

無線ネットワークを用いた振動監視装置の開発

機械システム科 科 長 田 口 喜 祥

県内中小企業では、生産性を向上させるため、できるだけ少ない人員で多くの機械装置を長時間稼働させたいという要望がある。特に、CNC 工作機械の稼働率を上げることは利益に直結するため、工作機械の稼働状況を監視し、異常の早期検出が求められる。従来、機械装置の異常の検出は人間が目視や音響により予兆を検知し判断することが多かった。一方、近年 IoT (Internet of Things: もののインターネット) が話題となっており、この技術を応用することで、機械装置の稼働状況を遠隔地から監視し、異常の通知を行うことが可能となっている。本研究は、振動現象について着目し、機械振動や電流波形などの振動現象を計測することで機械装置を監視する装置を開発することを目的として実施した。開発した振動監視装置は、IoT 機能が搭載されていない従来の機械装置に後から簡便に取り付けるため、データ通信を無線で行う、計測対象に合わせたセンサを選択できる、センサごとに複数の無線監視モジュールを使用可能である、計測したデータを収集・解析・処理する解析モジュールを用いるなどの特徴を持っている。これらの無線監視モジュールと解析モジュールを用いて機械装置の異常を検出し、モバイル端末に通知を行う無線式振動監視装置の開発を行った。

1. 緒言

県内中小製造業では、生産性を向上させるために、少人数で多くの機械装置を休みなく長時間稼働させたいという要望がある。CNC 工作機械を用いて機械加工を行っている企業では、工作機械の稼働率を上げることは利益に直結するため、工作機械の稼働状況を常時監視し、異常を早期に検出したいとの要望が増えている。これまでは、機械装置の異常を人間が見回り、音や振動により予兆を察知し、加工後の製品を観察することで機械装置や工具の異常を判断していた。しかし、このような判断には熟練を要するうえ、従業員に多くの時間的負荷をかけるため、人間に代わり自動的に機械装置の稼働状況や異常を監視できる装置の開発が求められている。このような問題を解決するために、機械装置にセンサを取り付け電流や振動データを解析することで異常を検出する研究が行われてきていた [1]~[4]。

一方、IoT (Internet of Things: もののインターネット) 技術の発達により、機械装置に複数のセンサを取り付け、取得したデータを品質工学や AI 処理により解析することで異常を検出する研究が行われてきている [5]~[6]。また、IoT に関する関心の高まりとともに、各種センサやマイコンボードなど安価な製品が発売されるようになってきた。このような安価な部品を用いることで、インターネット回線に接続して、機械装置を遠隔で監視する装置を安価に開発できるようになってきた。

そこで、本研究では、IoT 技術を応用し、機械装置に後付けで簡便に取り付けできる無線監視モジュールを試作し、試作した無線監視モジュールで計測した振動や電流のデータを解析モジュールで処理することで機械の稼働状況や異常を検出し、モバイル端末に通知を行う装置を開発することを目的として研究開発を行った。開発を行った振動監視装置の概要と性能確認実験の結果を以下で報告する。

2. システム構成

開発する無線ネットワークを用いた振動監視装置のシステム構成を図 1 に示す。開発する装置は振動データや電流データを計測し、無線ネットワークを用いてデータを送信することができる無線監視モジュールと、GPS から時刻信号を読み取り、無線監視モジュールに対して時刻同期信号を送信するとともに、無線監視モジュールからデータを収集し、収集したデータを解析することで機械装置の異常や稼働状況を検出する解析モジュールから構成される。

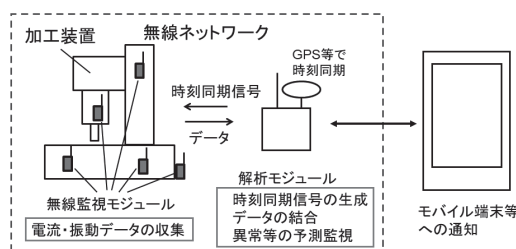


図 1 システム構成

各種センサに対応した無線監視モジュールと解析モジュールを用いてネットワークを構成することで、センサの種類や数、設置場所を、対象とする機械装置に合わせて容易に変更できる“無線ネットワークを用いた振動監視装置”となった。

