

スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発

(DX 実現のための IoT と AI 技術を用いた製造業支援)

次長 兼 基盤技術部長 兼 応用技術部長 田 口 喜 祥

近年製造現場では、生産効率を上げるためDX (Digital Transformation) の推進が求められている。特に、IoT (Internet of Things) 技術を用いて機械装置の稼働状況を監視することで、無駄な工程の見直しや不具合発生時の迅速な対応、生産性向上のための改善に必要なデータ収集などが可能となり、注目されている。さらに、近年ではAI (Artificial Intelligence) 技術を活用して、収集したデータを基にニューラルネットワークを学習することで、故障の予兆監視、不良品の事前予測なども行われるようになってきている。

本研究では、工場内で稼働している機械装置の稼働状況を IoT 技術により収集し、収集したデータを基に AI 技術を用いて解析することで、工場内で稼働している機械装置を推定し、作業工程を監視する装置を開発した。

1. 緒言

製造現場では、生産効率を上げるためDX (Digital Transformation) の活用が求められている。特に、生産設備や工作機械の稼働状況の監視や、生産数、生産に要した時間をIoT (Internet of Things) 技術を用いて収集し、デジタルデータとして記録することで、製造工程の効率化や不具合発生時の迅速な対応、生産性向上のためのデータの取得が可能となることが期待される。また、近年AI (Artificial Intelligence) 技術を製造現場へ応用した事例が数多く報告されており、注目を集めている。IoT 技術により自動的に収集した多くのデータを用いてニューラルネットワークを学習することで、不具合の事前予測などが可能となるため、製造業で応用が期待されている^{[1] [2]}。

一方、生産現場では製造に使用した機械装置の稼働時間や、稼働状況、製造工程がどの工程まで進んでいるかに関するデータを収集したいとの要望がある。作業工程の監視をIoTやAI技術を用いて実現することが可能となれば、工程を自動的に監視し、生産を管理できるスマート工場の構築可能となり、製造業のさらなるDX化推進支援につながると考えられる。

そこで、本研究開発では、工場内で稼働している機械装置の稼働状況をIoT技術により収集し、AI技術を用いて解析することで、稼働している機械装置を推定し、生産工程を監視することが可能な装置開発をすることを目的とした。

生産設備やCNC工作機械などは、これまでの研究でパトライトの点灯状態や主軸電流波形の解析を行うことで稼働状況の監視が可能となっている。しかし、作業者が直接操作を行うディスクグラインダーや電動ド

リルなどの小型電動機械の稼働状況の監視を行うことは難しかった。そのため、本研究では作業者が直接使用する小型電動機械を対象として、電流波形や稼働時に発生する音の特徴から稼働している装置を認識し、稼働状況を取得する装置を開発することを目的とした。

令和4年度は作業工程監視を行う装置開発のために必要な、電流などの特徴から稼働している機械装置を推定する監視モジュールを開発するためのデータ収集を実施した^[3]。令和5年度は監視モジュールのハードウェアの検討および試作^[4]、令和6年度には収集したデータを基にニューラルネットワークを学習し、電流、音の波形を基に稼働している装置を推定する装置を開発し、性能確認試験を実施した。

2. システム構成

開発した作業工程監視装置の構成を図1に示す。作業工程を監視するためには、どのような機械装置が現在稼働中であるか認識し、記録する必要がある。

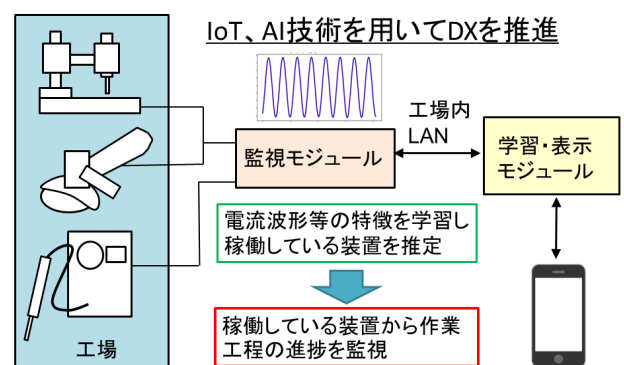


図1 システム構成

工作機械や生産設備などの稼働監視は、パトライトの監視や回転主軸の電流解析によりこれまでの研究で可能となっている。しかし、仕上げ作業などで用いられる電動ドリル、ディスクグラインダーなどの小型電動機械の稼働状況は、使用場所が特定されておらず監視することが難しかった。もし、工作機械や生産設備などの大型機械装置に加えて小型の電動機械の稼働状況監視が可能となれば、工場全体での稼働監視ができるため、工程監視が可能となり、スマート工場を構築可能になると考えられる。

