

# 自律制御型ロボットを利用した換気システムの製作

## A novel ventilation system using an autonomous robot

伊藤 清人\* 井上 零 川邊 圭汰 宮崎 裕也 濱口 裕輝

Kiyoto Ito\*, Rei Inoue, Keita Kawabe, Yuya Miyazaki, and Yuki Hamaguchi

三重県立四日市工業高等学校 ものづくり創造専攻科  
Mie Prefectural Yokkaichi Technical School

### Abstract:

新型コロナウイルスが蔓延し、感染症対策が重要となっている。その際に、対策の効果を可視化したり自動化することが必要となる。本研究の目的は、新型コロナウイルス感染症対策において、効果の「可視化」及び「自動化」を実現することである。そこで本研究では、可視化のために組込マイコンと CO<sub>2</sub> センサーを用いた IoT エッジデバイスを開発し、教室内の CO<sub>2</sub> 濃度を表示する。また、自動化においては、ロボットを用いて教室換気を自動的に行う。具体的には、自律型無人搬送車 Robotino を Wi-Fi で接続し、カメラやレーザーファインダーを活用した自律制御により、扉を開けて無人で換気を行うシステムを提案し、構築する。本システムは、自律制御技術を活用して無人換気を実現することを目指している。

## 1. まえがき

現在、新型コロナウイルス感染は広まりを見せ、全国で陽性者数が 3,349 万人を超える状況となっている[1]。このような状況下で、厚生労働省では感染防止対策を積極的に提案しており、換気の重要性が強く指摘されている。具体的には、毎時 2 回以上の換気回数と 2 方向の壁の窓を開放することが推奨されている[2]。しかしながら、換気状況や感染対策の効果は目で確認できず、感染リスクの把握が困難であるため、換気などの感染対策が不十分となることがある。

このような状況に対して、本研究では換気状況の評価手法として、CO<sub>2</sub>濃度を数値化することで可視化し、自律制御型ロボットを用いた換気作業を検討する。換気状況を把握し、適切な換気作業を行うことで、感染リスクを低減させることが期待される。本研究によって、より効果的かつ実用的な換気対策の開発に寄与することを目指す。

## 2. 換気システムの提案

本研究では、新型コロナウイルス感染症対策における自動化の提案を行う。具体的には、移動式換気ロボットの導入、IoT エッジデバイスの活用、CO<sub>2</sub> センサーによる感染症対策の可視化、移動ロボットの位置同定および移動、扉マーカの設置である。

### 提案 1 移動式換気ロボットの導入

まず、移動式換気ロボットを導入することで、室内の感染のリスクが高くなった場合には、ロボットが部屋の前に移動して換気を行い、扉の開放を行う。また、換気のタイミングや誰が換気作業をするか明確でない場所においては、ロボットが作業を行うことで、より確実な効果が期待できる。

### 提案 2 IoT エッジデバイスの活用

対象となる部屋には IoT エッジデバイスを設置する。これにより、CO<sub>2</sub> 濃度を測定し表示することで感染症対策の可視化を行い、クラウドサーバーおよび移動式換気ロボットに CO<sub>2</sub> 濃度データを送信する。また、クラウドサーバーでは CO<sub>2</sub> 濃度が規定値以上に達した場合には、メールによる注意喚起を行う。IoT エッジデバイスにおいては野中ら (2019) により市販の IoT プロトタイプキットを利用し、センサーの値をスマートフォンの通信アプリに送信する技術の実用性も示されている[3]。

提案 3 CO<sub>2</sub> センサーによる感染症対策の可視化  
感染症対策の可視化の指標として CO<sub>2</sub> の濃度を用

\*連絡先 三重県立四日市工業高等学校, 四日市市  
Mie Prefectural Yokkaichi Technical High School  
3-4-63 Hinaga-Higashi, Yokkaichi-shi, Mie, 510-0886 Japan

