

## 【研究ノート】

## サステイナブルな教育環境の構築に向けて

## ～ Resilient Campus Platform ～

爰川知宏・辻野雅之・武本充治・山本 裕・

大関和夫・水上憲明・上條浩一

Towards Sustainable Education Environment for Professionals  
– Resilient Campus PlatformTomohiro Kokogawa, Masayuki Tsujino, Michiharu Takemoto,  
Hiroshi Yamamoto, Kazuo Ohzeki, Noriaki Mizukami, and Koichi Kamijo

**Abstract** : We attempted to build a sustainable educational environment by enabling situation awareness and prediction of the various threats to professional education such as natural disasters and pandemics, and by realizing an effective and resilient response to the threats. We call this concept the “Resilient Campus.” As the first approach to the realization of the Resilient Campus, we aim to build an ICT platform that can effectively detect the environmental conditions on campus using many sensors, mobile robots, etc., and recognize the overall situation. We built a prototype for this purpose and identified the basic functions to extract requirements.

**Keywords** : IoT, smart campus, resilience, sustainability

## 1. はじめに

近年多発する大規模自然災害や、COVID-19 のような感染症の流行、あるいはテロ・サイバー攻撃といった不確実な脅威に、社会の様々な層が晒されている。学校教育も例外ではなく、昨今の COVID-19 においては多くの学校で教育の中断あるいはオンライン授業への移行・代替を余儀なくされた。その後の対面授業への復帰は進んでいるものの、オンラインとの使い分けや感染対策に試行錯誤が続いており [1]、授業継続における安全性確保について難しい判断を強いられている現状がある。特に脅威の全体像が見えないこと、先の予測が困難であることが判断を難しくしている。

そうした不確実性の高い時代において、高等教育の果たす役割は増大しており、とりわけ社会をデザインできる（Designers in Society）人材輩出の重要性が増していると考えられる。災害等に対する事業継続（Business Continuity）という概念は教育の世界でも用いられる場合があるが、教育においては受ける側の機会が限られる面もあり、中断→回復のモデル

ではなく、持続性（sustainability）がより重要となると考えられる。

本研究では、高等教育のうち、本学が属する専門職大学を対象とし、専門職大学自身が様々な脅威に対してもしなやかに対応できる環境（ICT システムおよびマネジメント）を構築し、それに基づく授業スケジュールリングや緊急時対応を行うことで、サステナブルかつ効果的な人材教育をめざす。その概念を Resilient Campus と名付け、第一歩として、学内の環境状況を多数のセンサや移動ロボット、カメラ等で効果的に検出し全体の状況認識を行える ICT プラットフォーム（Resilient Campus Platform）を構築する。将来的には状況認識の統一、状況予測、プロアクティブな対応のための意思決定支援や自動制御まで行うことを見据えた全学的なプラットフォームをめざす。

## 2. 構想の全体像と課題設定

本構想の実現イメージを図1に示す。学内の各教室に様々なセンサを配置し、そのセンサからの情報を、エッジサーバ等を介してクラウドに送信する。クラウドに蓄積されたデータをもとに空間的、時系列的なモニタリングと分析を行い、結果を可視化して然るべきメンバ（キャンパスの運営に関わる責任者）に提示する。その情報をもとに状況認識や予測を行い、適切な対応（空調制御、見回り、授業形態の切り替えなど）への意思決定につなげる。

センサについては、教室等に固定的に設置するもの（CO2 センサ、温度センサ等の環境センサ）だけでなく、人流を考慮して移動物（ロボットなど）に搭載したもの、あるいは個々の学生や教員の体調を確認するための生体センサなども考慮に入れる。