そこで、本研究では稼働中の電流などの特徴を基に、ニューラルネットワークを用いて稼働している小型電動機械や電動工具を推定し監視を行う装置を開発することを目的として開発を実施した。

3. データセット収集システム

稼働中の装置を電流などの波形の特長から推定する監視モジュールを開発するためには、電流波形と稼働中の装置に関するデータをデータセットとして収集し、ニューラルネットワークを学習する必要がある。そこで、テーブルタップを流れる電流波形の特徴を認識し、稼働中の機械装置を推定する監視モジュールを開発することを想定し、電流データを収集することとした。まず、電流センサと ESP32 マイコンボード用いた電流計測用マイコンボードを複数台製作し、電流データの収集を行った。さらに、製作した電流計測用マイコンボードで収集したデータを時間および機械装置の名称と共にサーバPC に記録し、データセットとして収集するデータセット収集システムを製作した。製作したシステムの構成を図2に示す。実際にデータを収集中の電流計測用マイコンボードの写真を図3に示す。

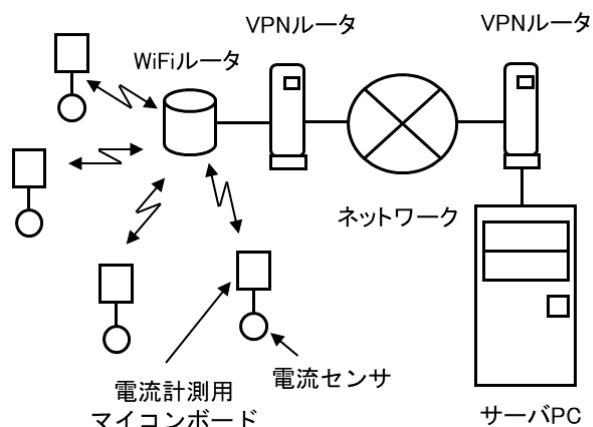


図2 データセット収集システム

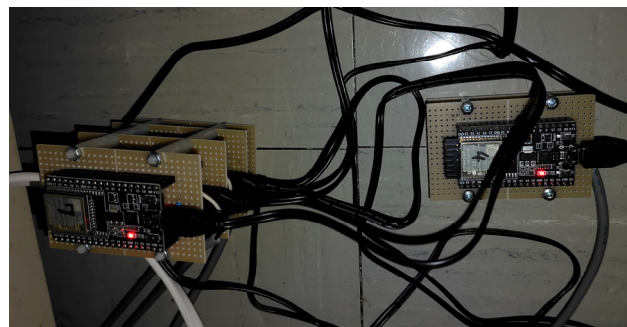


図3 電流計測用マイコンボード

データセット収集システムは、離れた工場で利用することを想定し、プライベートネットワーク間のデータ通信のためのVPNルータや広範囲なWiFi環境構築のためのメッシュWiFiなどを用いる構成とした。使用したVPNルータはBUFFAL製VR-S1000、メッシュWiFiルータはTPLink製DECO X95である。

製作したシステムで収集した電流データの例を図4に示す。この例では、約25kHzのサンプリング速度で2,048個の電流データを取得し表示した結果である。

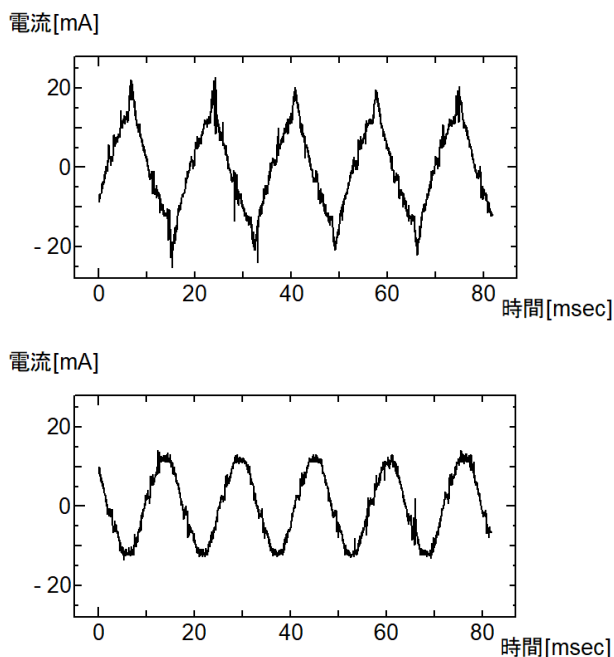


図4 収集した電流データの例

今回、製作した8台の電流計測用マイコンボードを用いて、テーブルタップ2セットについてそれぞれのテーブルタップ根本1箇所と、そのテーブルタップに接続されている機器3か所の電流データを1分おきに計測し収集した。