E-mail: i.kiyoto@mxs.mie-c.ed.jp

いることを提案する。建物内における CO<sub>2</sub> 濃度は、建築物における衛生的環境の確保に関する法律（ビル管理法）で規定され、1000ppm 以下という基準が設けられている。これにより、適切な換気量を確保することが求められる。

#### 提案4 移動式換気ロボット位置同定と移動

移動ロボットの位置同定にはタグマーカを使用し、各部屋の入口にタグマーカを用意することで、移動式換気ロボットの位置同定を行う。移動は床面の状態に大きく影響を受けるため、タグマーカで姿勢を修正したうえで行う。

#### 提案5 扉マーカの取付け

扉にはドアハンドルの下にマーカを取り付け、カメラで認識をさせることで、扉の開閉状態とロボットアームの位置制御を行わせることを提案する。これにより正確な扉の開放の実現が期待できる。

以上の提案を実装することで、新型コロナウイルス感染症対策の可視化および自動化を実現し、効果的な感染症対策を行うことを目指す。

### 3. 実装

図1に示すシステムを開発する。

教室内に設置した IoT エッジデバイスは、CO<sub>2</sub> 濃度を測定し、表示するとともに、クラウドサーバーおよび移動式換気ロボットへ CO<sub>2</sub> 濃度データを送信する機能を有している。

移動式換気ロボットは、IoT エッジデバイスから受け取った CO<sub>2</sub> 濃度データを基に、対象の教室まで移動し、扉を開放する。

また、クラウドサーバーは、IoT エッジデバイスから受け取ったデータが規定値を超えた場合、設定されたメールアドレスに換気を促すメールを送信する。また、CO<sub>2</sub> 濃度はリアルタイムでブラウザから確認

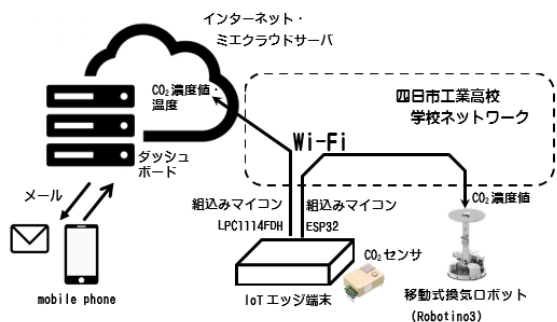


図1 システム構成図



図2 IoT エッジデバイス

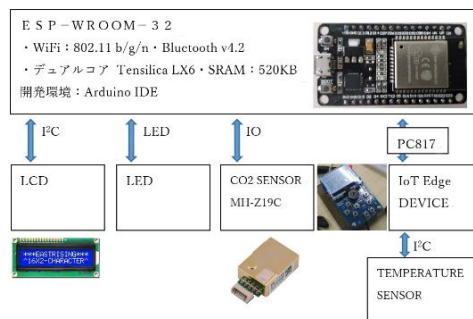


図3 IoT エッジデバイス構成

することができる。

#### 3.1 IoT エッジデバイス

この研究で用いた IoT エッジデバイス (図2) には、2つの MPU を搭載した。そのうち1つは、主に CO<sub>2</sub> 濃度の測定やロボットへのデータ送信に使用される組込マイコン (ESP-WROOM-32) であり、もう1つは三重 ICT・データサイエンス推進協議会が提供する IoT エッジデバイス (LPC1114FDH) で、クラウドサーバーへのデータ送信に用いた[4]。MPU とセンサー・表示部は I2C および GPIO で接続されている (図3)。

IoT エッジデバイスで用いた CO<sub>2</sub> センサーは、Zhengzhou Winsen Electronics Technology 社製の MH-Z19C とする。このセンサーは、非分散型赤外線 (NDIR) 方式の CO<sub>2</sub> センサーであり、I2C および PWM でデータを出力することができる[5]。今回は PWM 出力を利用してデータ処理を行う。また、このセンサーは安定かつ正確な 5V 電源を必要とするため、昇圧用 DCDC コンバーター XCL103 (トレックセミコンダクタ製) を使用して基準電圧を供給する。