本構想に基づくプロトタイプ作成にあたり、解決すべき課題として以下がある。

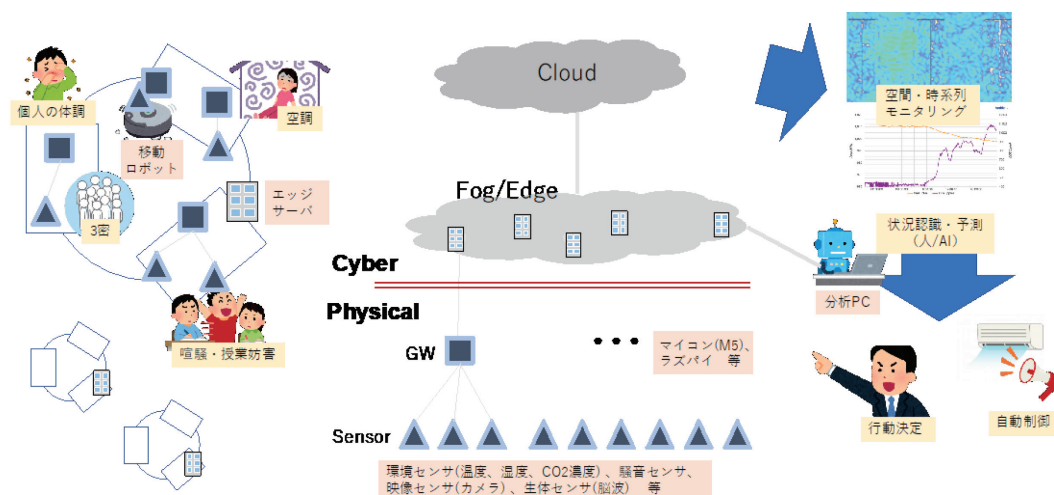


図1 構想の全体像

### (1) センシングデータの可視化に基づく状況認識と対応マネジメント

多数のセンサを配置してデータを収集しただけでは単なるデータの集合にすぎず、それを最終的には人間の意思決定や行動に生かさなければ意味をなさない。そのために必要なものは、そのデータから現在置かれている状況や今後の推移を推測し、状況を改善するた

めの行動につなげるレベルでの情報処理・可視化の支援が必要である。

(2) センシングデータの運用に向けたエッジサーバ環境パラメタの分析と最適化制御

センサ数が増大するとそれらの運用やデータ処理が複雑になり、エッジ／フォグレベルでの処理の重要性が高まる。その際の環境パラメタの設定や最適化が課題となる。

(3) センサを収容・制御する末端ノードのプログラムの開発・配信環境の構築

センサを収容するためには、空間的に近いところに置かれる末端ノードが必要になる(図1のGW)。そして、実環境において、多様なセンサを収容し、かつ、制御するためには、応用事例毎に適した方式がある。そのために、多種多様なセンサを収容・制御するための末端ノード上のプログラムの開発手法が必要になる。また、センサの数が多数になるため、末端ノード上へのプログラムの配信環境の必要となる。

(4) センシングデータに基づく最適設計・制御

センシングデータとして得られた結果に適応して、通信効率・電力利用効率を向上させるように、センサや通信機器の配置・容量を決定すること(設計法)、計算／通信資源の割当やセンサの各種制御を行うこと(制御法)が望ましい。最適化アプローチに基づき、望ましい設計・制御に繋がる数理モデルを構築し、評価することが課題となる。

(5) センシングデータを用いた機械学習

キャンパス内の室内の人物の存在の判定や動きを把握するためには、単なるセンシングデータだけでは不十分で、機械学習、特に動物体に対する学習の活用が必要と考えられる。

(6) 外界センサ情報を用いたロボットの自律移動と遠隔操作

教室全体の環境センサ計測をするためには複数の環境設置よりも移動物に搭載して場所を変えながら計測する仕組みが必要である。その移動物として車輪型移動ロボットの基本的な壁などの障害物検知からその回避しながら移動する自律移動技術の確立が必要である。また、管理者が指定の場所にロボットを遠隔から移動させるための遠隔操作技術の確立も必要となる。

(7) キャンパス内、及び外部環境が生体情報に与える影響

サステイナブルな教育を実現するためには、キャンパス内の環境状況の把握や対応だけでなく、そこに滞在する教職員や学生への物理的あるいは心理的な影響も把握が必要である。

本稿においては、このうち課題(1)(2)(3)に対する取り組みを中心に検討状況を述べる。また、人を対象とする処理についてはプライバシーや倫理に関する課題も整理が必要となるため、本稿では踏み込まず、機能確認までの検討としている。

### 3. 実験対象

実験環境は本学(東京国際工科専門職大学)キャンパスである。本学キャンパスは東京・新宿の高層ビル(コクーンタワー、地上50階)内にあり、教室は複数のフロアに分かれている。このうち、主に対面授業に使われている3フロア6教室をターゲットとした。