複数の工場で稼働している装置を対象とすることを

想定し、VPN を用いて2つのプライベートネットワーク間でのデータ収集システムを構築し、1分おきの電流波形データの収集が可能であることを確認した。

収集した電流波形データを確認するために、収集データ確認プログラムの動作中の画面を図5に示す。この画面の一番上の波形がテーブルタップ根本の電流波形であり、2番目から4番目までの波形がテーブルタップに取り付けられている機器の電流波形である。テーブルタップ根本の波形が、各テーブルタップの波形を加算した波形となっていることが確認できる。なお、それぞれの電流計測用マイコンボードは、同期したデータ収集を行っていないことに注意を要する。

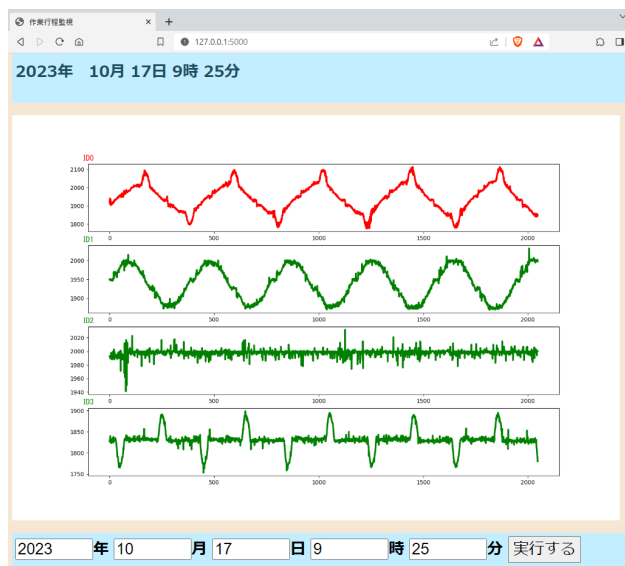


図5 収集データ確認プログラム

4. 監視モジュール

電流波形データを基に稼働している装置を推定する監視モジュールを開発するために、使用するマイコンボードの選定を行った。これまでの研究では、ESP32などのマイコンボードでセンサデータを取得し、取得したデータをサーバコンピュータに送信後サーバコンピュータでニューラルネットワーク処理を行っていた。サーバコンピュータとしては、Raspberry Pi、Latte Panda、Jetson nanoなどのボードコンピュータ^[5]を使用していたが、これらのボードコンピュータはLinuxやWindowsなどのOSを用いて作動させており、リアルタイムでの処理が難しい。また、シャットダウン操作を行わずに電源を切ると不具合が発生するなどの問題点があった。

そこで、監視モジュールの開発は、ニューラルネットワーク 処理をSONYのNeural Network Console^[6]を使用することを前提とし、ニューラルネットワーク処理もマイコンボード単体で実現することを目指してSONY製のSPRESENSE^[7]を用いることとした。

SPRESENSEマイコンボードは、最大4chのアナログマイクを接続可能で、音データをサンプリング周波数48kHzで測定できる。開発当初は電流波形データのみでの推定を試みていたが、熟練者が稼働中の機械装置を推定する場合、機械装置の作動音を基に判断することが多いため、音を用いた監視も有効であると考えられる^[8]。そこで、電流波形以外に音波形を用いた稼働装置の推定も試みることにした。

電流波形と音波形を監視対象として試作した監視モジュールの写真を図6に示す。なお、SPRESENSEマイコンボードで電流波形を測定するための回路は、電流データを収集するためにESP32マイコンボードを用いて作成した、電流計測用マイコンボード同様にCTセンサからの信号をオペアンプにより増幅しマイコンボードへ入力する回路構成とした。