図4 ダッシュボード

IoT エッジデバイスからクラウドサーバーに送信されたデータはダッシュボードに上(図4)で確認が可能であり、CO<sub>2</sub> 濃度が設定値を超えた場合は、サーバーより管理者へ警告メールを送信する。

IoT エッジデバイスとクラウドサーバーの通信には、HTTP における POST メソッドおよび GET メソッドが用いられ、クラウドサーバーは株式会社ロジセンス内のシステムを活用する。

IoT エッジデバイスと移動式換気ロボットとの間の通信において、UDP を採用することとする。具体的には、ESP-WROOM-32 を使い、CO<sub>2</sub> センサーの計測値を 36 バイトのデータ形式[6]に変換し、移動式換気ロボットへ送信する。

### 3.2 移動式換気ロボット

製作した移動式換気ロボットを示す(図5)。移動

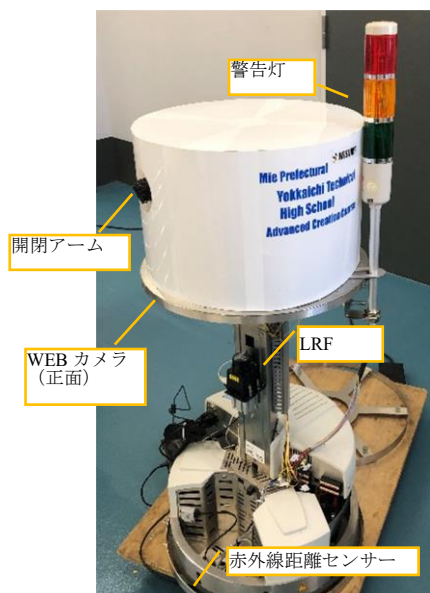


図5 換気ロボットの外観

式換気ロボットはFESTO社製 Robotino3 をベースとして製作した。Robotino3 は全方向性ドライブによるモバイルロボットシステムであり、3個のオムニホイールによって、その場で回転および移動を行う。また自律制御により赤外線距離センサー、カメラ、ジャイロ、LRF を搭載することで多様な用途への利用が可能である。移動式換気ロボットの制御ボードおよびリニアアクチュエータ(図6)・システム構成を示す(図7)。

移動式換気ロボットを使用してスライドドアの開放を行う。そのために、リニアアクチュエータのアームをドアハンドルまで伸ばし、移動式換気ロボットを移動させてドアを開くようにする(図8)。ただし、ドアが既に開いている場合は、何もせずにロボットをスタート位置に戻す。

リニアアクチュエータは24Vで駆動し、Hブリッジを構成するために通常開放型リレーを使用し、ロボットからの信号で制御する。ドアを開く際には、アクチュエータのアームに大きな荷重がかかるため、