実験時点で本学にとっての最も大きなリスクはCOVID-19の感染(特にクラスター発生)である。いわゆる「三密」(密集、密接、密閉)の回避が重要となる[2]が、高層ビル内という条件のもと、「密閉」の回避が非常に難しい。密閉とは換気が不十分でウイルスを

含む可能性のあるエアロゾル（直径  $5\mu\text{m}$  以下のマイクロ飛沫）が長期間室内に滞留する状況であり、対策として換気が重要である。しかし換気は体感しづらく、高層ビルでは構造的に窓を開けられないため、どの程度の換気が行われているかの把握が特に困難である。

換気の見える化の手段として着目されているのが  $\text{CO}_2$  濃度の測定である。実際、様々な組織で COVID-19 対策の一環として  $\text{CO}_2$  測定器が設置されており、一部自治体による費用補助も行われている。

$\text{CO}_2$  濃度が高いと頭痛・めまい・吐き気等人体への悪影響が生じることが知られており、授業中の居眠りなど集中力の低下との相関も指摘されている [3]。文部科学省による学校環境衛生基準では、教室内の  $\text{CO}_2$  濃度は  $1,500\text{ppm}$  以下が望ましいとされており [4]、厚生労働省による建築物環境衛生管理基準では  $1,000\text{ppm}$  以下と定められている [5]。しかし、この基準はあくまでも濃度の大小に対する基準であり、換気の強弱とは必ずしも連動しないことに注意が必要である。

図2は  $\text{CO}_2$  濃度と換気の関係を模式的に示したものであり、部屋に人がいる状態では、人が呼吸で排出する  $\text{CO}_2$  が時間とともに増加するが、換気がある程度なされているとある濃度で平衡する（上段）。人数が増えると  $\text{CO}_2$  排出量が増えるとともに濃度も上昇するが、十分に換気がなされていれば、ほどなく上段同様に平衡あるいは減少に転じる（中段）。一方、人数が少なくても換気が不十分であれば人が排出した  $\text{CO}_2$  が室外に排出されず濃度が上がり続ける（下段）。問題なのは下段の場合であり、通常の建物の空調制御では、 $\text{CO}_2$  濃度が管理基準を上回るまでは換気が行われず、感染リスクが高い状態が続く可能性が高い。また、強制的な換気は室温や湿度への影響もあり、冷暖房や除加湿による電力使用量の大幅増にもつながる。感染対策（換気）とビル内の環境維持（温度・湿度）、経済性（電力量の削減）を両立させる空調制御は簡単ではなく、解決には実際の室内利用状況と空調の状況を観測してパターン化していく必要があると思われる。

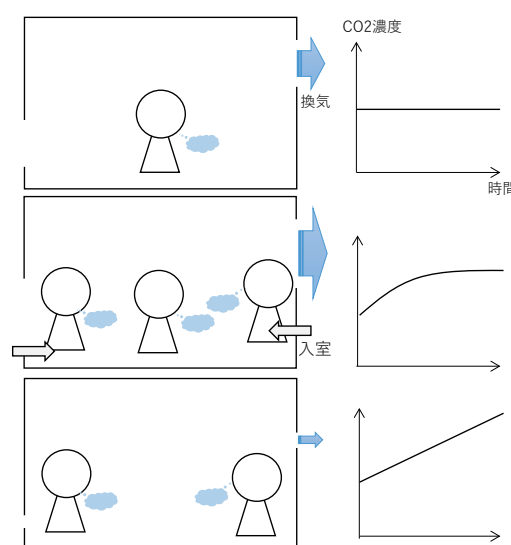


図2  $\text{CO}_2$  濃度と換気の関係

#### 4. CO2 増減状況の可視化

CO2 の検出方法は非分散型赤外線（NDIR）方式が代表的であるが、測定器は比較的高価（市販品で数万円程度）である。一方、安価な測定器では、揮発性有機化合物（VOC）の濃度（特に水素濃度）から等価二酸化炭素（equivalent CO2）を推定して算出しているタイプのものもあり、精度に問題がある。また、市販の測定器の多くはログ機能を持たず、その時点の測定値を表示するのみであり、増減の傾向把握が難しい。そのため、NDIR 方式の CO2 センサデバイスを用いて測定器を試作することとした。

