

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：32612
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2017～2020
課題番号：17K01339
研究課題名(和文) 環境計測用IoT機器と時系列データ予測の研究

研究課題名(英文) Research on IoT devices for environmental measurement and time series data forecasting

研究代表者
松本 佳宣 (Matsumoto, Yoshinori)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：60252318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：環境情報をセンサ・IoT技術により測定・収集して、クラウドサーバー上で時系列データ予測と警告を行うシステムの研究・開発を行った。初年度は、主にハードウェアの開発と実証実験と可視化を行った。2年目はそれらのデータ解析や、機械学習アルゴリズムにより予測・警告するシステムの構築を行った。3年目は、時系列データである環境計測データの中で、時系列データからの予測を目的としてLong Short Term Memory(LSTM)を用いて機械学習を行った。社会実装としては、太陽電池駆動のIoT式PM2.5・NO2・温湿度測定器を開発して、東アフリカ・ウガンダに設置を行い気象予測に取り組み精度の向上を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間を通じて申請書記載の3つの技術課題を達成することで「途上国向けIoT環境モニタリングポスト」を実現して途上国が導入・長期運用可能な装置を実現する事ができた。高耐久自立電源が実現できた事から、電源がない地方や山林・荒野における環境モニタリングが増加させることができ大気環境の定量化が可能となる。このデータと機械学習予測を組み合わせることで大気環境の把握が可能となり適切な環境改善対策の立案や防災に生かすことが可能となる。さらに、IoT技術によりクラウドを介在させ可視化しつつ長時間の環境データを蓄積して環境研究に役立つ事や市民が環境情報にアクセスすることで健康被害を防ぐことが可能となる。

研究成果の概要(英文)：We researched and developed a system that measures and collects environmental information using sensors and IoT technology, and provides time-series data prediction and warning on a cloud server. In the first year, we mainly developed hardware and conducted demonstration experiments and visualization. In the third year, we conducted machine learning using Long Short Term Memory (LSTM) for prediction from time-series environmental measurement data. In the second year, we conducted machine learning using Long Short Term Memory (LSTM) for forecasting from time-series environmental measurement data. As for social implementation, we developed solar-powered IoT PM2.5, NO2, temperature and humidity meters and installed them in Uganda, East Africa, to improve the accuracy of weather forecasting.

研究分野：センサ、IoT

キーワード：センサ IoT 機械学習 可視化 クラウド 時系列データ 環境計測

1. 研究開始当初の背景

近年、放射線、PM2.5、CBRNE テロ（ダーティーボム）、ゲリラ豪雨による土砂災害といった新しいタイプの環境リスクが顕在化している。このため環境情報を確実に収集して予測を行い、災害時に甚大な被害が出る前に自治体などへ警告を出すシステムが要望されている。放射線や PM2.5 については、放射線モニタリング情報や大気汚染物質広域監視システムや SPEEDI などのシミュレータが整備されてきたが、これらは役所などの限られた場所の測定であり、実際の生活圏（民家、農地、森林等）での個別状況を知ることはできない。本研究は、IoT センサ、時系列データ予測、機械学習による確率予測の3つの要素を組み合わせることでこの実現を目指す点に意義がある。学術的には IoT センサの屋外環境における対候性や長期安定性を高めることと不確かさの低減、時系列データ解析への新しい手法の提案、特に機械学習と時系列リアルタイム計測データへの融合を高める点が新規な点となる。Internet of things(IoT)の Things はこの世界に存在するあらゆる「形あるモノ」を示し、無線インフラ、データベースによりこれらのモノからサービスが生み出される事を表しているが、環境計測の IoT 化による新サービスが内外で期待されている。

