

複数種類の機械に対応した 加速度センサを用いた稼働状態推定手法

安久昌和^{1,a)} 小林悠² 岩本健嗣³

概要：社会的な課題やIoT機器並びにそれに付随する技術進展を背景に、製造業におけるIoTの導入が普及し始めている。我が国でも生産年齢人口の減少による生産効率や品質の向上を目的にIoTの導入を推進しており、機械の稼働状態の可視化を行うIoTシステムを導入する企業が増えてきている。機械の稼働状態を推定する手法はいくつかあるが、現状では工場にある機械ごとに閾値を設定し、機械が稼働しているか、停止しているかを判定している。そのため、IoTを普及していくには各機械に合わせた設定を行うのに手間や時間がかかり、導入コストが高くなる課題がある。本研究では、機械ごとに閾値を設けず、自動的に機械の稼働状態を推定するシステムを構築した。また、機械が稼働中に振動していることに着目して、多種・多様な機械に対応できることから加速度センサを用いた稼働状態推定を行い、83.5%の精度で機械の稼働状態を推定することができることを確認した。

キーワード：IoT, 加速度センサ, 稼働状態推定

Operating state estimation method using acceleration sensors corresponding to multiple types of machines

MASAKAZU ANKYU¹ YU KOBAYASHI¹
TAKESHI IWAMOTO²

Abstract: The introduction of IoT in the manufacturing industry has beginning to spread due to social issues, IoT device and accompanying technology advances. In Japan, the introduction of IoT has been the promoted for the purpose of improving production efficiency and quality due to declining working-age population. Among them, many companies have introduced IoT systems that visualize the operation status of machines. There are some methods for estimate the operating state of the machine. Currently, threshold is set for each machine in the factory to determine whether the machine is running or stopping. However, there are some problem that it takes time and labor to perform the setting, and the introduction cost becomes high. In this study, we constructed the system that automatically estimates the operating state of machines without setting threshold for each machine. In addition, focus on the machine vibrating during operation. We estimated the operation state using acceleration sensor because it can handle a wide variety of machines. As a result, we found that the operating state of the machine could be estimated with 83.5% accuracy.

Keywords: IoT, Acceleration Sensor, Operating State Estimation

1. はじめに

近年、様々なモノにセンサなどを取り付け、インターネットに接続することで、実世界のモノ同士が相互に通信や制御を行う Internet of Things (以下, IoT) [1]が世界的に注目を集めており、幅広い分野で活用されている。中でも、製造業におけるIoTの導入による経済効果が期待されており、ドイツの「Industrie4.0」[2]を筆頭に、米国の「Industrial-Internet」[3]、中国の「中国製造 2025」[4]などが国家プロジェクトとして推進されている。日本も、「Society5.0」[5]に政策として取り組んでいるが、各産業におけるIoT導入はドイツ・米国・中国に比べると遅れている[6]。その要因としては、日本の製造業における企業構成は中小企業が中心であることが挙げられる[7]。多くの中小企業はIT投資を

十分に行えないため、その企業に適したIoTシステムの開発費及び保守・運用費のかかるIoTの導入が遅れているのが現状である。今後、中小企業へのIoT導入を促すためには、IoT導入時にかかる開発費、保守・運用費を低廉化させる必要がある。

また、製造業におけるIoTのユースケースとして、機械の稼働状態の可視化や生産進捗管理、品質管理、スケジュール管理などが挙げられる。本研究では、製造業におけるIoTのユースケースの中でも、機械の稼働状態の可視化における低廉化に着目する。機械の稼働状態を可視化する手法はいくつかあるが、大まかに二通りに分類することができる。一方は、IoTに対応できるように機械本体からイーサネットなどの有線通信を用いて稼働状態を取得する方法である。もう一方は、機械の外側などにセンサを取り付けて稼働状態を推定する手法である。前述の導入方法では、メーカーごとに対応する管理アプリケーションが異なり、工場に複数メーカーの機械がある場合、各メーカーのIoTシステ

1 富山県立大学 工学研究科
Graduate School of Engineering, Toyama Prefectural University

2 富山県立大学 工学部
School of Engineering, Toyama Prefectural University
a) m-anq@puc.pu-toyama.ac.jp

