

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330098

研究課題名(和文) センサネットワークにおけるセンサデータの自己修復に関する研究

研究課題名(英文) Self-healing sensor data for wireless sensor networks

研究代表者

鄭 顕志 (Tei, Kenji)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・准教授

研究者番号：40434295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、センサデータに含まれるエラーを自動で除去する無線センサネットワークの自己修復手法を提案した。センサデータに含まれるセンサエラーは、物理状態の推定精度を落とす主要因となるため、可能な限り除去する必要がある。センサエラーは、ハードウェアの異常や物理環境の影響によって様々な種類があり、稼働時間とともに増大するため、無線センサネットワークを実運用する際の障害となっている。そこで、本研究では、人手を介さずにセンサエラーを除去することを目的とし、ソフトウェアによって稼働中にセンサエラーを検知・分類・除去する、スケーラビリティの高い自己修復手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a self-healing technique to automatically correct data faults in sensor readings obtained from wireless sensor network. Sensor data naturally includes data faults and the faults should be corrected as much as possible in order to prevent depraving estimation accuracy caused by the faults. Recent studies showed that there are some well-known types of faults, and that faults will increase during operating of systems. In this research, we proposed scalable self-healing techniques that automatically identify, classify, and correct sensor faults to eliminate faults without human intervention.

研究分野：自己適応システム

キーワード：自己修復 センサネットワーク

1. 研究開始当初の背景

センサノードと呼ばれる、センサを搭載した複数の小型コンピュータ間の無線通信によって構築された無線センサネットワーク(Wireless Sensor Network:WSN)(図1)技術の発展により、**物理環境を観測するシステム**が容易に構築可能となり、実用化が進んでいる。

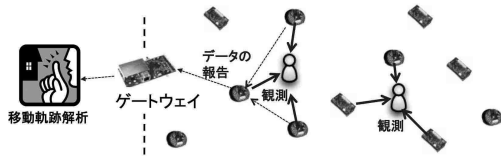


図1.無線センサネットワーク

WSN はその設置容易性により、**都市規模の広域な物理環境用の観測インフラ**としても活用され始めている。都市内に設置された WSN から得られたセンサデータを解析することで**都市内の様々な情報をリアルタイムに扱える**ようになり、より迅速かつ柔軟な市民サービスを提供する、いわゆる**スマートシティ**に関する取り組みが、国内外の様々な都市で活発に行われている。**[問題] WSN から得られたセンサデータには、真の値からずれるセンサエラーが含まれることが知られている。センサエラーは、都市情報の推定精度を低下させ、誤った意思決定を行う原因となる**ため、可能な限り除去することが求められる。

**センサエラーの混入を仮定し、その影響を抑える手法**として、**データ集約**が広く用いられている。同じ対象を観測できるセンサノード群から得られたセンサデータに対し、平均値や中央値などのデータ集約を行うことで、個々のセンサデータに含まれるエラーの影響を抑えることができる。しかしながら、センサエラーは時間とともに増大するため、**WSN を長期稼働する場合、データ集約後のデータに含まれるエラーの増大を避ける事はできない**。

また、**センサエラー自体を除去する手法**として、**システム稼働前のセンサデバイスキャリブレーション**が広く用いられている。キャリブレーションでは、真の値とセンサノードから得られたデータを比較し、その差を最小化するようにセンサノードを補正する。しかしながら、**稼働前のキャリブレーションでは稼働中に発生するセンサエラーを除去することはできない。WSN においてセンサエラーを引き起こす原因**には、**ハードウェア上の変化**(センサノードのバッテリー残量の低下による電圧の変動や、センサデバイスの接触不良など)や、**物理環境上の変化**(障害物等による観測の障害)などがある。**これらの変化は稼働中**

**に発生するため、稼働前のキャリブレーションでは除去することができない**。稼働中に定期的にキャリブレーションを行うことも考えられるが、保守のコストが増大するため、センサノード数が膨大なスマートシティでは現実的には実施困難である。

センサエラーを除去するための保守コストを抑えるために、**ソフトウェアによる WSN 自己修復手法**が提案されている。WSN 稼働時に、ソフトウェアが各センサノードから得られたデータを解析することでセンサエラーの発生を検知し、センサエラーに対する適切な補正をセンサノードに対して行うことで、**人手を介さずセンサエラーの除去を行うことが可能**となる。

しかしながら 既存の自己修復手法には次のような2つの問題がある。

**(問題1) 単一種のセンサエラーのみ対応**

**センサエラーは真の値からのずれ方によって様々な種類に分類**できることが知られている。代表的なセンサエラーの種類としては、真の値から定期的に固定値分ずれる bias, ずれが時間とともに大きくなる drift, 突発的にずれが大きく増減する random などがあり、エラーの種類によって除去のための補正方法が異なる。