2. 研究の目的

環境情報をセンサ・IoT 技術により測定・収集して、クラウドサーバー上で時系列データ予測と警告を行うシステムをハードウェアおよびソフトウェア両面から研究・開発を行う。太陽電池駆動の Wi-Fi 式測定モジュールと 3G WiFi ルータの対候性・長期安定性を向上させ、クラウドサーバーにデータを間欠的に送信させ、データをユーザに可視化させる機能とセンサデータの上限值や上昇値などに応じてユーザ・自治体などへ警告メールを送信するなどの機能を持たせる。予測と警告のアルゴリズムに関して、時系列データの状態空間モデルなどを基本に機械学習によるパラメータ更新と連動させて警告、短期予測、長期予測の機能実現を目指し、自治体などで運用実験を行い防災・減災の一助を果たす枠組みを構築する。PM2.5 とは粒径 2.5 μm 以下である大気中の粒子状物質を指し、PM2.5 濃度の上昇により健康、特に呼吸器官への悪影響があることから測定機の需要は高まっている。本研究では、PM2.5 の測定対象としてアジアやアフリカなどの途上国をターゲットとした。汚染が深刻なインドや中東各国でも州毎に 1カ所程度のモニタリングポストしか無く、一方でアフリカでは、政府が公式に管理する環境モニタリングポストが東アフリカに 3カ所あるのみであり、先進国のモニタリングポスト数・密度と比較して大きな開きがある。今後経済発展が見込まれるアジア・アフリカ諸国を念頭に、研究代表者が培ってきた IoT 技術、半導体センサ技術を用いて高耐久な IoT 環境ステーション（モニタリングポスト）を開発し、実フィールドでの動作実証を行い、途上国での環境アセスメント、健康影響評価に寄与する事を目的とする。PM2.5 は、様々な発生要因・変動が複雑に絡んでおり予測が難しい。そのような中データドリブンな予測手法と IoT を用いた PM2.5 の測定データ取得を用いた PM2.5 の予測研究を行った。データドリブンな予測手法の代表例として、機械学習の一種である LSTM(Long-short term memory)を用いたディープニューラルネットワークによる予測手法がある。我々は離散ウェーブレット変換[1]を行い、その係数を予測対象にすることで予測精度向上を試み PM2.5 濃度データに対して先行研究同様の予測と、ウェーブレット変換を用いた予測を行い、精度向上の確認を目的とした。一方、近年の環境災害に対して災害時に甚大な被害が出る前に自治体などへ警告を出すシステムの構築を目指して、

オープンデータの活用とその機械学習に取り組んだ。現在最も利用されている風速予測システムは、気象庁の数値気象予測モデルの NWP(Numerical Weather Prediction)である。近年気象現象の変化を捉えるために、広域の情報をモデルに入れる方法を研究する論文がいくつか執筆されている[2]。そこで本研究では、これらの論文を調査した上で、日本の風速予測に適したモデルを構築することを目指す。

3. 研究の方法

本研究の最終ゴールは、地球環境変動に対する対策として、従来のセンサ・計測技術に加えて、IoT・時系列解析・機械学習を融合させ、自治体・市民へ対する災害予測・警告を行うことができるシステムの構築である。近年の異常気象の原因は海洋におけるエルニーニョ現象とそれに連動したジェット気流の蛇行現象という説があるが、今後数十年にわたり北半球の異常降雨と乾燥という2極化した現象と気象変動に対応する事が急務である。現有の科学技術を結集して、環境情報の計測と災害予測により事前に被害を回避または予防する事がインフラの脆弱な途上国では特に重要である。このような背景から本研究で推進するのは

(1) IoT センサの対候性・長期安定性の改善による環境計測用への可能性

(2) クラウドサーバー上で時系列データ予測と警告を行うシステム

である。研究代表者のハードウェア・ソフトウェアに対する知識経験と欧米で開発されつつあるクラウドプラットフォームや公開ライブラリを融合させてこの実現を目指し、さらに、