ムを並行して運用するか、機械を全て一つのメーカーに統一する必要があり、どちらも導入コストが高くなってしまふ。一方で、後述の導入方法では、前述の導入方法より安価に導入することが可能だが、工場にある各機械にセンサの閾値などを設定し、機械の稼働状態を判定する必要があり、各機械に合わせた設定を行うには手間や時間がかかる。そこで、本研究では後述の導入手法において各機械の閾値を設定せず、自動的に機械の稼働状態を推定する手法を提案する。本提案手法を用いることで、各機械に個別の閾値などを設定する必要がなく、機械にセンサを取り付けるだけで導入できるため、既存の手法より導入コストを低くすることができると思われる。

本稿では、2章にて研究概要について述べ、3章にて機械の稼働状態を推定する手法について述べ、4章にて評価実験の概要について述べ、5章にて提案手法の精度検証結果について述べ、最後に6章にてまとめと今後の課題についてまとめる。

2. 研究概要

本章では、本研究において機械の稼働状態推定に用いるセンサ及び本研究で対象にした IoT プラットフォームについて述べる。

2.1 稼働状態推定に用いるセンサ及びセンサ受信端末

機械の稼働状態を、後からセンサを取り付ける方法で可視化する方法は、既に多くの企業が行っている。近年流通している機械には、図1に示すようなシグナルタワーが備わっているため、既存の IoT システムの多くが、シグナルタワーに光センサを取り付けて機械の稼働状態を取得し、Web アプリケーション等で可視化する取り組みである。しかし、中小企業にある機械にはシグナルタワーが備わっていない機械もあることなどから、工場にある全ての機械に既存の IoT システムを導入することは難しい。そのため、機械に依存しない稼働状態取得または推定が必要となる。そこで、本研究では、機械が稼働中に振動していることに着目し、機械の振動を加速度センサで取得することで、機械の稼働・停止の2状態を推定できると考えた。

以上より、本研究では加速度センサを用いた機械の稼働状態推定を行う。次に、本研究において使用するセンサについて述べる。本研究に使用するセンサは、富山県 IoT 推進コンソーシアムが行っている共有型とやまものづくり IoT プラットフォームで用いられているセンサを活用する。このセンサは、消費電力を低く抑えるために、3軸加速度のセンシングと3軸合成加速度の平均・分散値を算出、センサ受信端末へのデータ送出行うアクティブ状態、センサ受信端末へのデータ送出手のみを行うスリープ状態の2つの状態があり、2秒間のアクティブ状態、28秒間のスリープ状態を交互に状態遷移している。センサ受信端末へは3軸(x, y, z)の加速度、3軸合成加速度の平均・分散を

BLE (Bluetooth Low Energy) で送出している。なお、データの送出周期は1秒である。



図1 機械に備わっているシグナルタワー
Figure 1 The signal tower on the machine

2.2 共有型とやまものづくり IoT プラットフォーム

前述したように、本研究では共有型とやまものづくり IoT プラットフォームで用いられている加速度センサを活用する。本節では、本プラットフォームの概要について述べる。本プラットフォームは、富山県における製造業の中小企業に IoT の導入を促すことを目的に取り組んでおり、2018年度から実証実験が開始されている。第1章で述べたように、中小企業が IoT 導入に拠出できる費用は多くはない。そこで、センサやクラウドを共通化し、複数企業で共有して利用することで1社あたりの導入及び運用コストを削減している。図2に本プラットフォームの概要図を示す。