以下では、開発した無線ネットワークを用いた振動監視装置の構成と、開発したソフトウェアについて述べる。

3. 加速度センサ

無線監視モジュールには、電流センサや振動センサを取り付け、機械装置から機械振動や電流に関する振動データを収集することに用いる。電流に関しては、平成28年度までに長崎県単独経常研究「機械装置知的遠隔監視装置の開発」⁴⁾で開発した手法を用いてクランプ式のCTセンサで取得することとした。

一方、機械振動の計測には、通常圧電式加速度ピックアップが使われる。しかし、圧電式加速度ピックアップは高価であるため、複数の台数を常時機械装置に取り付けて使用することは難しい。また、電荷での出力であるため、マイコンでデータを取り込むためにはチャージアンプなどの回路が必要となり大きさや容易に設置することが難しいという問題点もある。

一方、近年スマートフォンの傾きを測定するためのセンサとして利用されるMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて製造されたMEMS型加速度センサが流通している。このセンサは、1つのチップ部品に3軸の加速度センサを組み込んだものがあり、安価に入手できるものが多い。そこで、チップ型3軸加速度センサを機械装置の振動計測に使用できないか検討を行った。今回検討したチップ型3軸加速度センサはKionix社製KXR94-2050⁸⁾である。

圧電式加速度ピックアップと比較を行うために、圧電式加速度ピックアップとチップ型3軸加速度センサを振動試験装置に取り付け、正弦波で加振をし、ボード線図を用いて比較する実験を行った。加振の基準として圧電式加速度ピックアップであるIMV社製のVP-32を使用し、同じIMV社のVP-02SとMEMS型3軸加速度センサKXR94-2050により加速度の測定を行い、ボード線図を用いて評価を行った。使用した加速度センサの写真を図2に示す。

振動試験装置は、IMV社製のi230/SA2Mを使用した。加速度0.7[G]固定で、周波数5 Hzから2 kHzまでを1 oct/minの掃引速度で変化させながら加振を行い、加速

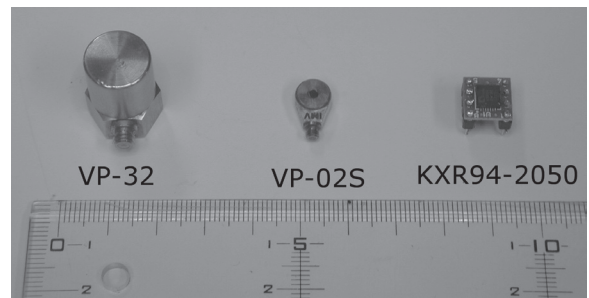


図2 加速度センサ

度の計測を行った。

圧電式加速度ピックアップVP-32とVP-02Sおよびチップ型3軸加速度センサKXR94-2050を、図3に示すように振動試験装置のキューブ型補助テーブルに固定して試験を行った。制御に用いた加速度ピックアップVP-32を基準としたボード線図を図4に示す。

試験の結果、KXR94-2050は200 Hz以上でゲインおよび位相の差が大きくなる現象を確認した。この結果、今回使用したチップ型3軸加速度センサでは高周波の

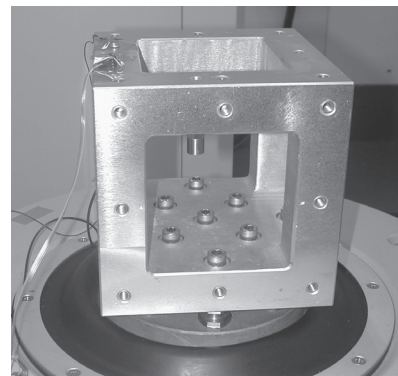


図3 試験装置の写真

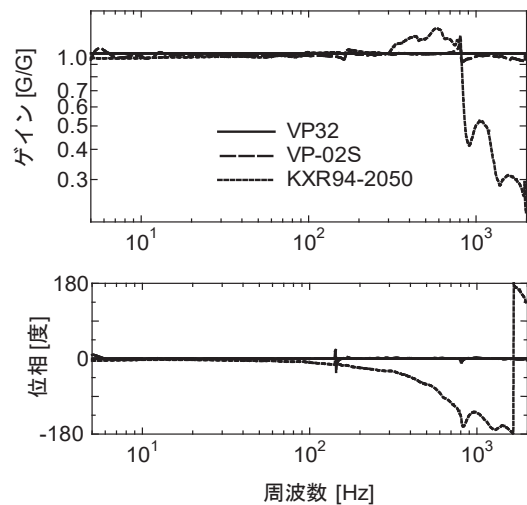


図4 測定結果

振動現象を対象とする測定には使用することは難しいが、比較的周波数が低い振動モードの計測には使用できることを確認した。

4. 無線監視モジュール

開発した振動監視装置では、特定のセンサを取り付けた複数の無線監視モジュールを機械装置に取り付けて使用することを想定している。現在、データの収集に使用できる無線通信として、Bluetooth、XBee、LoRaなど様々の規格があるが、今回は高速データ通信が可能で汎用性が高く、無線LANとしてインターネットとの親和性が最も高いWiFiを用いることとした。