しかしながら、**既存の自己修復手法は単一種のエラーのみしか検知・除去できない。実際のセンサノードから得られるデータには複数種類のエラーが混在**するため、従来の自己修復手法では十分にエラーを除去することが困難である。

**(問題2) スケーラビリティの不足**

従来の自己修復手法は、**小規模な WSN のみを想定し、単一の管理サーバによる集中型のエラー分類・除去**を行っていた。しかしながら、スマートシティで用いられる大規模な WSN では、**構成ノード数が数百、数千以上**となる。(例えば、スペインのサンタンデル市で実際に設置・運用されている WSN は **2万個のセンサノードが用いられている**。) **既存の自己修復手法では、このような広域な環境を扱う大規模な WSN には適用できない**。

2. 研究の目的

本研究では、**大規模な WSN を対象として、複数種類混在するセンサエラーを検知・除去する自己修復手法の確立**を目標としている。そこで、本研究では、**センサエラー分類に基づく分散型の自己修復手法**を提案する。具体的には、期間内に準備項目と研究テーマ1,2を実施する。

準備項目:センサエラー分類モデルの提案

複数種類のセンサエラーが混在するデータからエラーを除去するためには、**混入し**

ているセンサエラーの検知・分類が必要となる。そこで、センサエラー分類モデルが構築する。bias, drift, random といったよく知られたセンサエラーを定式化し、決定木として分類モデルを構築する。

研究テーマ 1:センサエラー分類に基づく自己修復手法

センサエラー分類モデルに基づき、実行時にセンサエラーを検知・分類・除去する自己修復手法を提案する。研究テーマ1では、集中型の自己修復手法を提案する。複数種類混在するセンサエラーを除去するためには、どの種類のセンサエラーが含まれているかを検知・分類する必要がある。そこで、各センサノードから得られたセンサデータを時間的・空間的に解析して特徴量を抽出し、センサエラー分類モデルに基づいて含まれているセンサエラーの検知・分類を行う。また、エラー分類結果に従って各ノードに対しての補正を行うフレームワークを構築する。また、センサエラーの検知・分類精度を向上させるため、センサエラー分類モデルの学習手法を提案する。

研究テーマ 2:自己修復手法の分散化  
研究テーマ1で構築した集中型の自己修復手法を大規模な WSN でも適用可能とするために、自己修復手法の分散化を行うことでスケーラビリティの向上を図る。単一の管理サーバで行っていたセンサエラーの検知・分類を各ノード上で実施可能とするために、ノード間でのセンサデータの特徴量を共有する手法と、各ノード上での軽量のエラー検知・分類、学習手法を提案する。

### 3. 研究の方法

本研究(図 3)では、準備項目と研究テーマ 1,2 に分けて実施した。

#### 準備項目:センサエラー分類モデルの提案(担当:鄭)

**[提案内容]** bias, drift, random 等、複数種類のセンサエラーを検知・分類のためのセンサエラー分類モデルを提案した。

**[解決のアプローチ]** 公開されているセンサデータセットや文献調査を通じて、各センサエラーの特徴を定式化した。センサエラーは、発生後に継続性(恒常的に続くものや一時的のみ現れるもの)、ずれの挙動などに違いがあるため、それらの特徴の差異を分析し、決定木としてエラーの分類モデルを定義した(図 2)。また、新たな種類のエラーの出現に備え、センサエラーモデルを拡張可能のようにモデル化した。

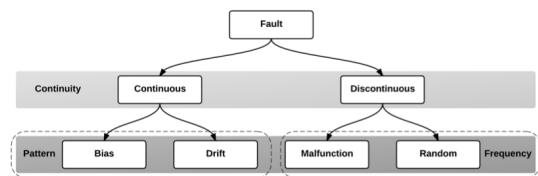


図 2. エラー分類モデル

#### 研究テーマ 1. センサエラー分類に基づく自己修復手法 (担当:鄭・本位田)

**[提案内容]** 準備項目で用意したセンサエラー分類モデルに基づき、実行時にセンサエラーを検知・分類・除去する、集中型の自己修復手法を提案した。

**[解決すべき課題]** 各センサエラーの挙動は使用するハードウェアや実行環境によって異なる。また、稼働中に起こる変化によってその挙動は変わりうる。これらの変化は、センサエラーの分類・除去精度を悪化させる要因となる。

**[解決のアプローチ]** 管理サーバにおいて収集されたセンサデータに対して時空間的解析によって特徴量を抽出し、センサエラー分類モデルに基づいてセンサエラーを検知・分類し、その結果に基づき各ノードに対して適切な補正を実施するフレームワークを構築(図 3)した。さらに、長期間にわたって高精度でエラーの分類・検知を行うために、統計的パターンマッチングを用いてセンサエラー分類モデル自体の最適化を行った。