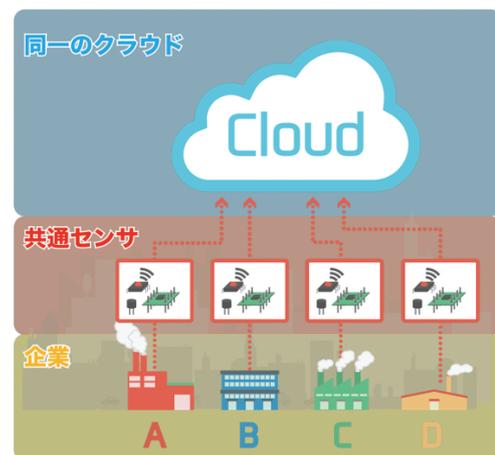


図2 共有型とやまものづくり IoT プラットフォームの概要図

Figure 2 Overview of Toyama IoT Platform

3. 提案手法

本章では、本研究で提案する手法を確立するための基礎実験について述べる。その後、提案手法の概要についてまとめる。

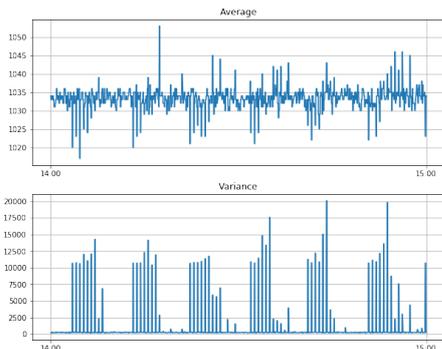


図3 定常状態における加速度センサの値

Figure 3 Acceleration sensor values in steady state

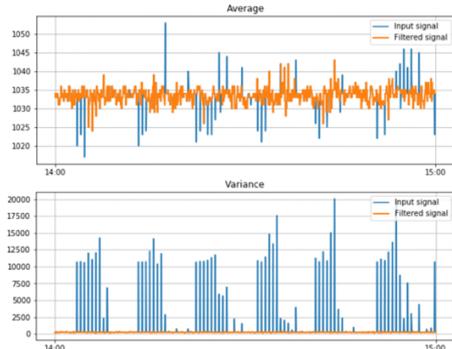


図4 Hampel フィルタ後の加速度センサの値

Figure 4 Acceleration sensor values after Hampel-Filter

3.1 定常状態における加速度センサに関する基礎実験

本実験では、機械の稼働・停止を判定するために、本研究で使用する加速度センサの定常状態における値を確認する。

3.1.1 実験方法

加速度センサを疑似的に定常状態にするために、大学内の人の出入りが少ない部屋の壁に加速度センサを取り付けた。また、センサが動かないように、テープで固定して実験を行った。本実験において、センサの向きなどを考慮しないため、3軸合成加速度の平均・分散値のみ使用する。

3.1.2 実験結果及び考察

図3に、本実験における加速度センサの平均と分散値を示す。図3より、本研究で使用する加速度センサには、スパイクノイズ（他の信号と比べて一時的に突出して大きい信号）が検出されていることがわかる。本実験において加速度センサは疑似的に定常状態としているため、加速度センサの値は一定になるはずである。しかし、このセンサは、アクティブ状態とスリープ状態で状態遷移することやセンサのドリフトなどの影響により、スパイクノイズが検出されていると考えられる。そこで、このスパイクノイズを取り除く必要がある。スパイクノイズを取り除く手法として、Hampelフィル[7]を用いる。図4にHampelフィルタによってスパイクノイズを取り除いた加速度センサの値をFiltered signalとして示す。図4より、スパイクノイズを含んだ加速度センサの値をHampelフィルタに通すことで、

スパイクノイズが取り除かれていることがわかる。以上より、本研究で使用するセンサには、スパイクノイズが検出されるため、Hampelフィルタでスパイクノイズを除外する。

3.2 機械の稼働中における加速度センサの有効性に関する基礎実験

3.1節で定常状態における加速度センサの値を確認した。本実験では、機械の稼働中における加速度センサの値を確認する。

3.2.1 実験方法

富山県立大学には、工場と同様の機械が利用可能な場所があり、そこにある機械に加速度センサを設置し、実験を行った。図5に機械に加速度センサを取り付けた様子を示す。



図5 実験環境

Figure 5 Experiment environment

3.2.2 実験結果及び考察

3.1節より、本研究で使用する加速度センサにはスパイクノイズが検出されることがわかっている。そこで、本実験でもHampelフィルタを用いて取得した加速度センサのスパイクノイズを除去した。図6にHampelフィルタ後の加速度センサの値を示す。図6より、13時から14時半頃まで大きなセンサ値が検出されている区間があることがわかる。その区間は、機械が稼働・停止を繰り返していると考えられ、それ以降は停止していると考えられる。

本研究では、機械が稼働中に振動していることに着目している。そのため、加速度センサの値の大きな信号が稼働、小さな信号が停止していると考えられる。そこで、加速度センサの値の変化点を検出し、加速度センサの値が大きい信号の区間と小さい信号の区間に区切る。本研究では、特異スペクトル変換法[8]を用いて、加速度センサの値の変化点検出を行い、加速度センサの値が大きい区間と小さい区間に区切る。図7に特異スペクトル変換法を用いた加速度センサの変化点を示す。図7の縦線は加速度センサの値の変化点を検出したタイミングを示している。図7の上図は加速度センサの平均値を表しており、下図は加速度センサの分散値を表している。図7より、加速度センサの値の大きな変化点検出では、加速度センサの分散値の方が変化点を捉えられている。以上の結果を用いて、変化点間の区間内