WiFiを用いて電流データや振動データを収集するためには、WiFiモジュールの他に、振動センサのデータを読み込むAD変換器を備えデータ処理の演算を行うマイコンが必要となる。この場合、WiFiモジュール、マイコン、センサ処理の回路が必要となり装置が複雑で高価になることが考えられる。しかし、今回は安価に入手可能で、マイコンとしての利用も可能なEspressif Systems社のWiFi無線モジュールESP8266^{[9] - [11]}を用いることで、装置の小型軽量化と低価格化を目指した。使用したWiFi無線モジュールの写真を図5に示す。

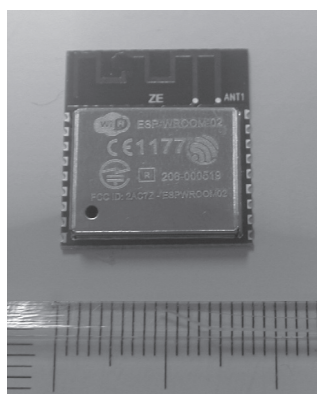


図5 WiFi無線モジュール (ESP8266)

ESP8266は元々WiFi無線モジュールとして使用することを想定した製品であるが、設定によりマイコンボードとして広く使用されているArduinoマイコンの統合開発環境でプログラム開発が可能となり、Arduino統合開発環境を用いればC言語に近いArduino言語でプログラム開発が可能となる。ただし、Arduino言語では同期プログラムで遅れが発生する恐れがあるため、同期プログラムの一部をアセンブリ言

語により記述することで、高速化を図った。

なお、ESP8266はアメリカTensilica社のXtensaマイクロプロセッサと互換性があるため、Xtensaアセンブリ言語^[12]をArduinoのインラインアセンブラ機能により記述し、試験を行った。1MHzの矩形波を入力信号とし、この矩形波の立ち上がりを検出し、デジタルIOに出力するプログラムをArduino言語とアセンブリ言語を併用したプログラムにより比較した。オシロスコープ(Tektronix製:TDS3014B)の機能により1秒間計測して算出した矩形波パルス信号に対する応答の遅れ時間の平均値と標準偏差を表1に示す。表1に示すように、アセンブリ言語を使用することで遅れ時間のばらつきを抑えることができることを確認した。

表1 矩形波に対する応答遅れ

	平均	標準偏差
Arduino言語	536 nsec	713 nsec
アセンブリ言語	410 nsec	96 nsec

研究開始当初は、ESP8266を用いて試作を行っていたが、研究中盤からは後継機種であるESP32が日本国内での使用可能となったので無線監視モジュールで使用するマイコンをESP32に変更した。ESP8266とESP32の性能比較表を表2に示す。

表2 ESP8266とESP32の比較^[13]

	ESP8266	ESP32
MCU	Xtensa Single-Core 32bit LX106	Xtensa Dual-Core 32bit LX6 With 600 DMIPS
802.11 b/g/n WiFi	HT20	HT40
Typical Frequency	80 MHz	160 MHz
SRAM	×	○
Flash	×	○
GPIO	17	36
Hardware/Software PWM	None/ 8channels	None/ 16channels
SPI/I2C/I2S/UART	2/1/2/2	4/2/2/2
ADC	10-bit	12-bit

表2でも明らかなように、ESP32はESP8266と比較して高機能となっているため、今後の開発はESP32を用いて行うこととした。ESP32とMEMS型3軸加速度センサKXR94-2050を用いて試作した振動用無線監視モジュールの写真を図6に、ESP32とCT

