

工場配管の圧力調整器監視 IoT システムの開発

Development of an IoT System for Monitoring Pressure Regulators in Factory Piping

電子・機械技術部 電子・情報科 柿崎正貴 三瓶史花

窒素ガス配管の圧力推移をモニタリングするため、圧力計（アナログメータ）から画像処理によって圧力値を算出するアルゴリズムを開発・実装し、時系列でデータ保存・参照する IoT システムを開発した。本システムを実際の工場へ導入し、圧力値検出性能評価及び長期稼働試験を行った結果、データ取得した 62912[events]の内、誤検出及びデータロスによる不検出が 145[events]発生し、検出率は 99.8[%]となった。また、実験期間 52 日間、システムが安定稼働することを確認した。

Key words: IoT、画像処理、OpenCV、Ambient、アナログメータ

1. 緒言

窒素ガスは、超低温液化ガス貯槽装置（Cold Evaporator, 以下 CE 装置）から各工場へ供給しており、CE 装置の元バルブを開閉することで供給を制御している。工場非稼働日等に元バルブを完全に閉めると、配管内の圧力低下により空気が流入し、不良品発生の一因となる。そこで、元バルブの開閉状態を調整することで配管内の圧力低下を抑制することができるか確認するために、CE 装置及び工場末端の圧力値の推移をモニタリングしたいというニーズがある。

本事業では、CE 装置及び工場末端の圧力計から圧力値を検出し、圧力推移を常時モニタリングする IoT システムを開発した。また、当所施設内で圧力値検出の機能検証を行い、実際の工場へ導入することで、本システムの実証実験を行った。

2. システム構築

2. 1. 概要

図 1 に、構築した IoT システムの概要を示す。ターゲットとなる圧力計は、屋外に設置された CE 装置の圧力計及び工場末端（屋内）に設置された圧力計の 2 種類である。これらの圧力計はアナログメータであり、デジタルインターフェースから直接圧力値を取得することができない。そのため本システムでは、図 1 中のイメージセンサデバイスによってメータの表示板を撮影し、その画像から画像処理によって圧力値を算出することで、数値データとして取得する方式とした。

図のように、CE 装置及び工場末端の圧力計にそれぞれイメージセンサデバイスを取付け、メータ表示板の画像を取得した後、デバイス内のマイコンで画像処理及び圧力値算出を行い、圧力値のデータを無線 LAN によりクラウドサーバへ送信する。圧力値のデータは時刻情報とともにクラウドサーバへ蓄積され、サーバにアクセスすることで時系列データとして参照する構成とした。

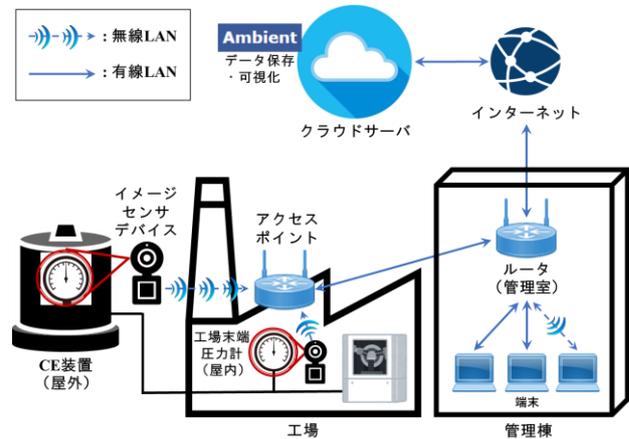


図 1 圧力計監視 IoT システム概要

イメージセンサデバイスは既設のメータに後付け可能で、製造設備の停止や配置変更が必要なく導入できる。また、データ伝送は工場既設の IP ネットワークを活用し、無料のクラウドサービスを利用してローカルサーバを置かない構成とすることで、初期コストとメンテナンスコストを低減した。さらに、同一 LAN に接続した端末から、デバイスのリモートメンテナンスや死活監視、圧力計の遠隔目視検査が可能なシステムとした。

2. 2. イメージセンサデバイス

本事業で開発したイメージセンサデバイスの外観及び部品構成を図 2 に示す。カメラモジュールとして Raspberry Pi Camera V2¹⁾ を、マイコンとして Raspberry Pi Zero 2W²⁾ を使用した。また、夜間でもメータ画像が取得できるよう、カメラモジュール下部に LED ライトを配置した。電源は、AC アダプタ及び USB ケーブルを用いて、マイコン及び LED ライトへ DC5V を供給した。さらに、防水・防塵のため、カメラモジュールやマイコン、ケーブル等を 3D プリンタで製作した筐体に収め、シーリング処理を行った。