制御用ノードは M5StickC Plus を用いた。これはマイコンチップに ESP32 を用いた開発用ボードであり、小型の液晶画面と Wi-Fi 通信機能を持つ。センサデバイスは、NDIR 方式を採用する Sensirion 社の SCD30 を用意した。SCD30 で測定した値を M5Stick C Plus に表示するとともに、IoT クラウドサービスである Ambient に定期的にデータを送信する形でプロトタイプシステムを構築した。システムの構成と実機の外観をそれぞれ図3に示す。



図3 システム構成とセンサ実機の外観

データの可視化に際しては、

- (1) 試験等のイベント対応における短期的な意思決定への活用（教室単位の把握・対応）
  - (2) 通常授業における全体状況把握
- の2点において行った。

##### (1) イベント対応可視化

定常利用している教室に対しての空調制御は、建物全体での電力効率などの経済性との両立を考えながら最適解を模索する必要があるため、個別事例による対応は簡単にはできないが、単発のイベントにおいてはその期間に特化した対応を行いやすい。そこで、入学試験および期末試験を対象としてイベント実施中の CO2 可視化と対応のトライアルを実施した。

3 台の試作測定器を試験会場（筆記試験、面接試験、控室）に設置するとともに、測定結果を試験本部で一元的にモニタ表示できるようにした。設置は測定値を安定させるために試験当日朝に行った。また測定間隔は 30 秒とした。

可視化の観点としては、時系列で増減を見たいものと、その時点の測定値があり、前者には CO2 濃度と湿度、後者には温度、湿度、CO2 濃度の全てを提示することとした。そ





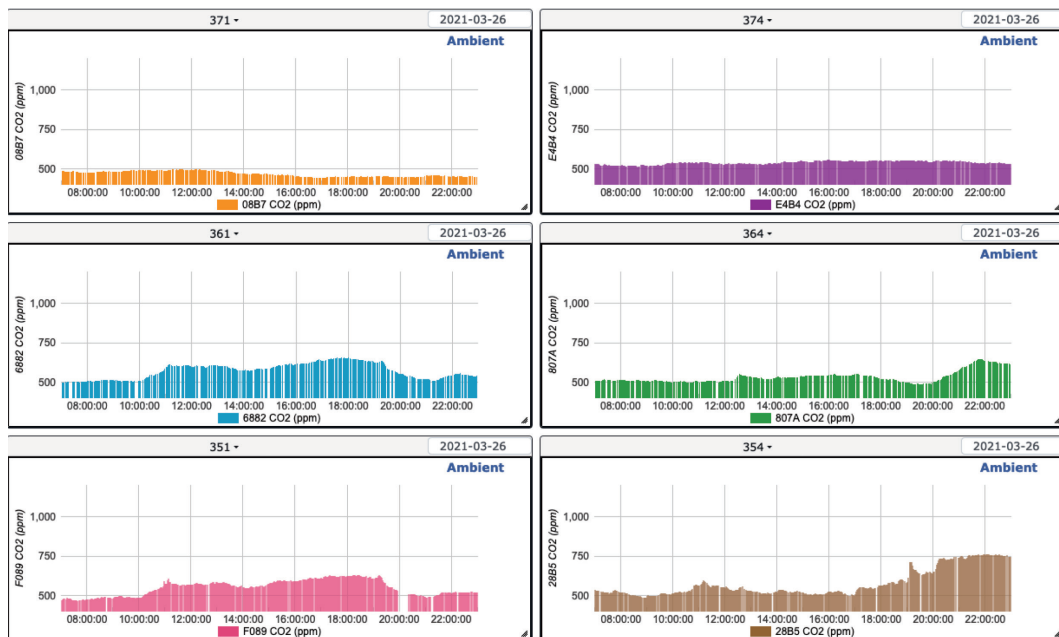


図 6 平時利用の可視化例

も限界と考える（図 6）。

## 5. 人の室内滞留状況の把握・可視化

図 2 に示す通り、CO2 濃度の増減は換気の度合いだけでなく、その時点の室内の人の滞留状況にも依存する。授業中であれば出席確認により人数把握も簡単であるが、自習室や空き教室の勝手利用に対しては把握が困難である。センシングによる把握の場合、カメラ映像を用いるのが最も確実であるが、プライバシー上の問題や学生の心理的抵抗も考えられ、運用が難しい。人の滞留(在室)を簡易に把握する手段として以下の 3 点を試行した。