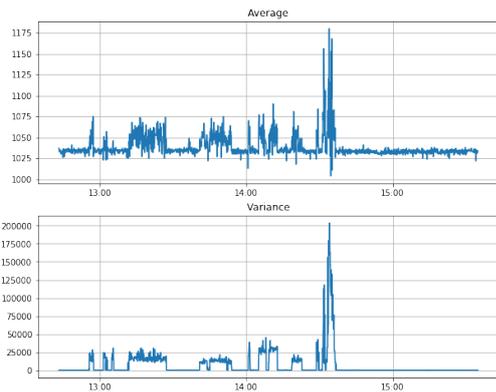


図 6 Hampel フィルタ後の加速度センサの値
 Figure 6 Acceleration sensor value after Hampel-Filter

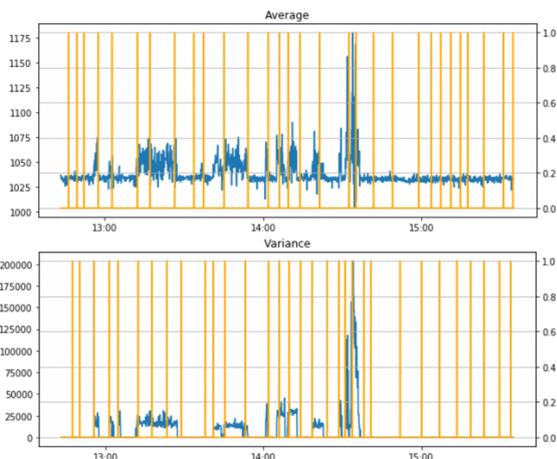


図 7 加速度センサの値における変化点検出

Figure 7 Change point detection in acceleration sensor value

の加速度センサのセンサ値の平均・標準偏差を算出し、教師なし学習であるクラスタリングを用いて機械の稼働・停止を推定する。

3.3 提案手法の概要

以上 2 つの基礎実験を基に、提案手法の概要についてまとめる。本研究で使用する加速度センサにはスパイクノイズが検出されることから、Hampel フィルタを用いてスパイクノイズを取り除く。その後、3.2 節で述べたように、機械が稼働中に振動していることから、加速度センサの値のセンサ値が大きい値は機械が稼働しており、小さな値は機械が停止していると考えられる。そこで、加速度センサの値の変化点検出を行い、加速度センサの値の大きい値の区間と小さい値の区間に区切る。そして、変化点間内の加速度センサの値の平均・標準偏差を算出し、教師なし学習におけるクラスタリングを用いて、機械の稼働状態を推定する。また、図 7 の下図に示した加速度センサの分散値が、上図より変化点検出を行えている。このことから、本研究では、加速度センサの分散値に着目して、評価実験を行う。

4. 評価実験

本実験では、実際の工場にある機械にセンサを取り付けた。その際に、センサの取り付け位置における稼働状態推定を行い、機械のどの位置にセンサを取り付けるのが有効なのかを検証する。また、ある一つの機械の複数種類における精度検証を行う。

4.1 実験環境

本実験では、実際に富山県にある金属加工の工場で行った。図 8 に本実験で加速度センサを取り付けた機械の外観を示す。対象とした機械は、図 8 に示した機械は NC 旋盤である。赤枠が光センサを取り付けたシグナルタワーである。また、対象とした機械に対して、本研究で用いる加速度センサを機械の左右と後方に取り付けた。



図 8 本実験で対象とした機械の外観

Figure 8 Appearance of the machine in this experiment

4.2 精度検証における比較対象

本節では、本実験における精度の検証を行う比較対象について述べる。本実験を行った工場は、2.2 節で述べた共有型とやまものづくり IoT プラットフォームにて実証実験を行っている。その工場では、工場内のシグナルタワーが備わっている機械に対して光センサを取り付け、稼働状態の可視化を行っている。その光センサから得られた稼働データを正解データとして用いて、本稿で提案した手法の精度の検証を行う。