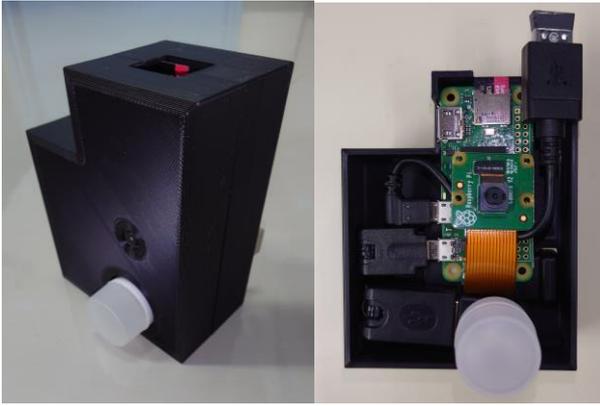


図2 イメージセンサデバイス外観及び部品構成

2. 3. 画像処理アルゴリズム

図3に、アナログメータの画像から圧力値を算出するアルゴリズムを示す。まず、イメージセンサデバイスで取得した画像（元画像）をグレースケール化した後、ヒストグラム均一化により、工場照明や屋外光が変化した際の影響を抑制した。また、画像中にメータ表示板のヘアライン加工による凹凸由来のスパイクノイズが発生したため、平滑化フィルタ（メディアンフィルタ³⁾）処理を行うことで、スパイクノイズの影響を抑制した。さらに、適応的閾値による二値化処理⁴⁾を行うことで、局所的な光源環境の差異に影響されことなく、メータ表示板や針の形状を抽出することが可能とした。

画像中からメータ部分を抽出するために、Hough 変換⁵⁾による円検出を行った後、Canny 法によるエッジ検出⁶⁾を行った。さらに、メータ表示板下部の標識等、画像処理に不要な領域をマスク処理により除去した後、Hough 変換による直線検出を行い、検出した2本の直線のパラメータから、メータの圧力値を算出した。

なお、圧力値の単位（MPa、kgf/cm²等）、メータの最大値、メータの針角度に対応する圧力値、及びメータ画像からマスクする領域は、メータ毎に異なるため、これらのパラメータは実機を参考に手入力した。

プログラムは、Raspberry Pi OS⁷⁾上でPython⁸⁾及びOpenCV⁹⁾を用いて開発し、デバイス単体で動作するように開発環境を構築した。

2. 4. クラウドサービス

データ保存・可視化のためのクラウドサービスとして、Ambient¹⁰⁾を利用した。アンビエントデータ株式会社が開発する本サービスは、1 ユーザーあたり 8 チャンネル×8 データまで無償利用可能で、図4のようにチャンネル毎のデータをグラフ表示することができる。また、登録したデータはチャンネル・データ毎にCSVで出力可能である。

