

移動体を用いた室内における二酸化炭素濃度の AR可視化システムの提案

大塚 真帆¹ Monica Perusquía-Hernández¹ 磯山 直也¹ 内山 英昭¹ 清川 清¹

概要: COVID-19 感染対策の1つとして換気の徹底が必要とされている。室内の適切な換気状態の基準として、二酸化炭素濃度が 1000 [ppm] 以下であることが提唱されている。実際に、CO₂ 濃度の変化をディスプレイに表示するシステムの利用が飲食店を中心に増えている。しかし、CO₂ 濃度は直感的に理解しにくく、適切な換気行動を促すには、より直感的なフィードバックが必要だと考える。本稿では、CO₂ 濃度を可視化することで適切な換気行動を促すことを目的とし、移動体を用いた室内の CO₂ 濃度の AR 可視化システムを提案する。実際に AR 表示可能な HMD として Microsoft HoloLens 2、自律移動ロボットとして iRobot Roomba 600 Series、CO₂ ガスセンサモジュールとして M5Stack Gray と TVOC/ eCO₂ ガスセンサユニットを用いてシステムを試作したところ、ガスセンサモジュールを取り付けた自律移動ロボットを室内で巡回させることで自動的に CO₂ 濃度分布を取得し、HMD を用いてこれを可視化することができた。本稿では、試作システムの実装の詳細と今後の展望について述べる。

An AR visualization system for indoor carbon dioxide concentration measured using a mobile robot

MAHO OTSUKA¹ MONICA PERUSQUÍA-HERNÁNDEZ¹ NAOYA ISOYAMA¹
HIDEAKI UCHIYAMA¹ KIYOSHI KIYOKAWA¹

1. はじめに

人間が健康な生活を営む上で、室内空気が清浄であることは重要である。室内空気は食物・水の摂取量よりも多く、人間が一生で摂取する物質の重量の 6 割近くを占めている [1]。したがって、室内空気環境が人体に与える影響は大きく、健康的で快適な室内空気を維持するために適切な換気行動が重要である。換気が不十分な場合、二酸化炭素 (CO₂) 濃度が高くなり、頭痛、眠気、集中力・記憶力の低下など人体に悪影響を及ぼす。また、一酸化炭素中毒を引き起こす原因にもなりうる。本稿執筆時点においては新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) が世界的に流行している状況であり、代表的なリスク要因の1つとして「換気の悪い密閉空間」が挙げられる [2]。COVID-19 の感染は飛沫を吸い込むことにより発生すると言われており、有効な感染対策の1つとして換気の徹底が重要視されている。

室内の適切な換気状態の基準として、CO₂ 濃度を用いる

ことができる。建築物衛生法では CO₂ 濃度が 1000 [ppm] 以下であることが適切であると提唱されている [3]。また、ウイルス感染リスクの大きさは室内の CO₂ 濃度と相関関係があり、室内の CO₂ 濃度を低く保つことが感染対策につながる [4]。実際に、CO₂ 濃度の数値の変化をディスプレイに表示するシステムの利用が飲食店を中心に増えている。しかし、換気が必要とされる CO₂ 濃度の数値を知らない者が見た場合、室内空気の汚染の進行や、換気の必要性を実感しにくい。CO₂ 濃度は人間の目には見えないため理解しにくく、適切な換気行動を促すには、よりユーザーにとって理解しやすいフィードバックが必要だと考える。

そこで本研究では、人間には直感的に理解しにくい CO₂ 濃度を三次元的に可視化することで適切な換気行動を促すことを目的とし、移動体を用いた室内の CO₂ 濃度の AR 可視化システムを提案する。

本稿の章構成は、以下の通りである。2 章では関連研究について述べ、3 章で提案するシステムの概要について述べる。4 章ではシステムの実装について述べる。5 章で今

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

後の展望について述べ、6章で本論文のまとめを述べる。

2. 関連研究

本章では、関連研究として、CO₂ 濃度表示システムに関する研究や、拡張現実 (AR) を用いた可視化に関する研究、ガスの三次元計測手法に関する研究について述べる。

2.1 二酸化炭素濃度表示システム

曾根は、換気行動を促すために、室内の CO₂ 濃度の変化を時系列グラフでディスプレイに表示するシステムを提案している [5]。利用者がディスプレイに表示された測定値を見て自主的に換気を行い、十分に換気ができれば窓を閉めるといった行動を促すことを目的としていたが、結果として、ユーザの換気行動の変化は見られなかった。行動を変えるためには、異なる方法を用いて、ユーザヘフィードバックすることが必要であると推測されている。

2.2 三次元音場の AR 可視化システム

片岡らは、自己位置推定と環境地図作成を同時に行う SLAM と光学透過型ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を組み合わせた複合現実技術 (MR) を音響計測技術へ適用することで、人間の目には見えない三次元音場をリアルタイムに計測・可視化するシステムを提案している [6]。MR によって、計測した音場を実空間に重畳することで、空間に対して自然な情報提示が可能である。本研究においても、計測した CO₂ 濃度を表すオブジェクトを AR によって実空間に重畳することで情報を提示する。