- ・騒音センサ（低周波用マイク）を用いた室内の音量変化の検出
- ・人感（PIR）センサによる室内での人の動きの検出
- ・ダストセンサによる埃の舞い上がりの検出

図 7～9 にそれぞれのセンサによる試行結果の例およびセンサ実機の外観を示す。図の例では 10 時～18 時頃に室内に 1 名が滞在して作業を行っている状況であり、それ以外には朝 7 時頃に警備員による巡回があった。騒音センサについては、運用上の感度は 1kHz くらいが上限ではあるものの、人の出入りに加えて打合せ等での会話を通じた滞留状況はある程度把握できそうである。PIR は入退室のタイミングは確認できるものの、着席作業時などはほとんど反応しないため、滞在状況の把握は難しい。ダストセンサの場合は人の滞在場所とセンサとの距離がやや離れていたこともあって人の動きとの相関がほとんど見られず、人の滞在状況把握の用途では難しいことが示唆された。

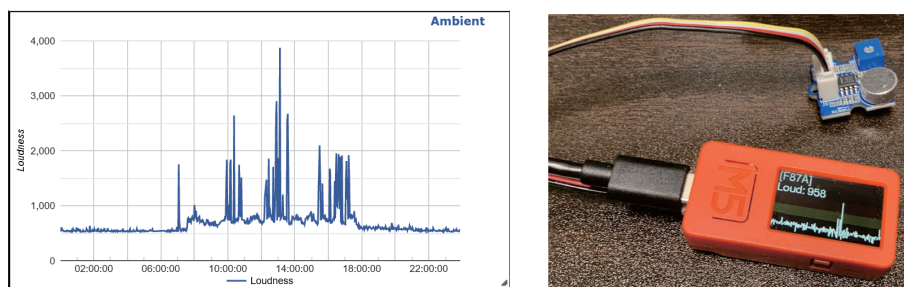


図7 騒音センサによる在室把握

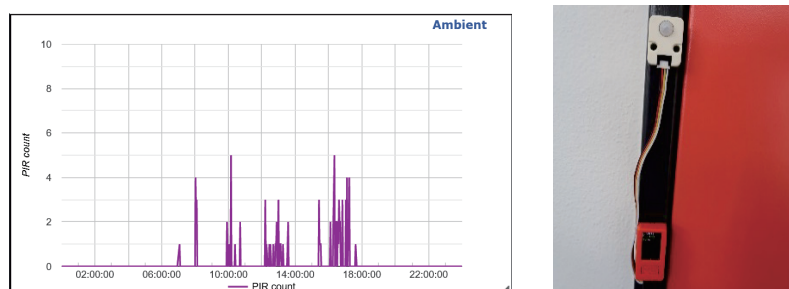


図8 PIR センサによる在室把握

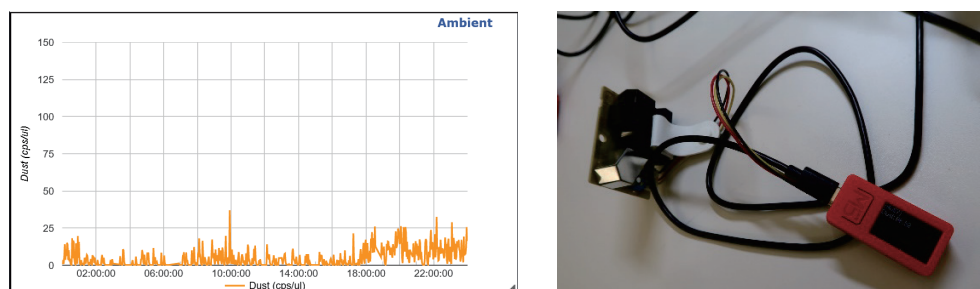


図9 ダストセンサによる在室把握

## 6. 環境パラメタの分析と最適化制御

上記の可視化にあたっては、センサノードそれぞれにおいて送信先情報（接続先ホスト、チャンネル情報、データ番号）を指定してサーバに送信しており、センサプログラムの運用管理が複雑となる。さらなる台数のセンサを収容して一覧表示するには、表示部の工夫もさることながら、センサからのデータ送信方式の改良も必要となる。