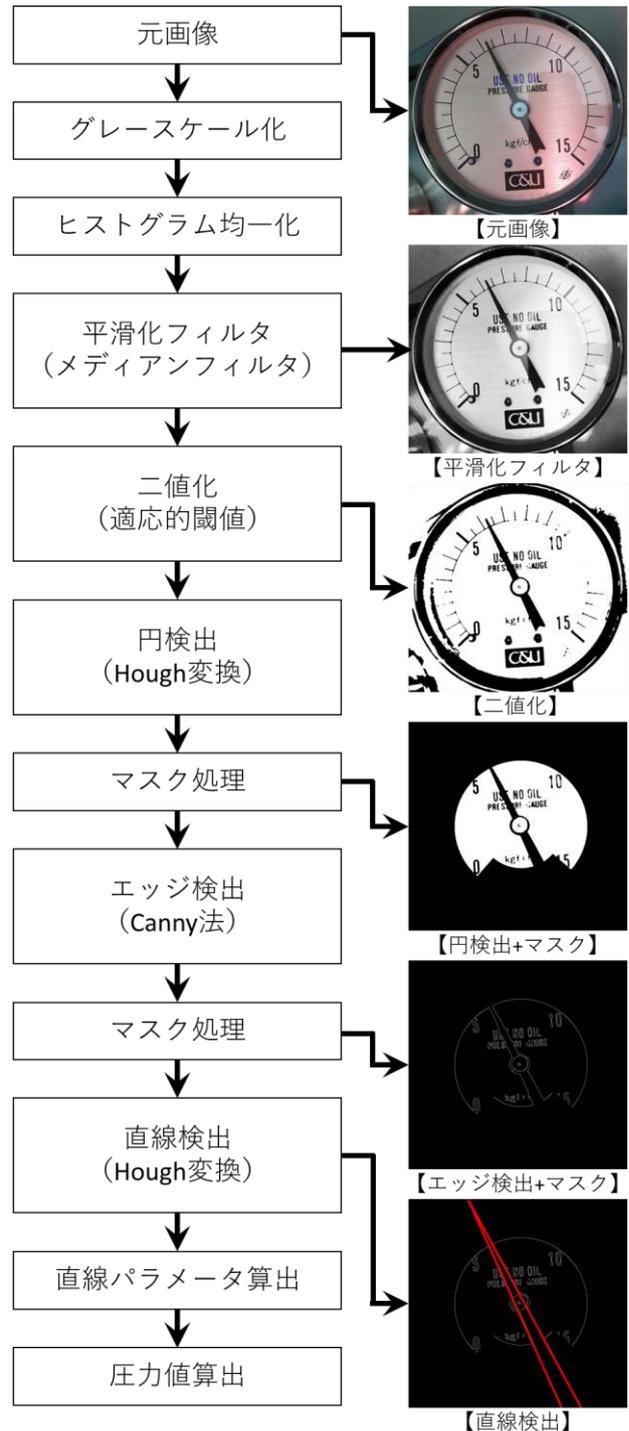


図3 画像処理アルゴリズム

本システムでは、イメージセンサデバイスから圧力値データデータを Ambient へ送信し、管理棟の端末で圧力推移をグラフ表示・監視するとともに、圧力推移の履歴を CSV で出力・管理する構成とした。また、Ambient へのデータ送信頻度は、1 チャンネルあたり 1 日 3,000 件まで（平均 28.8 秒に 1 回）という Ambient の無償利用条件を考慮し、1 分あたり 1 回に設定した。

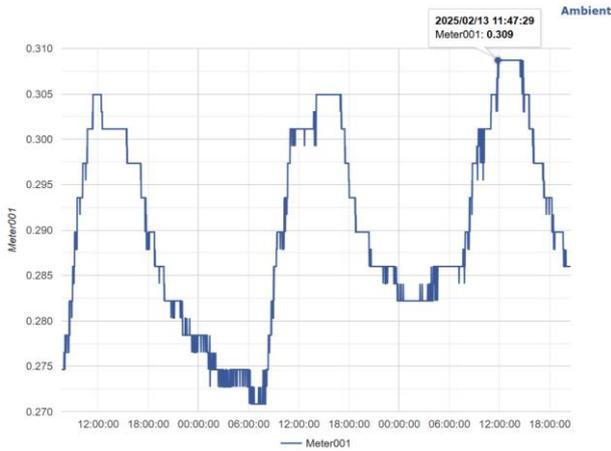


図4 Ambientによるデータ表示画面

3. 機能検証

本システムを当所施設内に導入し、圧力値検出の機能検証を行った。図5に、圧力計（アナログメータ）にイメージセンサデバイスを取付けた際の外観を示す。フレキシブルアームスタンドを使用して、メータ正面にカメラが配置されるよう固定した。

図6に、デバイスで取得したカメラ画像及び画像処理結果を示す。図中緑円は円検出（Hough変換）によって抽出したメータ表示板の領域、図中青線はメータの最小値及び最大値の目盛り位置、赤線は直線検出（Hough変換）によって検出したメータ針のエッジである。なお、メータの目盛り線が直線検出時のノイズとなるため、円検出では目盛り線の内側のみをメータ表示板の領域として抽出している。

図6のとおり、画像中からメータ針を検出し、検出結果から圧力値の算出が可能であることを確認した。



図5 圧力計へのイメージセンサデバイス設置



図6 画像処理による圧力値データ取得

4. 実証実験

4. 1. 実験

本システムをA社に導入し、実現場における圧力値検出性能評価及び長期稼働試験を行った。イメージセンサデバイスを工場末端の圧力計へ設置し、工場既設の無線LANにより Ambient へ1分間隔でデータ送信した。実験期間は2024/12/24から2025/2/13までの52日間とした。

4. 2. 結果

図7に、本システムで取得した圧力値データの推移を示す。圧力値は0.11[MPa]から0.33[MPa]の間で推移しており、実際のメータを目視確認した値とほぼ一致した。一方、上記圧力範囲から0.1[MPa]以上離れた外れ値（図中赤丸）を誤検出と判定すると、期間中に4[events]発生した。また、Ambientで2分以上データ受信がない期間をデータロストと判定すると、141[events]発生した。これらを合算した145[events]を全て不検出と仮定すると、全イベント数62912[events]に対し、検出可能なイベント数は62767[events]、検出率は99.8[%]となった。