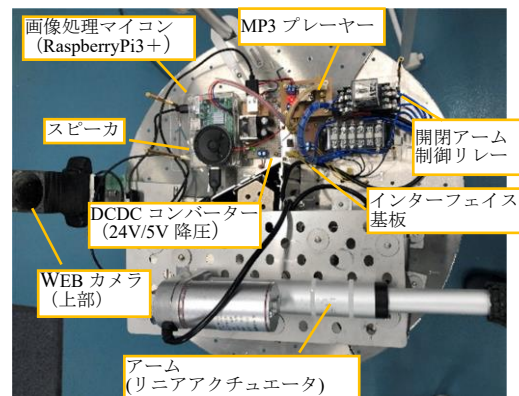


図6 制御ボード リニアアクチュエータ

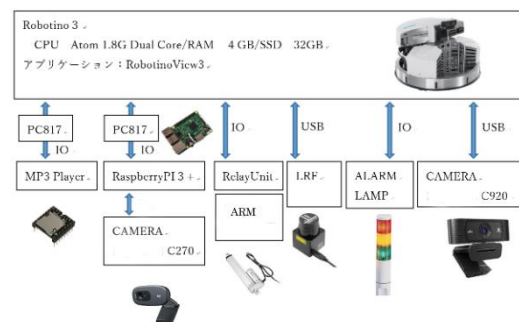


図7 換気ロボット構成



図8 アームによる扉開放

金属製のテーブルを設計し、Robotino に固定することで対応する。

運転中は表示灯によって移動式換気ロボットの動作状況が示される。また、事故防止のために LRF を用いて移動方向の障害物を検知し、障害物が正面照射角  $50^\circ$  で  $0.50\text{m}$  以内に検知された場合は、ロボットが停止し、障害物が移動するまで待機をする。その際に、表示灯を赤色にするとともに、音声で警告を行う。

### 3.3 移動式換気ロボットの制御

移動式換気ロボットの制御に、FESTO 社製 Robotino View3 を使用した (図 9)。制御プログラムは、フランスで提唱された機能表現の手法である GRAFCET を用いて表現される。GRAFCET は、ステップとトランジションの 2 種類のノードを使用して表現される [7]。

Robotino View3 におけるステップは、モータ、I/O、センサー、カメラ、オドメータ、ネットワーク、ナビゲーションなどが組み合わされたファンクションブロックによって構成される。

### 3.4 移動式換気ロボットの位置同定・移動

今回のロボットの位置同定は、車輪やステアリングの回転角度から計算し、それぞれの移動距離を求め、その累積から行われている。しかし、実測する

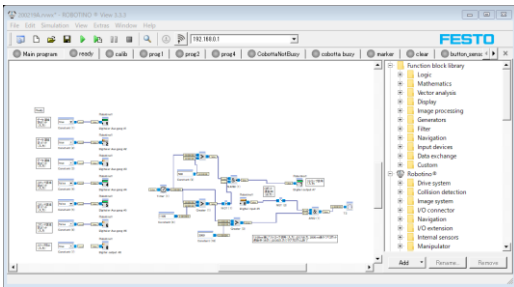


図9 Robotino View3 画面

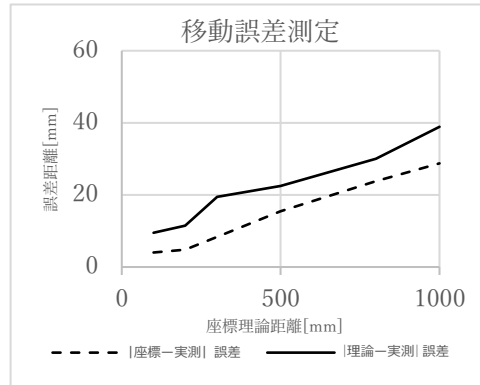


図10 座標値と実測値の誤差

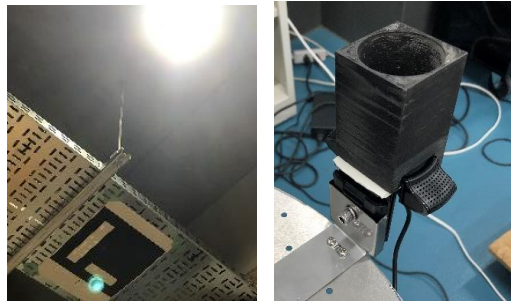


図11 タグマーカとレンズフード

と床面とのすべりなど条件により誤差が生じるため、移動誤差の測定を行い、理論値 (PositionDriver による設定値) と実測値 (実際の座標) を比較した。また、座標値 (オドメトリ値) も比較を行った (図 10)。測定の結果、Robotino の加減速直線移動 (上限  $150\text{mm/s}$ )  $1000\text{mm}$  で  $39\text{mm}$  の実測値と理論値誤差が発生した。そこで、各扉の上にタグマーカ (図 11) を用意して位置補正することとした。タグマーカは A3 サイズで、目立たないよう天井にあるワイヤラックに張り付け、WEB カメラで認識し、位置および回転角の補正を行った。