2.3 ガスの三次元計測手法

Burgués らは、様々な場所に設置されたガス源から発生する三次元的なガス分布の時間的変化をガス分布図として可視化する手法を提案している [7]。三次元的なガス分布を計測するため、部屋を三次元グリッドに分割し、センサを各グリッドに配置する。その結果、空気より重いガスが地表付近に溜まるということはなく、高さに関係なく、時間的に激しくガス分布が変化することがわかった。このことから、空気より重い CO₂ においても三次元計測が必要であると考えられる。しかし、従来の手法では、各センサの位置計測を事前に手作業で行う必要がある。また、あらかじめ固定されたセンサの位置でしか計測できない、室内全体をセンシングするには膨大な数のセンサが必要などの問題点がある。

2.4 センサ配置の自動校正が可能な CO₂ 濃度の AR 可視化システム

CO₂ 濃度の AR 可視化システムの試作システムとして、センサ配置の自動校正が可能な CO₂ 濃度の AR 可視化システム (以下、従来システム) を開発した [8]。従来システ

ムでは、従来のガスの三次元計測手法では各センサの位置計測を事前に手作業で行う必要があるという問題点を解決するため、HMD 内臓の環境認識カメラによって室内の様々な場所に配置した CO₂ ガスセンサモジュールの三次元座標を取得することで、センサ配置の自動校正を可能にした。センサ配置の自動校正が可能となることで、利用時にセンサの移動や増設を行うといった動的な計測が可能になる。しかし、このシステムではセンサから離れている場所は CO₂ 濃度の値の精度が落ちるという課題がある、

本システムは、以上の関連研究が持つ要素を組み合わせたものである。リアルタイムで CO₂ 濃度を計測し、CO₂ 濃度の分布を AR を用いて三次元的に可視化する。ユーザが CO₂ 濃度分布の状況を見て自主的に換気を行い、十分に換気ができたか確認するといった行動を促すシステムを目指して実装を進めている。

3. 提案システム

本章では、試作システムの概要と課題、その課題解決のために本稿で提案するシステムの概要について説明する。

3.1 センサ配置の自動校正が可能な CO₂ 濃度の AR 可視化システム

筆者らが開発した従来の CO₂ 濃度の可視化システム (以下、従来システム) の概要について説明する [8]。CO₂ 濃度の AR 可視化システムの従来システムとしてセンサ配置の自動校正が可能な CO₂ 濃度の AR 可視化システムを制作した。図 2 に従来システムの概要を示す。

従来システムでは、HMD (Microsoft HoloLens 2) に搭載された環境認識カメラを用いて室内の様々な場所に配置した CO₂ ガスセンサモジュールの三次元座標を取得することで、センサ配置の自動校正が可能である。CO₂ 濃度の計測にはマイコン (M5Stack 社 M5Stack Gray) と CO₂ ガスセンサ (M5Stack 社 TVOC/eCO₂ ガスセンサユニット) を用いた CO₂ ガスセンサモジュールを用いる。測定値は情報統合用サーバへ送信する。CO₂ ガスセンサモジュールを空間に 4 つ配置し、各ガスセンサモジュールの三次元座標を HMD に搭載されたカメラにより取得する。空間を三次元グリッドに分割し、各ボクセルの中央の座標における CO₂ 濃度を、近傍の 4 つの CO₂ ガスセンサモジュールの測定値を用いた四面体要素内の線形補間により求める。求めた CO₂ 濃度を Cube オブジェクトとして表現し、AR 空間上に表示することで可視化する。Cube オブジェクトの色と CO₂ 濃度を対応づけて表現する。CO₂ 濃度が低ければ緑色、高ければ赤色になるように連続的に対応付ける。色や形で表現し可視化することは、人間に視覚的なフィードバックを与え、換気行動を促すのに有効であると考えられる。

従来システムの可視化の様子を図 2 に示す。しかし、こ

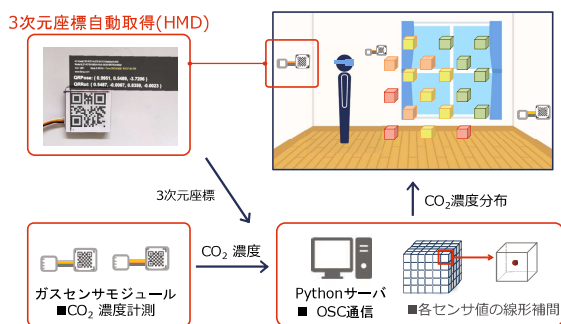


図 1 試作システムの概要

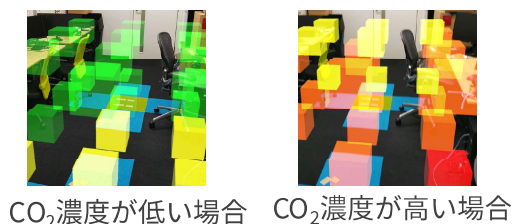


図 2 試作システムの可視化の様子

のシステムではセンサから離れている場所は CO_2 濃度の値の精度が落ちる、Cube オブジェクトによる可視化の見せ方ではユーザーに圧迫感を与えてしまうなどの課題がある。そこで、本稿では移動体を用いた室内の CO_2 濃度の AR 可視化システムを提案する。