本システムは実験期間中、ハードウェア及びソフトウェアの故障・不具合が発生することなく安定して稼働した。

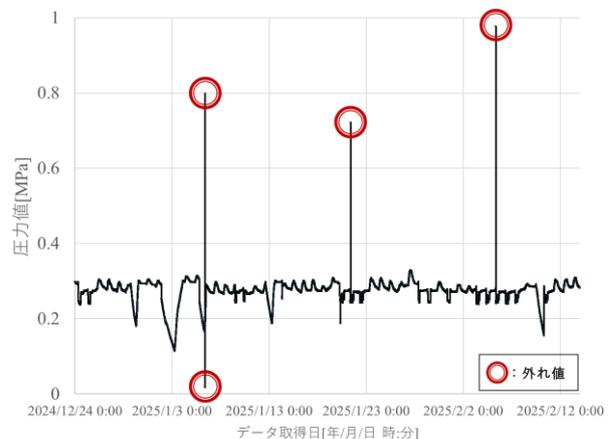


図7 工場末端圧力計の圧力値データ推移

4. 3. 考察

外れ値について、発生した時刻を下記に示す。

- 2025/1/6 9:29
- 2025/1/6 9:44
- 2025/1/21 9:24
- 2025/2/5 8:37

2025/1/6 9:29 及び 2025/1/6 9:44 の 2 イベントについて、企業担当者に調査を依頼したところ、同時刻に CE 装置のタンク内圧調整を行っており、その際に圧力値が大きく変化する可能性があることが分かった。また、2025/1/21 9:24 及び 2025/2/5 8:37 の外れ値についても、同様の時間帯に発生しており、同じ現象が起きた可能性がある。今回の評価では外れ値すべてを誤検出と判定したが、今後これらのイベントについて、詳細を調査する必要がある。

データロストについては、画像処理結果で 3 本以上の直線が検出されたパターン、及び Ambient へのデータ送信に失敗したパターンの 2 パターンを合算したイベント数であり、今後原因を切り分けて調査する必要がある。

今後は、誤検出とデータロストのイベントについて、発生原因を詳細に調査するとともに、CE 装置へのイメージセンサデバイス取付け及びデータ取得を行う。また、画像処理アルゴリズムの改良やデータ通信の信頼性向上等、検出率の向上に向けたシステムアップデートを行う予定である。

5. 結言

窒素ガス配管の圧力推移をモニタリングすることを目的として、CE 装置及び工場末端の圧力計から圧力値を取得し、時系列で保存・参照するための IoT システムを開発した。

圧力計（アナログメータ）から画像処理によって圧力値を算出するアルゴリズムを開発・実装し、クラウドサービス Ambient を利用してデータ保存・参照するシステムを構築した。また、ハイテクプラザ施設内で本システムの機能検証を行い、画像処理による圧力値検出が可能であることを確認した。

さらに、本システムを A 社に導入し、圧力値検出性能評価及び長期稼働試験を行った。実験期間 52 日間で 62912[events]取得した内、誤検出及びデータロストが計 145[events]発生し、検出率は 99.8[%]となった。なお期間中、システムの不具合は発生せず、安定して稼働していた。

今後は、誤検出とデータロストの発生原因を調査するとともに、CE 装置への導入、及びパラメータ自動入力機能等のシステムアップデートを行う予定である。

参考文献

- 1) “Buy a Raspberry Pi Camera Module 2 - Raspberry Pi”. Raspberry Pi Foundation. <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2/>, (参照 2025-2-12).
- 2) “Buy a Raspberry Pi Zero 2 W - Raspberry Pi”. Raspberry Pi Foundation. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/>, (参照 2025-2-12).
- 3) J. W. Tukey. Exploratory Data Analysis (preliminary ed.). Reading, MA: Addison-Wesley, 1971.
- 4) Bradley, D., & Roth, G. (2007). Adaptive Thresholding Using the Integral Image. Journal of Graphics Tools, 12(2), 13-21.
- 5) Hough, P. V. C. (1962). Method and Means for Recognizing Complex Patterns. U. S. Patent 3,069,654.
- 6) Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6), 679-698.
- 7) “Raspberry Pi OS - Raspberry Pi Documentation “. Raspberry Pi Foundation. <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html>, (参照 2025-2-12).
- 8) “Welcome to Python.org “. Python Software Foundation. <https://www.python.org/>, (参照 2025-2-12).
- 9) “OpenCV - Open Computer Vision Library “. OpenCV team. <https://opencv.org/>, (参照 2025-2-12).
- 10) “IoT データ可視化サービス Ambient”. AmbientData Inc.. <https://ambidata.io/>, (参照 2025-2-12).