タグマーカの認識においては、照明が大きく影響を及ぼすことがある。今回の場合は、ダウンライトがタグマーカの隣に設置されており、カメラ画像が白飛びを起こす現象が確認された。

そこで、WEB カメラ用にレンズフードを設計製作することにより、不要なダウンライトの直接光を遮断し、タグマーカを読み取ることが可能となった (図 12)。

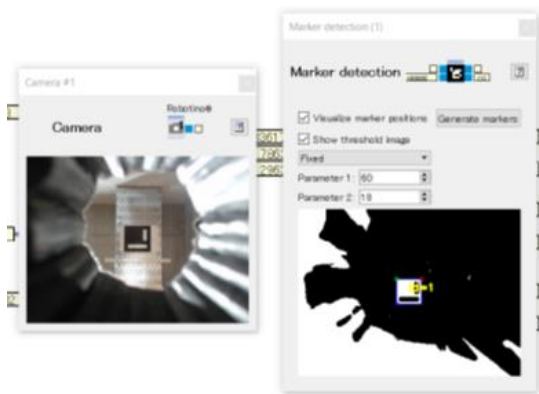


図 12 レンズフレアによる認識

### 3.5 扉位置の画像認識

扉のハンドル下に 5mm のマーカを取り付けし、WEB カメラでマーカの有無を認識する。マーカがあるかどうかで扉の開閉状態を認識し、移動式換気ロボットの姿勢を補正する。画像認識には、組込マイコン (RaspberryPi3+) を使用し、スムーズかつ安定した認識を実現する。

画像処理は C 言語と OpenCV を使用し、認識にはカラーベースの方法で HSV を用いる。HSV を用いることで、明度ではなく色相でマーカの色を識別し、照明の影響を軽減し、扉位置の識別が容易となる。

画像からマーカの色を認識して 2 値化し(図 13)、その位置からロボットの姿勢を補正して、リニアアクチュエータを駆動する。ただし、マーカの色を認識できない場合は、ドアが開いている状態として、開放動作は行わない。

### 3.6 評価

今回は、専攻科棟 2 階の廊下 (直線約 18m・フローリング床) と PC 室 (スライドドア) において実験を実施した。エッジ端末の CO<sub>2</sub> 濃度を呼気により上昇させることで、換気ロボットが動作し、扉の開放