使用したマイコン（M5StickC Plus）の場合、Wi-Fi 通信機能を内蔵していることから、その MAC アドレス（の一部）をセンサノードのデバイス ID として利用することができる。送信データにこのデバイス ID を含めておくことで、センサノード全体で同じセンサプログラムを使いつつ、受信サーバ側で送信元のセンサの個体識別を行うことができる。

その場合のデータ送信方法について簡単な実装を行った。M5StickC Plus に単機能のセンサ（騒音センサ）を接続し、測定値をデバイス ID とセットで定期的（10 秒ごと）に送信するプログラムを作成した。送信は MQTT で行うこととし、エッジサーバとなるノー



```
koko@nanopineo2:~$ mosquitto_sub -h localhost -t "M5/loud"
{"devices":"F87A","payload":{"loudness":1306}}
{"devices":"D8B9","payload":{"loudness":1471}}
{"devices":"347A","payload":{"loudness":674}}
{"devices":"F87A","payload":{"loudness":1391}}
{"devices":"D8B9","payload":{"loudness":1940}}
{"devices":"347A","payload":{"loudness":616}}
{"devices":"F87A","payload":{"loudness":1421}}
{"devices":"D8B9","payload":{"loudness":891}}
{"devices":"347A","payload":{"loudness":836}}
{"devices":"F87A","payload":{"loudness":1262}}
```

図 10 複数ノードからの送信データの識別例

ドを立ち上げてそこに MQTT ブローカー (mosquitto) をインストールした。送信データは JSON 形式とし、デバイス ID は devices へ、測定データは payload の下にネストして格納している。

3 台のセンサノードを立ち上げ、MQTT クライアントで subscribe した例を図 10 に示す。

台数が増えてもプログラム上の変更は不要で、かつエッジサーバにデータが集約されていることから、様々な前処理を行った上で、必要な部分のみをクラウドに送信、可視化することが可能となる。以上の予備検討に基づき、サーバ適用システム構築に向けた基本仕様の検討を進めていく。

## 7. 末端ノードのプログラムの開発・配信環境

前章までは末端ノードとしてマイコン (M5StickC Plus) を用いたが、より複雑な機構を持つセンサの収容・制御を想定し、末端ノードとして複数の Raspberry Pi を研究室内ネッ