(OMRON:KM20-CTF-50A)、オペアンプ回路を用いて試作した電流用無線監視モジュールの写真を図7に示す。

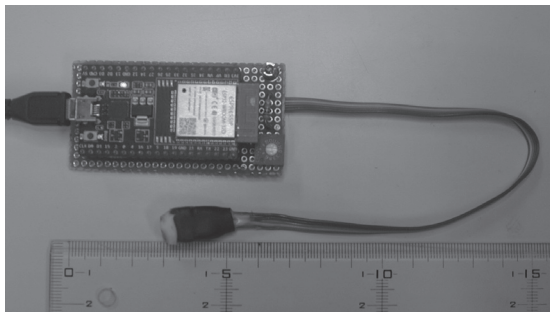


図6 振動用無線監視モジュール

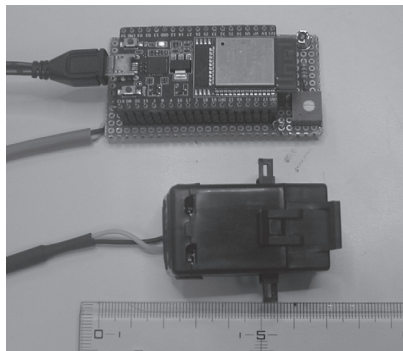


図7 電流用無線監視モジュール

複数台の無線監視モジュールを使用するために、それぞれの無線監視モジュールには個別のIPアドレスを割り振り、解析モジュールから制御を行える構成とした。

5. 解析モジュール

解析モジュールは、無線監視モジュールから送られてくる電流データ、振動データを収集すると共に解析を行う機能を有する。また併せて、計測の基準となる時刻同期信号をGPSから取得し、無線監視モジュールへ送信する機能が求められる。解析モジュールは、安価で入手可能でGPSとのデータ通信を行うためのUARTインターフェースおよびWiFi通信モジュールを搭載しているRaspberry Pi 3B+を用いて試作を行った。基準となる時刻同期信号は1秒ごとに同期信号を出力する機能を搭載したGPSを用いて取得した。今回GPSモジュールとしてGYSFDMAXB(太陽誘電社製)^[4]を使用した。試作した解析モジュールの写真を図8に示す。

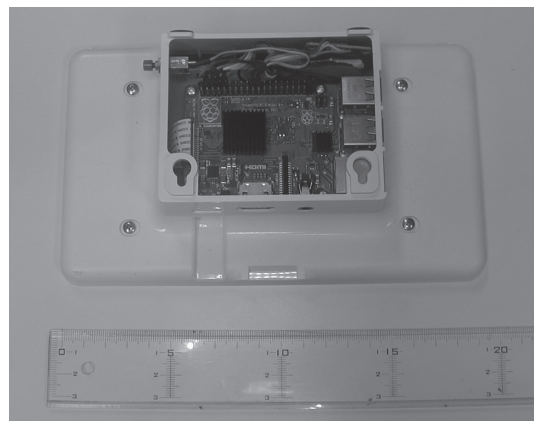


図8 解析モジュール

6. 測定実験

開発した振動監視装置の性能を確認するための実験を実施した。測定実験に用いたネットワークの構成を図9に、監視を行った外付けハードディスクと卓上ボール盤の写真を図10に示す。機械振動を測定するために加速度センサを取り付けた無線監視モジュールと電流計測のためのCTを取り付けた無線監視モジュールで取得した振動データはWiFiルータ経由で解析モジュールに送られる。解析モジュールでは送られてきた振動データを日付と時間を合わせたファイル名を付けて保存すると共に、データベースに登録する。また、FFT解析などを行い、機械を監視するための特徴量を抽出する。