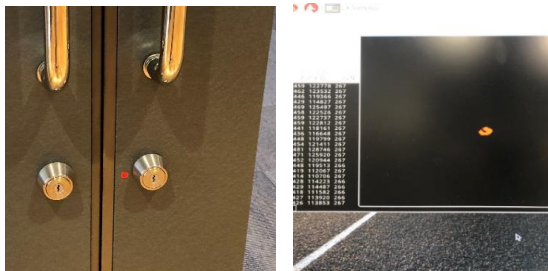


図 13 扉のマーカと 2 値化画像

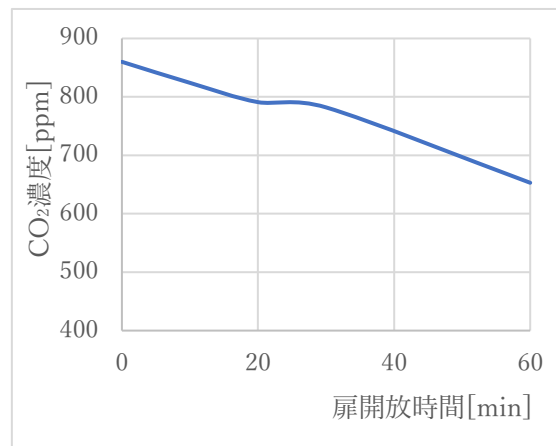


図 14 扉開放時間と CO<sub>2</sub> 濃度の変化

が行えることを確認した。しかしながら、現在開放できる扉はスライドドアに限られており、開き戸や折り戸には対応することができず、今後の課題とした。

また、扉を開放した教室において CO<sub>2</sub> 濃度の変化を図 14 に示す。CO<sub>2</sub> が高濃度状態の教室を故意に用意することは困難なため、ロボットが扉を開放したと想定し、手で扉を開け、講義中の教室で CO<sub>2</sub> 濃度を観測した。条件としては、学生 20 名在室、教室床面積 45.5m<sup>2</sup>、全熱交換形換気機器運転、屋外側窓 (1 か所)、廊下側窓 (1 か所) 20 cm 開放済みとする。開始時は 860ppm であったが、10 分後には 824ppm、20 分後に 791ppm、30 分後に 782ppm、1 時間後に 653ppm への減少した。

本研究の結果は、ロボットによる自動換気が新型コロナウイルス感染症対策に有効であることを示唆しており、今後、より実用的なシステムの開発につながると思われる。

## 4. むすび

本研究では、新型コロナウイルスの流行が続く中で、人々の健康と安全を守るために、換気による対策が重要であると考え、CO<sub>2</sub> センサーを利用した移動式換気ロボットを中心として換気システムを製作した。このシステムでは、公共の施設や責任者が不在の場所など、換気の必要性がある場所でも、IoT エッジ端末が CO<sub>2</sub> 濃度を測定し、感染リスクが高い場合はロボットが部屋の扉を開放したり、警告メールを管理者へ送信したりするなど、感染防止対策を自動化することができることを示した。また、移動中のロボットは障害物を検知し、表示灯や音声で安全に運転することを可能とした。本研究により、新型

コロナウイルスの感染拡大防止策の一つである換気に対して、具体的かつ効果的な自動化システムを提案することができた。将来的には、このシステムを応用することで、感染症対策における安全な環境づくりに役立てることを期待する。

[7] 中村 泰明 シーケンス制御システムのシミュレーション 計測と制御 Vol.27, No.8 695-700

1988,8,10 発行

## 謝辞

本研究は下中記念財団の助成金交付により遂行されたものです。この場を借りて深く御礼申し上げます。

執筆にあたり多くの方々にご協力いただきました。龍谷大学 植村渉様には、いつも丁寧な指導と適切な助言をいただきました。深く感謝いたします。

また、フェスト株式会社 林恒様には RoboCup および全国工業高等学校長会主催の講習会等においてご支援をいただき、感謝しております。

そして、株式会社ロジセンス 高萩幸司様からは研究に不可欠な端末、クラウドサーバー環境を無償で提供していただき、ありがとうございました。

最後に、本研究文を執筆するにあたり協力してくださった全ての方に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] データからわかる 新型コロナウイルス感染症情報, 厚生労働省  
<https://www.mhlw.go.jp/content/10906000/000929065.pdf>  
2023,4,5 閲覧
- [2] 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議の見解, 令和2年3月9日および3月19日公表, 厚生労働省  
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000606000.pdf>,  
2022,4,14 閲覧
- [3] 野中章久, 山下善道, 金井源太 IoT プロトタイプピン  
グ・キットを利用したハウス等の温度遠隔監視シ  
ステムの開発と実用性の解明クラウド環境活用  
2019年28巻3号 p.97-107 2019,10,1 発行
- [4] IoT ワークショップ サポートページ  
<http://iot.logisense.co.jp/ws2019/support2019/>  
2023,4,18 閲覧
- [5] Infrared CO2 Sensor Module(Model: MH-Z19C)User's  
Manual(Version 1.2) page6  
<https://www.winsen-sensor.com/sensors/co2-sensor/mh-z19c.html> 2021,11,26 閲覧
- [6] 植村渉 全国工業高等学校長会「No.40 移動式ロボ  
ットプログラミング基礎」講習会資料  
” Robotino の通信 UDP”  
<https://friede.elec.ryukoku.ac.jp/robotino/index08.php?id=2#1> 2021,11,18 閲覧