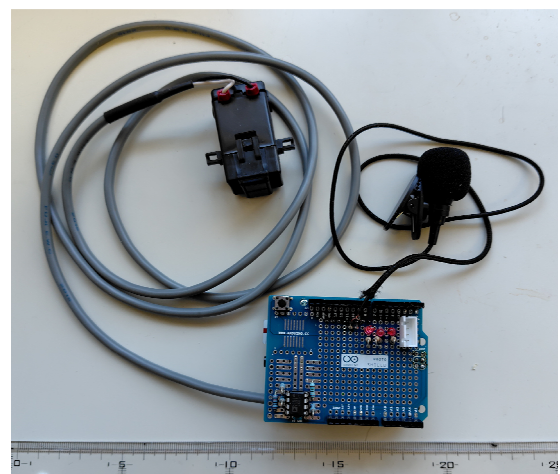


図6 監視モジュール

ニューラルネットワークを学習するためには、多くのデータを収集する必要がある。本研究で開発する監視装置では、機械装置が起動する際の電流波形および音を用いて稼働している装置を推定するため、起動時の電流データおよび音データを収集する。そのため、これまで収集していた電流データに加えて、起動時の音データを自動で取得するための改良を実施した。監視モジュールにAC100Vの電源ON/OFFを行える回路を追加し、監視モジュールから装置のON/OFFを制御でき

る構成として、装置起動時の電流波形と音波形を収集した。起動時の電流データ、音データを収集するために作成したプログラムのフローチャートを図7に示す。

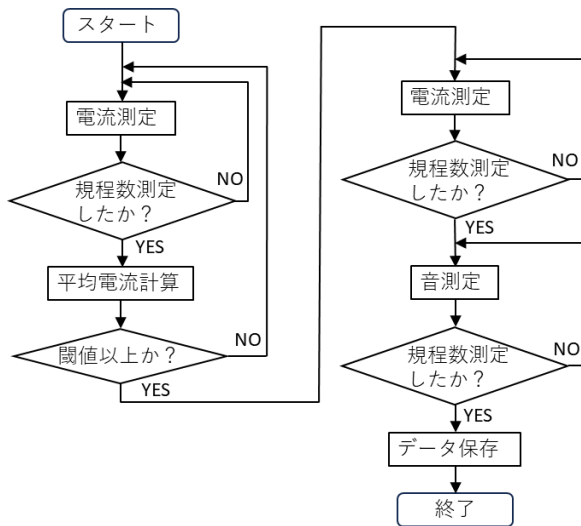


図7 起動時データ収集プログラムフロー

5. 学習・表示モジュール

学習・表示モジュールでは収集したデータを基に監視モジュールで使用するニューラルネットワークの学習や、監視モジュールから送られてきたデータを表示する機能と、スマートホンに通知する機能を有する。

監視モジュールで動作するニューラルネットワークを構築するために、Sony の Neural Network Console デスクトップ版というニューラルネットワーク開発用のアプリケーションソフトを用いた。今回、表1に示す仕様の Windows コンピュータに、収集したデータを確認するための収取データ確認プログラムとスマートホンに通知を行うプログラムを搭載することで、学習・表示モジュールとして使用した。

表1 学習・表示モジュールのハードウェア仕様

OS	Windows11
CPU	Intel (R) Core i7-10700F
メモリ	64GByte
GPU	NVIDIA(R) GeForce RTX 3090Ti
ストレージ	SSD 2TB

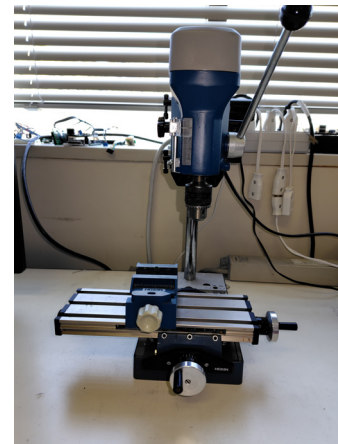
スマートホンへの通知は、当初Line Notify という Line に表示するためのサービスを使用していた。しかし、Line Notify が令和7年3月31日をもってサービ

スを終了するとの通知があったため、代替として Discord による通知プログラムを作成し対応した。

なお、学習を行わず表示とスマートホンへの通知のみで良い場合は、Raspberry Pi などの安価なボードコンピュータで、データ収集や稼働状況表示などの動作が可能であることを確認している。

6. 性能評価実験

試作した作業工程監視装置の性能を評価するための実験を実施した。今回、監視対象として小型の卓上型ボール盤、卓上型丸ノコ版、手持ち式ディスクグラインダーを監視対象として実験を実施した。実験で用いた監視対象装置の写真を図8に示す。