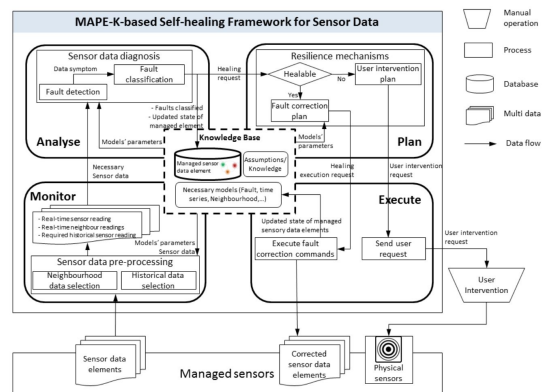


図 3. 自己修復フレームワーク

#### 研究テーマ 2. 自己修復手法の分散化 (担当:鄭・本位田)

**[提案内容]** 大規模な WSN に対して自己修復の適用を可能とするために、各ノード上で自身のノードに含まれるセンサエラーの検知・分類・除去を行う分散型の自己修復手法を提案した。

**[解決すべき課題]** 各ノード上でエラー検知を行うには、各ノードがその周辺ノードの観測データを収集する必要があり、通信量が増大してしまう。また、各センサノ

ドの計算資源は乏しいため、最適化による負荷を抑える必要がある。

**[解決のアプローチ]** まず、通信量の増大を抑えたエラー検知を実現するセンサノード間のセンサデータ共有手法を提案した。センサデータの共有範囲を変更することでエラー検知の精度と通信量のトレードオフの調整を可能とし、ノードの配置密度と観測対象との位置関係に応じて共有範囲を最適化することで不必要な通信量の増大を抑制した。具体的には、Dynamic Time Wrapping によって各ノードの計測データの近さをモデル化し、k-means++によってエラー検出のためのデータ共有範囲に用いるクラスタを作成する手法を構築した。このように単純なユークリッド距離ではなく、計測データの性質に着目したクラスタリングを行うことで、不要なデータ送信を削減する。また、**センサモデルの最適化に関する情報もノード間で共有することで、計算量を抑えかつ収束の早いセンサエラーモデル最適化手法を提案した。**

#### 4. 研究成果

実験室での評価と、実スマートシティプロジェクトでの実証評価を行った。

##### 実験室での実験評価：

実験室内に 16 台のセンサノードを配置し実験を行った(図 4)。

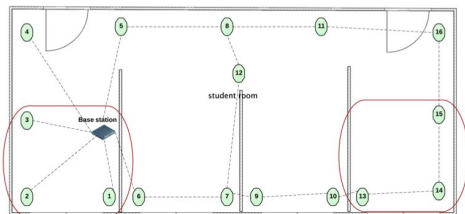


図 4. 実験室でのセンサノード配置

データ計測結果から 2 つのノードクラスタを構成し、クラスタ内で時系列データを比較することで、エラーの検知、分類、除去を行った。検知、分類結果を図 5 に、自己修復によるエラー除去結果を図 6 に示す。自己修復により、エラーを削減する効果があることが確認された。

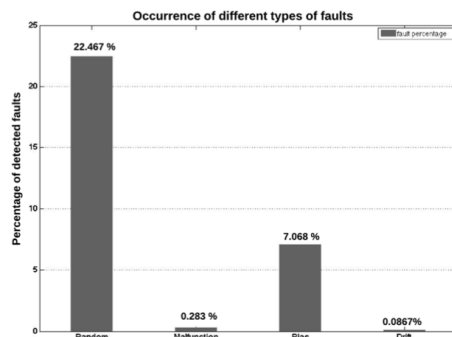


図 5. エラー検知, 分類結果

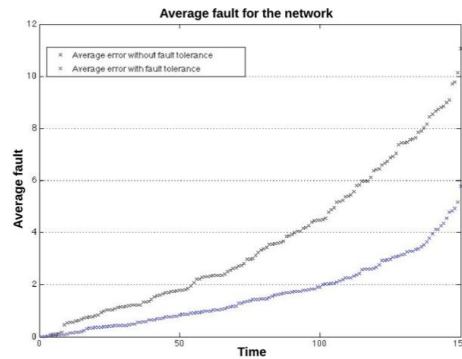


図 6 エラー除去結果

##### 実証実験での評価:

スペインサンタンデル市で配備、運営されている SmartSantander での実証実験を行った。図 7 に示すような、実都市に配備された環境センサーから得られたデータをリアルタイムで自己修復する実験を行った。ノードのクラスタリングには、Dynamic Time Wrapping に基づく k-means++によるクラスタリングを用いた。