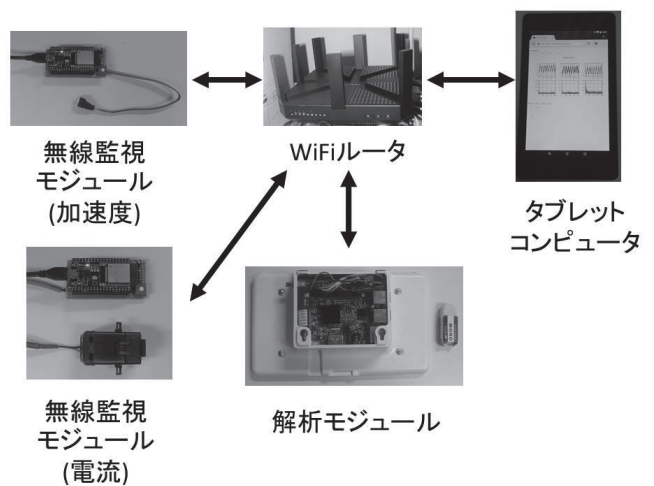


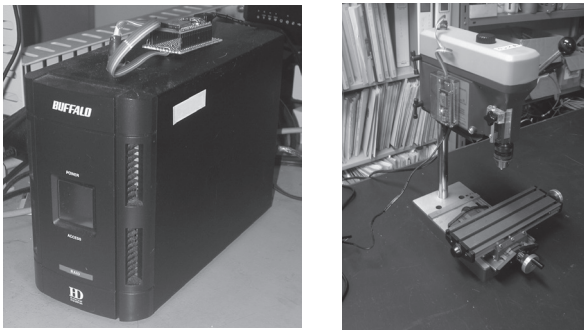
図9 振動監視装置ネットワーク構成

外付けハードディスクの機械振動測定例を図11に示す。図11はXYZの3軸方向の加速度を測定し、FFT解析した結果をWeb画面として表示した結果である。図11の上側3つのグラフは、それぞれXYZ軸方向の時間変化に対する加速度の変化を表している。

これらのグラフは、サンプリング周波数 30 kHz で 2048 点のデータを取得し表示した結果である。横軸は時間に相当するサンプル数、縦軸は加速度に相当する数値を表している。下のグラフは図 11 上側グラフを FFT 解析した結果である。ハニングウインドウ関数を使用した後、FFT 演算を行った結果で、横軸は周波数に相当する数値、縦軸は加速度に相当する数値を表している。

これらの FFT 解析結果を機械学習の特徴量として利用することを想定してプログラムを製作した。

また、1 分ごとに測定した加速度データを二乗平均し振動の大きさに相当する数値を算出し、振動の大きさの変化量を算出したグラフを図 12 に示す。図 12 は



(a) 外付けハードディスク (b) 卓上ボール盤

図 10 振動計測実験対象

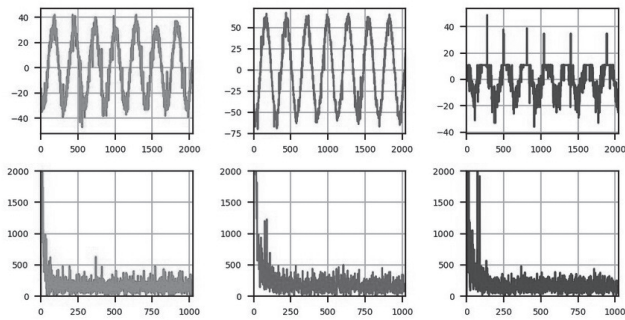


図 11 3 軸方向加速度測定例

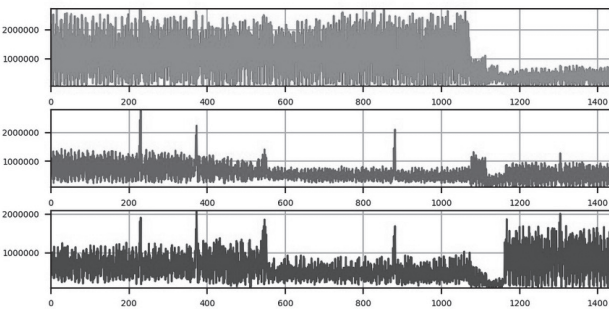


図 12 3 軸方向加速度の時間変化

24 時間の振動変化を表しており、時間ごとの変化を確認することができる。

電流の測定結果を図 13 に示す。図 13 の上側グラフの縦軸は、電流に相当する数値、横軸は時間に相当するサンプル数である。図 13 の上側のグラフでは、測定結果はサンプリング周波数約 30 kHz で 2048 点のデータを取得し表示したものである。下の図は、上の図のデータにハニングウインドウ関数を使用した後に FFT 解析を行った結果である。今回開発した装置では、機械振動および電流振動の測定を 1 分ごとに実施し、測定データを、無線監視モジュールの番号、センサ名、取得日時の情報と合わせて解析モジュールのデータベースに記録している。

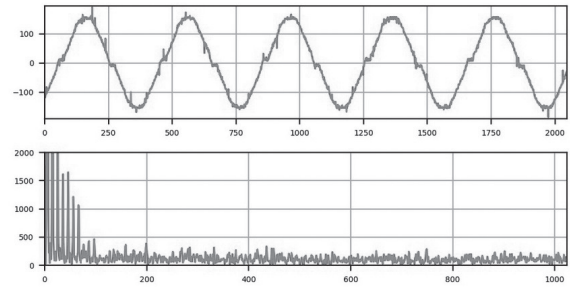


図 13 電流の測定例

今回、データベースとして MySQL を用いた。また、測定したデータは機械装置、センサ、取得日のディレクトリに分けて自動的に分類され、取得した日時のファイル名を付けた CSV ファイルとして解析モジュールに保存する。保存した CSV ファイルは Web ブラウザを介して端末から閲覧やダウンロード可能としている。CSV ファイルの閲覧画面の例を図 14 に示す。開