(3) これらを自治体などに提供した場合の問題点の解明を進めていく。

4. 研究成果

(1) 途上国に向けた IoT 式環境計測器の製作と実装

本研究では 次の技術的課題を解決した IoT 式のモニタリングポストを試作・開発する事を目指した。はじめに代表的な計測マイコンボード WioLink (プロセッサ：ESP8266、Wi-Fi 通信)、WioLTE (プロセッサ：STM32F405RG、LTE Cat.1 通信)、UnaShield V2S (プロセッサ：ATMEGA328、Sigfox 通信)、Wio LTE M1/NB1 (プロセッサ：STM32F439VI、LTE CAT M1 通信) に各種センサを I2C プロトコル、UART プロトコル、A/D 変換で接続を行い、Arduino 言語とライブラリを用いて読み取りプログラムをコーディングすることで温湿度・気圧・日射量・PM10/2.5 センサ、電気化学式ガスセンサ (SO₂、NO₂、CO、O₃) のデータ取得を行い、それらに時刻と一緒にデータを Upload するコーディングを行った。その上で、マイコンのスリープ機能やリアルタイムクロックでマイコンボードの電源を切断できる WioRTC ボードを併用して 30 分に 1 回の測定をするシステムを構築した。自立電源に関してはソーラー・風力電源による環境発電技術を検討した。(図1)

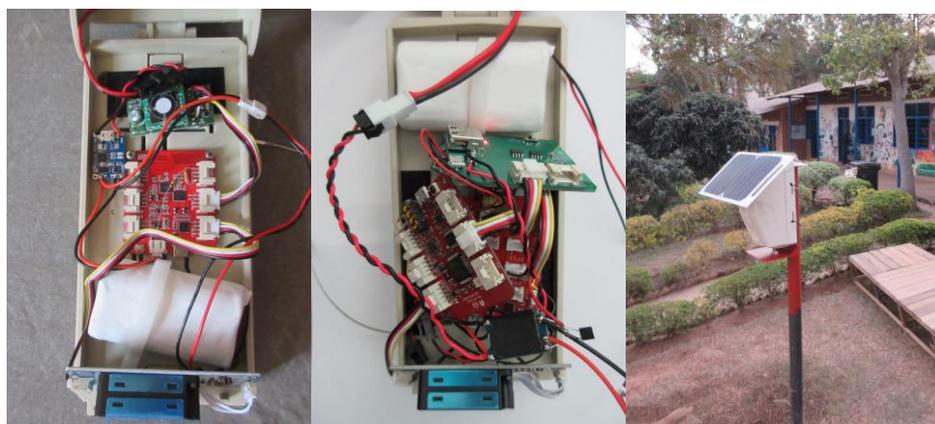


図1.ルワンダ(Wi-Fi式)とウガンダ(3G式)に設置したIoT計測器の内部構造と設置写真

その後、ルワンダの NEMA(National Environment Management Authority)の政府機関や調整しながらフィールドテストの場所を選定してトラベル SIM を用いた 3G 回線と Wi-Fi 通信を用い、送信間隔を 30 分に 1 回としてセンサ・無線回路の低消費電力化を進め、電源はソーラー発電のみとする事とした。その後 2019 年 8/11~8/21(11 日間)の日程でルワンダ国の首都キガリ、ウガンダ国の首都カンパラに出張を行い、現地 NPO などとの交流、REMA/NEMA 等の政府機関を訪問して設置した装置内部写真と設置写真を示す。その後、Ambient クラウドでの測定可視化を行い、この装置は、2019 年 8 月 15 日設置後、自立ソーラー電源により 2020 年 8 月 25 日までに動作した。ウガンダにおいてコロナウィルスの影響で 2020 年 3 月 28 日より外出制限・ロックダウンが行われたが、この措置によるカンパラ市内の PM2.5 の値の変化に関して、NEMA よりデータ提供依頼が来たため送付を行った。NEMA に設置した装置でロックダウンによる大気環境の改善状況が明確に観測された。