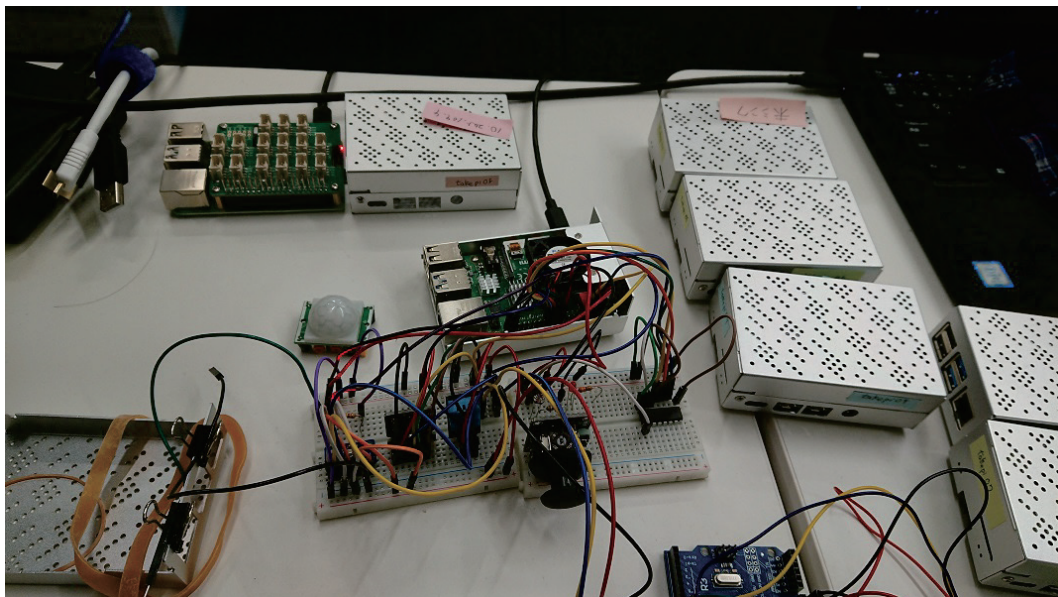


図 11 複数種類のセンサを複数のプロトコルにより収容する複数の末端ノードの一部

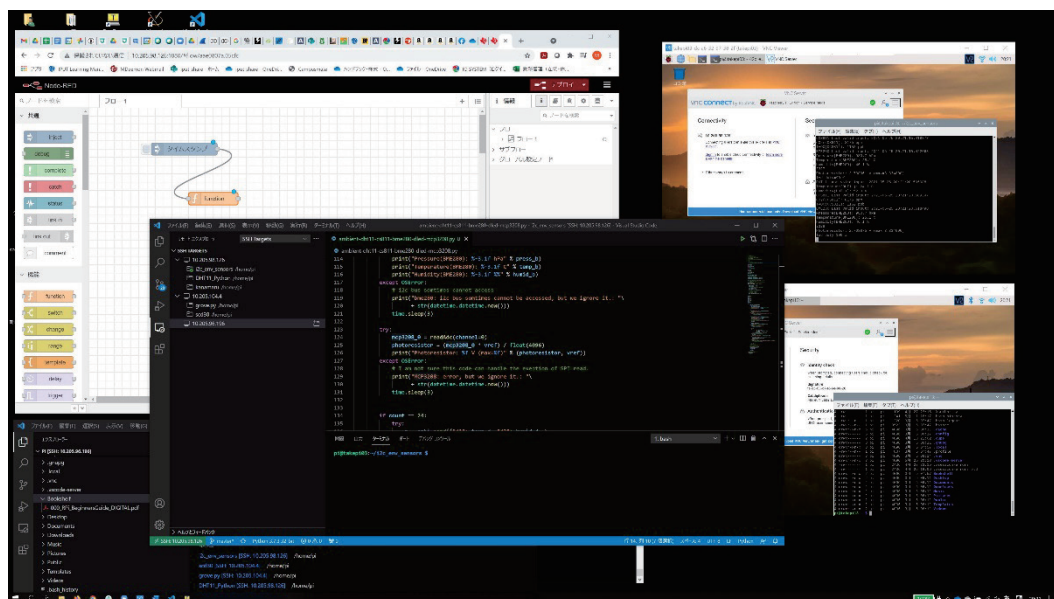


図 12 同一 PC 上での異なる言語でのプログラム開発環境

トワークでネットワーク接続する環境を構築した。図 11 にごく一部の例を示す。本環境では、複数種類のセンサを複数のプロトコルにより収容する複数の Raspberry Pi が動作している。

また、末端ノード上で動作するプログラムの記述言語については、(1)Python を用いる場合の開発・配信環境として PC 上の Visual Studio Code と拡張機能を用いる方法を確認しており、同時に同じ PC 上から、別の制御フロー記述言語である (2)Node-RED を用いての開発・配信方法も確認している。図 12 にプログラム開発中の状況例を示す。

