の中でもっとも真値に近い基準値が求まるように各センサ端末のばらつきを取り除くことである。また、センサ端末は、配置密度が高く、位置特定済みであり、時刻同期がなされているものと仮定する。また、使用するセンサはヒステリシス特性の無いものとする。提案する手法は2段階に分かれている。第1段階で計測値の変化などから同一の現象を測定していると思われるセンサ端末のペアを検出する。同一の現象を測定しているという判定も難しい課題であるが、本研究では取り扱わない。2段階で検出した2つの端末をNodeA, NodeB

とし、時刻 T_i における測定値をそれぞれ A_i, B_i とする。同時刻の同一現象を測定している状態であれば $A_i = B_i$ となる。NodeAの値をX軸に、NodeBの値をY軸にとり、 $[A_i, B_i]$ となるようプロットする。どのくらいのプロット数あるいは時間の範囲で行うのかは使用するセンサや計測対象によって、異なると考えられる。これについての検討は今後の研究課題である。これをFig.11に示す。散布図は $y = x$ となることが理想である。しかし何らかの原因で $y = x$ となることはまれである。Fig.11の散布図から最小二乗法の式(1)(2)を用いて a, b を求め近似式 $y = ax + b$ 導く。

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n A_i B_i - \sum_{i=1}^n A_i - \sum_{i=1}^n B_i}{n \sum_{i=1}^n A_i^2 - (\sum_{i=1}^n A_i)^2} \quad (1)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^2 \sum_{i=1}^n B_i - \sum_{i=1}^n A_i B_i \sum_{i=1}^n A_i}{n \sum_{i=1}^n A_i^2 - (\sum_{i=1}^n A_i)^2} \quad (2)$$

a はグラフの傾きであり同一のセンサを使用していればほぼ1の値を得られるはずである。NodeAを基準として考えれば、 a の値が1からどれほど差異があるかで、NodeAに対してNodeBの出力特性がどの程度違うのか見ることができる。 b は x 軸に取った端末との個体差と考えることができる。こちらもNodeAを基準とすれば、 b の値の差異の大きさによって、NodeBの各時刻での測定値が平均的にどのくらい違いがあるのかを見ることができる。得られた a 及び b の値を適切に処理し、補正値を導き出すことによって端末ごとの計測値のばらつきを少なくすることができる。これを全ノードにおいて繰り返し行うことによってばらつきの補正が行える。

5.2 実験データへの適応

基礎実験で得られたデータに提案する処理を行うとFig.12とFig.13が得られる。Fig.12及びFig.13は恒温槽内温度測定で得られた周期変動を示しているFig.5のNode4とNode7、及びNode4とNode8

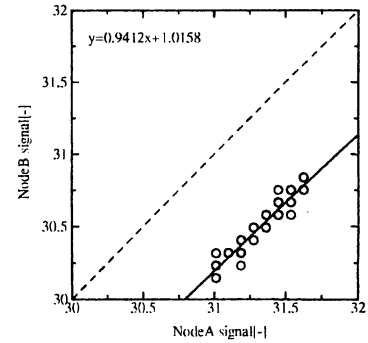


Fig. 11 Scatter plot of time synchronized signals. A data point on this plot is pair of data values taken by the two sensors at exactly the same instant in time. X-axis corresponds to a value reported the NodeA signals; Y-axis corresponds to the value reported by the NodeB signals.

の組み合わせデータから得られる。 $[a, b]$ の値はそれぞれ $[0.7950, -4.8595]$, $[1.0414, -1.5776]$ であった。 a の値はほぼ1に近くなり予想通りであったが、 b の値はFig.5から見て取れる個体差よりも大きな値が出ており、一致していないとわかる。

テストベッドによる実験で得られたFig.10のデータを基に処理を行うとFig.14とFig.15が得られる。 $[a, b]$ の値はそれぞれ $[0.6993, 9.2108]$, $[1.1007, -3.9928]$ となった。こちらも b の値が処理前のデータから推察できる個体差よりもかなり大きくなっている。

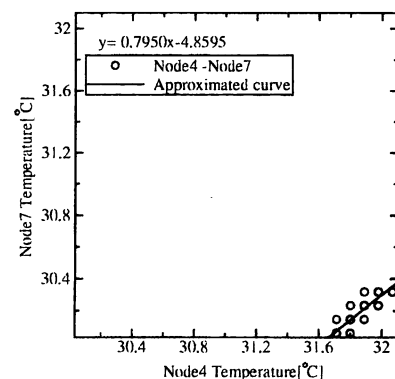


Fig. 12 Scatter plot of Node4-Node7 signals.

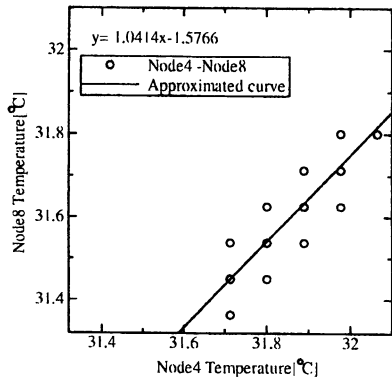


Fig. 13 Scatter plot of Node4-Node7 signals.

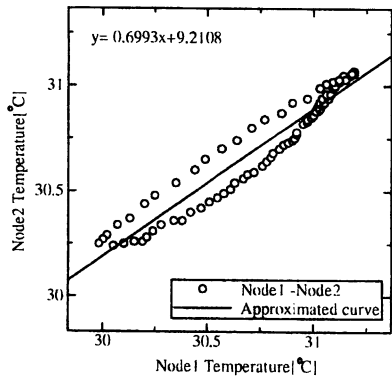


Fig. 14 Scatter plot of Node1-Node2 signals. (Using SHT11)

6. おわりに

現在一般に入手可能であるセンサネットワークプラットフォームMICA2Moteを用いて、各端末の個体差がどの程度であるかを3章の評価実験結果で示した。

評価環境での結果から電源電圧とセンサ出力及びAD変換値との相関関係を見出そうとしたが、今回使用したCdSeセルやサーミスタでは顕著な相関を見ることはできなかった。

提案した手法について実験データから実際のaとbの値を算出し、データをとることができた。ほぼ1の値を示すと予想したaが大きくばらついてしまうことが確認できた。aとbについての関係や処理方法の定式化などにより、踏み込んだ検討を行う必要がある。また、aとbの値を用いて個々にデータにフィードバックすることにより、適正に

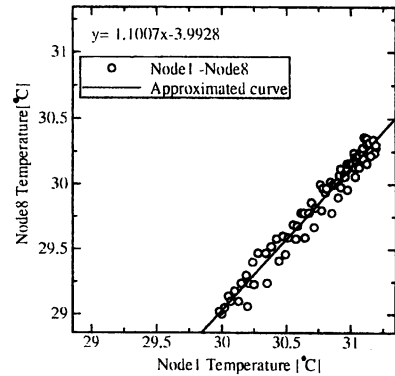


Fig. 15 Scatter plot of Node1-Node8 signals.(Using SHT11)

キャリブレーションが行われることを検討したい。今後もテストベッドの改良及び実験を行い、提案する手法の検討を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) Bychkovskiy V., Megerian S., Estrin D., and Potkonjak M. "A Collaborative Approach to In-Place Sensor Calibration" In Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks 2003, 301/316 (2003)
- 2) 中村邦雄: 計測工学入門, 森北出版 (2001)
- 3) 有限会社シスコム デジタル温湿度センサSHT1x / SHT7x Data sheet (ver 2.01)