(2) PM2.5 の機械学習による予測

予測するにあたり、国立環境研究所が東京都で一時間刻みに測定した 2014-2018 年度の 5 年間のデータを使用した。特徴量としては、PM2.5、気温、湿度、風速、風向を用いた。その後ウェーブレット変換によりウェーブレット係数を取り出し、それらを変換後のスケールごとに分割した[3]。そのスケールごとに訓練・評価・テストデータに 3:1:1(年)の割合で分割し、訓練評価データを用いて作成した LSTM モデルにおいてテストデータで予測を行った。最後に予測結果を結合して逆ウェーブレット変換を行い、標準化を戻すことで予測結果を得た。Daubechies ウェーブレットを用いた場合と先行研究手法による予測結果の一部をプロットすると以下の図 3 のようになる。この図は 2018 年 7 月 22 日での予測結果であり、横軸は 1 時間刻みの時間、縦軸は PM2.5 の濃度[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]を示す。

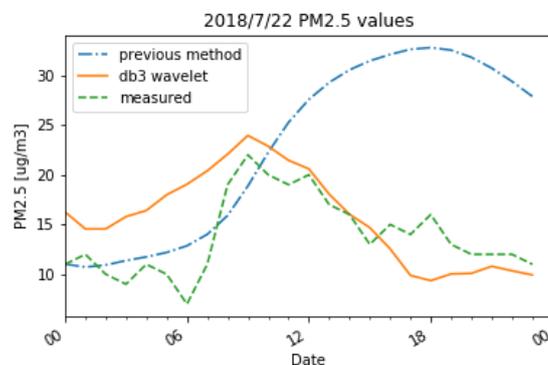


図 2 July 22, 2018 の予測結果

この図のように先行研究の手法に比べ実データの形をとらえた予測ができていることがわかる。ウェーブレット変換により、先行研究の手法に比べて平均%精度を向上させた。

(3) オープンデータを利用した風速の機械学習による予測結果

自然災害などの広域場の気象現象の変化を説明するためによく用いられるのが気圧分布である。しかし、気圧分布をそのまま予測モデルに入れることは難しいため、気圧の広域データを主成分分析することでいくつかの気圧パターンを抽出し、その各気圧パターンの係数（主成分スコア）を得た。その係数を予測モデルの入力データとして機械学習モデルである LSTM モデルを用いて予測を行った。このモデル（モデル 1）の概要と予測結果を図 4、5 に示す。図 5 は、観測値、モデル 1 とモデル 2 の予測値、そして従来モデルとして風速のみを入力とした LSTM モデルの予測値を示している。

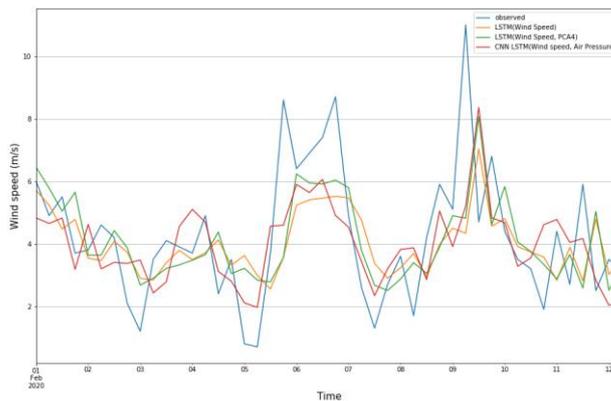
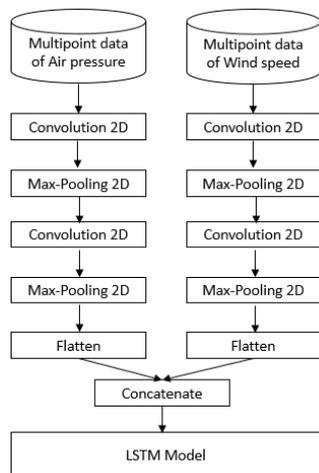