## 8. 他の課題の対応状況

残りの課題 (4)(5)(6)(7) に対する検討状況について表 1 にまとめる。

表 1 検討課題の対応状況

|     | 課題   | 検討状況   |
|-----|--|--|
| (4) | センシングデータに基づく最適設計・制御、マーケティング観点からの分析               | 通信効率・電力利用効率の最適設計・制御の数理トイモデルを作成して、準備した計算機環境での基本動作を確認した。   |
| (5) | モバイルカメラによるセンシングデータを用いる機械学習                       | 室内の人物の存在の判定や動きを追跡することが最終目標であるが、一方監視カメラのように直接人間を撮影することは、被写体となる人の許可を取るなどが必要で、すぐには難しい。そこで、動物体の例として車両を選び、モバイルカメラにより撮影した動画像を基に、車両等を機械学習の学習データに設定し、学習とテストデータに設定し認識実験を実施した。10種のクラスの識別で taxi, sedan, van などが 98%以上の精度で認識（識別）できた。   |
| (6) | 外界センサ情報を用いたロボットの自律移動技術とオンライン化教育に対応するための遠隔操作技術の構築 | 車輪型移動ロボットとして研究用ルンバ[7]を用いた自律移動技術の構築を進めている。これまでに Raspberry PI を用いてプログラム開発環境を構築した。プログラム開発においては、ルンバ動作用ライブラリを提供しているロボット用のソフトウェアプラットフォームである ROS (Robot Operating System) を用いた[8]。ルンバ本体前部に搭載された障害物センサと接触センサのセンサ情報取得を行い、これらセンサ情報に基づいた障害物回避や壁検知による接触回避などのプログラム開発と動作確認を行った。更に、Raspberry PI にカメラモジュールを搭載して、ロボットの移動システムに顔検出の機械学習を組み込んだ。顔検出に基づくロボットの移動制御も可能な状況まで開発が進んでいる。 |
| (7) | キャンパス内、及び外部環境が脳波に与える影響の解析                        | 学生の脳波や動画像より、集中度の時間変化の観察、及びその変化点での教師の行動の特定を可能とするシステムを設計した。  |

## 9. おわりに

本稿では、不確実な脅威に対してサステイナブルな教育環境の提供する ICT プラットフォーム「Resilience Campus Platform」実現のための第1歩として、プロトタイプを構築し、基本機能の確認を行った。具体的な要件の洗い出しにはまだ多くの課題を解決しないといけないが、実地でのプロトタイピング&評価を継続することにより、「Resilience Campus Platform」の実現に向けて引き続き検討を進めていく。

## 参考文献

- [1] 文部科学省、大学等における新型コロナウイルス感染症への対応状況について、  
[https://www.mext.go.jp/kaigisiryō/content/20200914-mxt\\_koutou01-000009906\\_15.pdf](https://www.mext.go.jp/kaigisiryō/content/20200914-mxt_koutou01-000009906_15.pdf) (2021 年 8 月 31 日閲覧)。
- [2] 厚生労働省、新型コロナウイルス感染予防のために、[https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kenkou-iryousoudan.html#h2\\_1](https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kenkou-iryousoudan.html#h2_1) (2021 年 8 月 30 日閲覧)。
- [3] 藤原巧未、長尾和彦、IoT デバイスの活用による教室環境と授業集中度の評価に関する研究、FIT2019, 第 4 分冊、pp. 331-332, 2019.
- [4] 文部科学省、学校環境衛生基準 令和 2 年文部科学省告示第 138 号、[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/kenko/hoken/1353625.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/kenko/hoken/1353625.htm) (2021 年 8 月 30 日閲覧)。
- [5] 厚生労働省、建築物環境衛生管理基準について、<https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsueisei10/> (2021 年 8 月 30 日閲覧)。
- [6] 爰川知宏、CO2 濃度の可視化に基づく安心・安全な対面学習／試験環境提供の試み、情報処理学会研究報告、Vol. 2021-GN-114、No.6、May、2021.
- [7] 研究用ルンバ (iRobot Create® 2 Programmable Robot)、  
<https://www.irobot.com/About-iRobot/STEM/Create-2.aspx> (2021 年 8 月 25 日閲覧)。
- [8] ルンバ動作用ライブラリ (create\_autonomy)、  
[https://github.com/AutonomyLab/create\\_robot/blob/indigo-devel/README.md](https://github.com/AutonomyLab/create_robot/blob/indigo-devel/README.md)  
(2021 年 8 月 25 日閲覧)。

|      |             |      |       |     |
|------|-------------|------|-------|-----|
| 爰川知宏 | 東京国際工科専門職大学 | 工科学部 | 情報工学科 | 教授  |
| 辻野雅之 | 東京国際工科専門職大学 | 工科学部 | 情報工学科 | 教授  |
| 武本充治 | 東京国際工科専門職大学 | 工科学部 | 情報工学科 | 教授  |
| 山本 裕 | 東京国際工科専門職大学 | 工科学部 | 情報工学科 | 准教授 |
| 大関和夫 | 東京国際工科専門職大学 | 工科学部 | 情報工学科 | 教授  |
| 水上憲明 | 東京国際工科専門職大学 | 工科学部 | 情報工学科 | 講師  |
| 上條浩一 | 東京国際工科専門職大学 | 工科学部 | 情報工学科 | 教授  |