5. 結果

本章では、評価実験の結果について述べる。図 9 に本実験における比較対象の結果を示す。比較対象の結果としては、1 が機械の稼働、0 が機械の停止を表している。

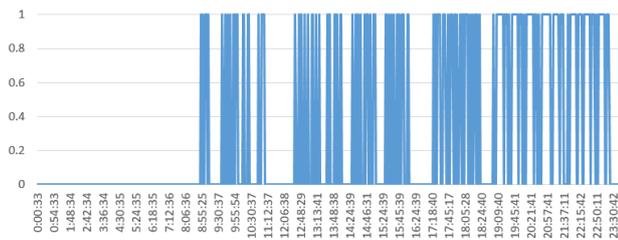


図9 精度検証における比較対象の結果

Figure 9 Comparison result in accuracy verification

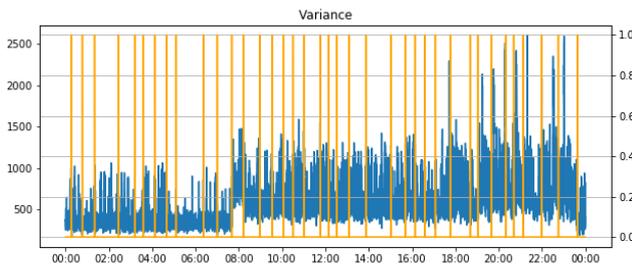


図10 加速度センサの値における変化点検出

Figure 10 Change point detection in acceleration sensor value

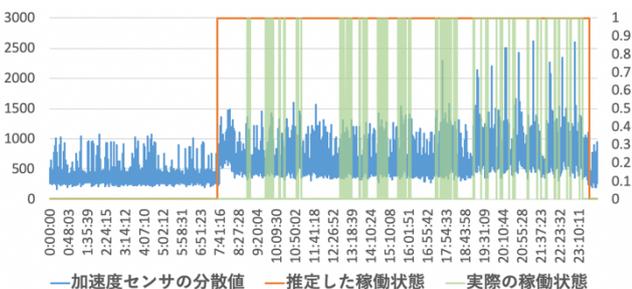


図11 クラスタリングによる機械の稼働状態推定 (再掲)

Figure 11 The machine operating state estimation by clustering

5.1 加速度センサを用いた機械の稼働状態推定の有効性に関する結果

本節では、基礎実験の結果を基に確立した提案手法の有効性について述べる。図9に加速度センサを用いた変化点検出を行った結果を示す。図9の縦線は加速度センサの値の変化点を検知したタイミングを示している。その後、変化点間の加速度センサの値の平均・標準偏差を用いて、クラスタリングを行い、各区間での機械の稼働・停止を判定した。図10にクラスタリングによる機械の稼働状態の推定結果を示す。実際の稼働状態は細かく変化しているのに対して、推定した稼働状態は大まかにしか捉えられておらず、また、全く稼働状態を捉えられていない区間も存在していることがわかる。その要因としては、工場にある他の機械が稼働し始め、他の機械から発生している振動により建物全体が振動し、それを検知しているためと考えられる。この結果より、本研究における提案手法を改良する。まず、工場にある機械が動いており建物が振動していると見られる区間と停止している区間に分ける。その後、建物が振動していると見られる区間に対して、再度、変化点区間の算

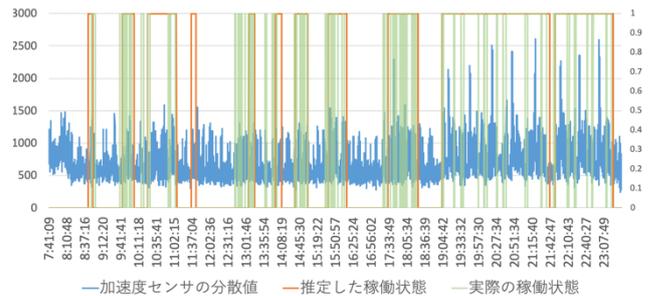


図12 改良版提案手法を用いた機械の稼働状態推定の結果
Figure 11 Result of the machine operating state estimation using improved version of the proposed method

出及びクラスタリングを行う。工場が稼働している区間において、個別の機械の稼働と停止を判定する。図11に、改良版提案手法を用いた機械の稼働状態推定の結果を示す。図11より、実際の稼働状態では、機械に取り付ける治具交換などの段替えによる停止を行なっているが、改善前と同様に推定した稼働状態では細かい稼働停止を検出することはできていないことがわかる。一方、提案手法の改善によって、実際の稼働状態の大まかな稼働状態を推定できていくことがわかる。実際の稼働状態と改良版提案手法を用いて推定した稼働状態の正解率は83.5%であった。