(a) 卓上型ボール盤



(b) 卓上型丸ノコ盤



(c) ディスクグラインダー

図8 監視対象の機器

開発当初、図8に示した機種種の推定には電流波形のみにより行うことを予定していた。しかし、誘導モータ、ブラシレスモータ、AC ブラシモータなど、モータの種類が違う場合の推定は容易であったが、同種類のモータを使用している装置の場合は推定が難しいことが実験により明らかとなった。そこで、電流波形に加えて起動時の音データも収集し、稼働している装置を推定することとした。監視対象の機器について、駆動時電流波形と音データをそれぞれ 5,456 回収集しニューラルネットの学習および学習したニューラルネットワークの評価を行った。データセットの作成の際、音データについては収集したデータ長がプログラム起動のタイミングにより意図した長さとは違う長さで保存される場合があったので、長さが違うデータは排除してデータセットを作成した。収集したデータセットのうち約8割である 4,378 セットを学習用、残りの 1,078 セットを評価用として使用し、ニューラルネットワークコンソールの探索機能により良好な性能のニューラルネットの探索を行った。

図9は、探索結果を横軸に乗加算回数、縦軸に推定誤差として表したトレードオフグラフである。乗加算回数が増えると推定誤差が小さくなるが、演算に必要なメモリ容量が多く必要となり、演算時間も増えることになる。

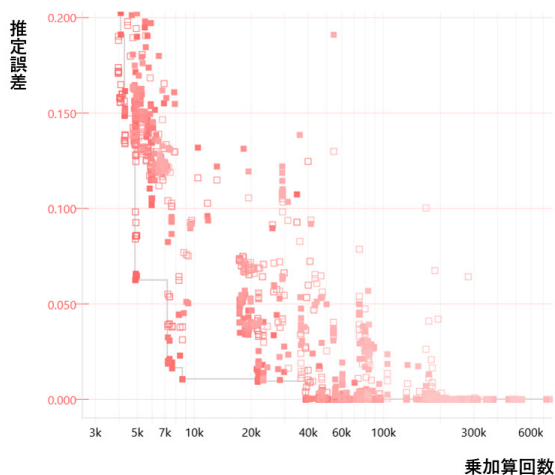


図9 トレードオフグラフ

ニューラルネットワーク探索の結果、乗加算回数が約 40,000 以上であれば電流波形と音波形を用いて正解率 100%で稼働している機器を判別できるニューラルネットを探索することができた。しかし、乗加算回数が増えることによるニューラルネットのデータ容量

が大きくなり、SPRESENSE マイコンのみでは、稼働している推定処理を行えなかった。この結果を基に、SPRESENSE マイコンで実行可能な容量のニューラルネットを探索し、乗加算回数 21,635 回で推定率 99.94 %で判別できるニューラルネットを探索した。

探索した稼働装置推定ニューラルネットの構成を図10に、ニューラルネットの評価結果を図11に示す。



図10 稼働装置推定ニューラルネット

○ 出力結果 ● 混同行列: $y - y'$ ▼ ○ その他

	y'_0	y'_1	y'_2	Recall
$y=0$	356	3	0	0.9916
$y=1$	0	359	0	1
$y=2$	0	0	360	1
Precision	1	0.9917	1	
F-Measures	0.9957	0.9958	1	
Accuracy	0.9972			
Avg.Precision	0.9972			
Avg.Recall	0.9972			
Avg.F-Measures	0.9972			

図1 1 稼働装置推定ニューラルネットの評価結果

7. 結言

スマート工場を実現するためにIoT技術とAI技術を活用した作業工程監視装置を試作した。試作した作業工程監視装置は、稼働中の装置をセンサ情報から推定する監視モジュールと監視モジュールで使用するニューラルネットワークの学習と収集したデータを表示し、スマートホンなどに通知を行う学習・表示モジュールで構成した。

開発した監視モジュールは、収集した電流波形と音データ波形で作成したデータセットを用いて学習したニューラルネットワークを使用することで、電流波形と音波形から、稼働している機器を推定する機能を有する。SONY製のSPRESENSEマイコンボードを用いることで、監視モジュール単体で電流波形と音波形の特徴から機器を99%以上の精度で推定することが可能であることを確認した。

今後、開発した装置を用いて県内企業のDX推進に貢献していきたい。

参考文献

- [1] 成瀬：AI活用が期待される工場のIoT化、日本総研経済 Research Focus No. 2019-032, pp1-7, 2019-11.
- [2] 小川、永井：IoT等の進展が与える情報システムへの影響に関する研究、産業経済研究所紀要、第27号、pp27-88, 2017-7.
- [3] 田口：スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No52, pp. 8-9, 2023.

- [4] 田口：スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No53, pp. 13-14, 2024.
- [5] 田口、久保田：AIを用いた監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No51, pp10-15, 2022.
- [6] <https://developer.sony.com/ja/spresense/>、accessed 2022.
- [7] 太田：SPRESENSEではじめるローパワーエッジAI、ISBN:4873119677、2022.
- [8] 田口：音源可視化技術の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No53, pp. 27-32, 2024.