図 7. サンタンデル市の環境センサノード

生データの例を図 8 に、同ノードの自己修復後のデータを図 9 に示す。自己修復によって多発していた突発的なセンサエラーが修復できていることが確認できる。また、クラスタリングの効果により、実用上も問題ない応答速度で自己修復を実現することが確認できた。

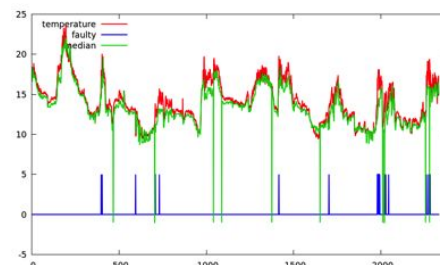


図 8. 生データ

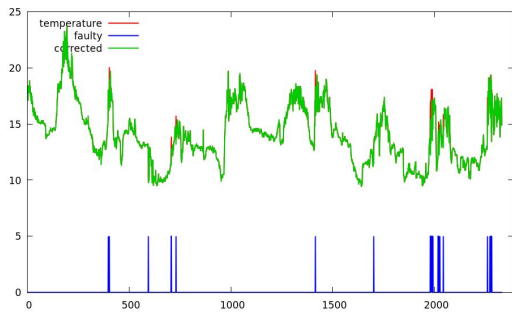


図 9. 自己修復後のデータ

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. Ehsan Ullah Warriach, and Kenji Tei: A Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms for Faults Detection in Wireless Sensor Networks, International Journal of Sensor Networks (IJSNet), Vol.24, No.1, pp.1-13, 2017. (to appear) 査読有
2. 末永 俊一郎, 鄭 顕志: EVM を利用した DBC アプリケーションのための適応フレームワーク, 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.5, pp.1363-1376, 2015 年 7 月. 査読有. <http://id.nii.ac.jp/1001/00142015/>
3. Kenji Tei, Ryo Shimizu, Yoshiaki Fukazawa, Shinichi Honiden: Model-Driven-Development-based Stepwise Software Development Process for Wireless Sensor Networks, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol.45, No.4, pp.675-687, April 2015. 査読有. DOI: 10.1109/TSMC.2014.2360506

〔学会発表〕(計 8 件)

1. L. Nahabedian, V. Braberman, N. D'Ippolito, S. Honiden, J. Kramer, K. Tei, S. Uchitel: Assured and correct dynamic update of controllers, the 11th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2016), pp.96-107, Austin, USA, 16-17 May 2016. 査読有
2. Bas de Bruijn, Tuan Anh Nguyen, Doina Bucur, and Kenji Tei: Benchmark Datasets for Fault Detection and Classification in Sensor Data, 5th International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS 2016), pp.185-195, Rome, Italy, 19-21 February 2016. 査読有
3. Tuan Anh Nguyen, Marco Aiello, Takuro Yonezawa and Kenji Tei: A Self-healing Framework for Online Sensor Data, 3rd International Workshop on Self-Aware

Internet of Things (Self-IoT 2015), pp.295-300, Grenoble, France, 7 July 2015. 査読有

4. Ryo Shimizu, Kenji Tei, Yoshiaki Fukazawa, Shinichi Honiden: Toward A Portability Framework with Multi-Level Models for Wireless Sensor Network Software, The 2014 International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP 2014), 香港, 中国, November, 2014. 査読有
5. Ryo Shimizu, Kenji Tei, Yoshiaki Fukazawa, Shinichi Honiden: Supporting Model Transformation Developments with Multi-Level Models: A Wireless Sensor Network Case, the 11th International Conference Applied Computing 2014 (AC 2014), Porto, Portugal, 25-27 October, 2014. 査読有

6. Kenji Tei, Shunichiro Suenaga, Shun Lee, Kazuya Aizawa, Ryuichi Takahashi, Yoshiaki Fukazawa: HoppingDuster: Self-adaptive Cleaning Robot based on Aerial Vehicle, The 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2014), Adjunct Publication, pp.271-274, Seattle, USA, 13-17 September, 2014. 査読有
7. Shunichiro Suenaga, Kenji Tei: Project Management Inspired Framework for Action Selection in Wireless Sensor Networks, Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob 2014), pp.54-59, Bali, Indonesia, 28-30 August, 2014. 査読有
8. Shengbo Xu, Yuki Inoue, Tetsunari Inamura, Hirotaka Moriguchi, Shinichi Honiden: Sample Efficiency Improvement on Neuroevolution via Estimation-Based Elimination Strategy, The 13th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2014), pp.1537-1538, Paris, France, 5-9 May 2014. 査読有

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鄭 顕志 (TEI Kenji)

国立情報学研究所・

アーキテクチャ科学研究系・准教授

研究者番号: 4 0 4 3 4 2 9 5

(2)研究分担者

本位田 真一 (HONIDENE Shinichi)

国立情報学研究所・

アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号：70332153