5.2 センサの取り付け位置における機械の稼働状態推定に関する結果

本節では、センサの取り付け位置における機械の稼働状態推定に関する結果について述べる。表1にセンサの取り付け位置による機械の稼働状態推定の結果を示す。以上の結果より、センサの取り付け位置に関しては、機械の左側にセンサを取り付けた時の稼働状態推定の精度が高いことがわかった。左側が、治具などを取り付ける場所であるため、この機械では治具を取り付ける側に取り付けるのが良いことがわかった。

表1 センサの取り付け位置による稼働状態推定の比較

Table 1 Comparison of operating state estimation based on sensor mounting position

	左側	後方	右側
正解率 (%)	83.5	54.4	55.9

5.3 複数種類の機械における稼働状態推定に関する結果

本節では、NC旋盤における複数種類の機種による稼働状態推定について述べる。表2に複数種類の機械における稼働状態推定結果を示す。表2より、機械Aが83.5%であり、機械Bが72.8%、機械Cが69.2%という結果になった。この要因として、本実験で対象とした機械は機械Cが最も新しく、機械Aが最も古い。また、近年の機械は、騒音・振動などの公害対策として、機械があまり振動しないように設計されている。以上のことから、機械が古い機種に対

しては機械の稼働状態を捉えやすく、新しい機種になるほど稼働状態を捉えられていないことが考えられる。

表 2 複数種類の機械における稼働状態推定の比較

Table 1 Comparison of operating state estimation for different types of machines

	機械 A	機械 B	機械 C
正解率 (%)	83.5	72.8	69.2

6. まとめと今後の課題

本研究では、機械が稼働している時に振動していることに着目して、加速度センサを用いた機械の稼働状態推定を行った。まず、機械の精度検証では、実際の稼働状態と比較して推定した稼働状態は、細かい変化を捉えられていないが、大まかに稼働状態を捉えることはできている。実際の稼働状態と推定した稼働状態との正解率は 83.5%であった。次に、機械に取り付けるセンサの取り付け位置による稼働状態の推定精度は、機械の左右及び後方に設置した。その結果としては、本研究で対象とした機械は治具と呼ばれる金属を用いて、金属加工している。その治具を取り付ける側面の稼働状態の精度が一番高いことがわかった。最後に、複数種類の機械における稼働状態推定では、近年の機械は公害対策などであまり振動しない設計になっているため、新しい機種の推定精度が低くなることがわかった。

今後の課題として、本稿では、NC 旋盤の稼働状態推定のみを行った。本研究の最終目的は、様々な機械の稼働状態を本稿で提案した手法で推定できることである。そのため、今後、NC 旋盤以外の機械での実験を行なっていく必要がある。また、5.3 節で述べたように、本稿における提案手法では、新しい機種の方が稼働状態の推定精度が低くなることがわかっている。今後、新しい機種の推定精度を上げるために、本稿の提案手法を改良していく必要がある。そして、本研究では、オフラインでの機械の稼働状態推定を行った。今後、本稿の IoT システムを実証実験するために、オンラインでの機械の稼働状態推定が行えるようにする必要がある。

参考文献

[1] “総務省. “ユビキタスから IoT へ.”. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc254110.html>, (参照 2020.01.20)

[2] Mario, H. and Tobias, P. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios”. IEEE HICSS, 2016, p.1530-1605.

[3] “The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture”. <https://www.iiconsortium.org/pdf/IIRA-v1.9.pdf>, (参照 2020.01.30).

[4] “「中国製造 2025」の公布に関する国務院の通知の全訳”. <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FU/CN20150725.pdf> (参照 2020-01-30).

[5] “Society 5.0 - 科学技術政策 - 内閣府 “. https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html, (参照 2020-01-30).

[6] “IoT 時代における ICT 産業の構造分析と ICT による経済成長への多面的貢献の検証に関する調査研究”. https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/h28_01_houkoku.pdf, (参照 2020-01-30).

[7] Pearson, R. K. and Neuvo, Y.: Generalized Hampel Filters. EURASIP Journal on Advances in Singnal Processing, 2016, 87.

[8] Ide, T. and Inoue, K.: Knowledge Discovery from Heterogeneous Dynamic Systems using Change-Point Correlations, Proc. 2005 SIAM International Conference on Data Mining, pp.571-576 (2015).