図 14 CSV ファイル閲覧画面の例

発した解析モジュールには、測定したデータを解析し、特定の条件から外れた場合には、電子メールや SNS (Social Networking Service) を用いてスマートフォンに通知する機能を搭載した。

今回使用した SNS ソフトは、日本国内で多くの人が使用している、Chatwork (株) の Chatwork と LINE (株) の LINE を用いた。

図 15 に LINE による通知の例を示す。この例は、加速度センサからの信号が事前に設定した特徴量から外れた場合の通知結果であり、現象を確認した時間とそのときに測定した振動波形のグラフおよび FFT 解析の結果をグラフとして LINE Notify^[15] というサービスを用いて通知した結果である。

解析モジュールのプログラムは Python3.5.3 を用いて開発した。

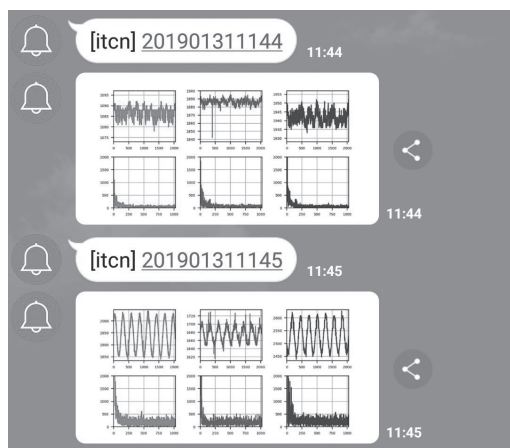


図 15 LINE での通知画面の例

5. 結 言

無線監視モジュールと解析モジュールで構成される振動監視装置を開発した。WiFi 通信によりデータを送信できる複数の無線監視モジュールを用いることで、IoT 機能が搭載されていない機械装置に容易に取り付け可能となった。また、無線監視モジュールから送られてくる振動データを解析モジュールで処理することで、電子メールや SNS を用いた異常通知が可能となった。

参考文献

[1] 三笥, 陳山: 多変量解析による回転機械の状態判定基準値の決定法、SICE 産業論文集 Vol.5, No.12, pp83-89, 2006.

- [2] 大庭 他 4 名: 振動解析に基づく新幹線台車の状態監視、JSME 論文集 (C), 75 巻 757, pp93-101, 2009-9.
- [3] 近藤 他 3 名: 振動のオクターブバンド分析を用いた車両用ディーゼル機関の異常通知手法、RTRI REPORT Vol.29, No.9, pp17-22, 2015.
- [4] 植松 他 4 名: 動作音から機器の異常を検知する異常音検知技術、NTT 技術ジャーナル 2017.6, pp24-27, 2017.
- [5] 神生 他 3 名: パターン認識技術を用いた設備保全診断システムの開発、北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.309, pp97-103, 2010.
- [6] 高橋: 製造業 IoT 向け振動による異常検知、OKI テクニカルレビュー, 第 230 号 Vol.84, No.2, pp30-33, 2017.
- [7] 田口: 機械装置知的遠隔監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告 No45, pp10-14, 2016.
- [8] <http://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-2050 Specifications Rev 03.pdf>, Accessed 2016.
- [9] 国野: ESP スタータ・キット×ブレッドボードで作る IoT 実験ボード、トランジスタ技術 2016 年 9 月号, pp45-53, 2016.
- [10] <https://github.com/esp8266/Arduino/>, Accessed 2016.
- [11] <https://www.switch-science.com/catalog/2500/>, Accessed 2016.
- [12] Xtensa Instruction Set Architecture (ISA) Reference Manual/, Accessed 2016.
- [13] <https://makeradvisor.com/esp32-vs-esp8266/>, Accessed 2019.
- [14] <https://www.yuden.co.jp/jp/product/category/module/GYSFDMAXB.html>, Accessed 2016.
- [15] <https://notify-bot.line.me/ja/>, Accessed 2017.