図3 Model 2の概要図 図4 モデル1、2と従来モデルのLSTMモデルの予測値

気象現象の変化を捉えるために広域のデータを入力とした風速予測モデルを二つ構築した。そして横浜市の6時間先、12時間先予測を行った結果について従来モデルとの比較を行った。6時間先予測においてはモデル1の精度が最も良く、従来モデルと比較してRMSE6.4%の向上、12時間先予測においてはモデル2の精度が最も良く、従来モデルと比較してRMSE5.8%の向上が見られた。今後は入力量の検討、モデルの改良などによって精度を上げることが求められる。

研究期間を通じて申請書記載の技術課題①～③を達成することで、「途上国向けIoT環境モニタリングポスト」により途上国が導入・長期運用可能な装置を実現する事ができた。高耐久自立電源が実現できた事から、電源がない地方や山林・荒野における環境モニタリングが増加させることができ、大気環境の定量化が可能となる。これにより、現地の経済発展の中で大気環境改善の効果把握が可能となり適切な環境改善対策の立案及びその実行が可能となる。さらに、IoT技術によりクラウドを介在させ可視化しつつ長時間の環境データを蓄積して環境研究に役立てる事が可能である。特に市民への可視化により「市民が環境情報にアクセスすること」が実現できる事から公害や健康被害を未然に防ぐことが可能となる。また、発生源解析、環境影響評価による定量的な大気汚染対策と健康対策に寄与する事が可能となる。

今後の課題としては、現地の市民の健康状況をビデオ会議および現地訪問での聞き取り調査を通して明らかにして、「健康影響を自主判断できる環境」を提供する事である。これにより、地域住民が大気環境の状態を認識し、改善への意識づけの教育活動につなげることになる。これにより、途上国の行政・住民・企業が一体となったサステイナブルディベロップメントゴール推進と環境改善が期待できる。さらに、IoT技術を途上国で展開することで途上国におけるIT教育を進めIT活用ビジネスの発展とイニシアチブ獲得を行い、将来的にサービス輸出などにより貧困からの脱却の一助となると考えられる。

参考文献

- [1] Daubechies, I. (1988). Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pure and Applied Mathematics*,41(7),909–996.
- [2] Qinghua Hu, “Transfer learning for short-term wind speed prediction with deep neural networks”, Vol.85, pp.83-95(2016).
- [3] Saurabh S. Soman, “A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons”, in *North American Power Symposium*, pp.1-8(2010).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 依田隆志, 山口高明, 松川宗夫, 松本佳宣, 石垣陽, 江藤和子, 柴田陽子, GgombeKasim Munyege, Elisephanelrankund
2. 発表標題 アフリカ・ルワンダでの室内大気汚染の実情
3. 学会等名 第 60 回 大気環境学会年会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 石井 恭平, 松本 佳宣
2. 発表標題 スペクトル・光量子量測定用スマートフォンシステムの試作と評価
3. 学会等名 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西浦信一, 松本佳宣, 寺岡文男
2. 発表標題 IoTシステムのための位置エネルギー変換型風力自立電源
3. 学会等名 知的環境とセンサネットワーク研究会 (ASN)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丸尾容子, 澤石諒, 金子善明, 石垣 陽, 松本 佳宣
2. 発表標題 PM2.5センサとNO2及びO3パッシブサンブラを用いた仙台港周辺の大気環境測定
3. 学会等名 第24回大気環境学会北海道東北支部
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://transmitter.ieee.org/qa-how-sensors-can-make-life-safer-and-more-sustainable-with-yoshinori-matsumoto/>
日刊工業新聞 2019年8月27日 総合/国際面 「東アフリカの環境改善 慶大など ノウハウ蓄積 世界へ」
松本 佳宣, "システムの時刻同期と欠落データの保管方法", CQ 出版社 トランジスタ技術増刊 エレキジャック IoT2, pp.57-65, 2020年4月1日.
松本 佳宣, "太陽電池駆動の環境計測用 IoT システムの試作", CQ 出版社 トランジスタ技術増刊 エレキジャック IoT3, pp.72-78, 2020年7月30日.

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------