3.2 提案システム

本研究では、移動体に CO_2 ガスセンサモジュールを取り付け、室内を巡回させることで、室内の CO_2 濃度分布を自動で算出する。そして、その値に対応付けたオブジェクトを AR 空間上に表示し、三次元的にリアルタイムに可視化するシステムを構築する。上記のようなシステムを実現するためには、次のような要件が考えられる。

- 目には見えない CO_2 濃度の情報を実空間に重畳させた三次元的なフィードバックが必要がある。
- 室内の CO_2 濃度を三次元計測する必要がある。
- 三次元分布を算出するためには CO_2 濃度の値を補間する必要がある。
- 移動体に取り付けた CO_2 ガスセンサモジュールの位置座標を取得する必要がある。

上記のような要件を解決するために、本システムでは AR 表示可能な HMD、自律移動ロボットを用いる。提案システムの構成を図 3 に示す。 CO_2 濃度の計測には、マイコンと CO_2 ガスセンサを組み合わせた CO_2 ガスセンサモジュールを用いる。 CO_2 ガスセンサモジュールを自律移動ロボットに取り付け、室内を巡回させることで自動で CO_2 濃度分布を算出する。 CO_2 ガスセンサモジュールの位置座標を取得するために自律移動ロボットにトラックを 1 つ装着する。 HMD 内臓の環境認識カメラを用いて、合

計 4 つのトラックの三次元座標を取得することで、トラックの座標系と HMD の座標系の位置合わせを行う。具体的には、室内の様々な場所にトラックを 3 つ設置し、自律移動ロボットに取り付けたトラックを含めた合計 4 箇所ですトラックと HMD の座標系をそれぞれ計測し、座標変換行列を求める。三次元的な CO_2 濃度の分布を算出するために、空間を三次元グリッドに分割し、各ボクセルの中央の座標における CO_2 濃度を、室内に設置した 4 つの CO_2 ガスセンサモジュールの値と自律移動ロボットに取り付けた CO_2 ガスセンサモジュールの値のうち近傍の 4 つの測定値を用いて、四面体要素内を線形補間する。室内に設置された各 CO_2 ガスセンサモジュールの三次元座標は HMD に搭載された環境認識カメラにより取得する。求めた CO_2 濃度を Cube オブジェクトとして表現し、AR 空間上に表示することで可視化する。 Cube オブジェクトの色と CO_2 濃度を対応づけて表現する。 CO_2 濃度が低ければ緑色、高ければ赤色となるように連続的に対応付ける。色や形で表現し可視化することは、人間に視覚的なフィードバックを与え、換気行動を促すのに有効であると考えられる。

4. 実装

本章では構築したシステムの構成について説明する。

4.1 システム構成

構築したシステムの構成を図 4 示す。本システムは、AR 表示可能な HMD1 台、自律移動ロボット 1 台、マイコン 1 台、 CO_2 ガスセンサ 1 個、トラック 4 台、ベースステーション 4 台から構成されている。 AR 表示可能な HMD には Microsoft 社製の HoloLens 2、自律移動ロボットには iRobot 社製の Roomba 600 Series、 CO_2 ガスセンサモジュールには M5Stack 社の M5Stack Gray と TVOC/eCO₂ ガスセンサユニットを使用している。 TVOC/eCO₂ ガスセンサは主に揮発性有機化合物と水素 (H_2) を測定する。 eCO₂ 濃度は主に H_2 濃度に基づいて計算される。最低測定値は 400 [ppm] である。また、 CO_2 ガスセンサモジュールの位置座標を取得するために、 HTC 社製の VIVE Tracker とベースステーションを使用している。

4.2 CO_2 濃度のセンシング

CO_2 ガスセンサモジュールを自律移動ロボットに取り付け、室内を巡回させることで、ルンバの軌跡に沿って CO_2 濃度を測定する。 CO_2 濃度のセンシングにはマイコンと CO_2 ガスセンサを用いた CO_2 ガスセンサモジュールを用いる。 CO_2 ガスセンサモジュールを取り付けた自律移動ロボットの全体像を図 5 に示す。測定値は、情報統合用サーバへ送信する。

本節では、 CO_2 ガスセンサモジュールを取り付けた自律移動ロボットが障害物との衝突や段差に当たった際に

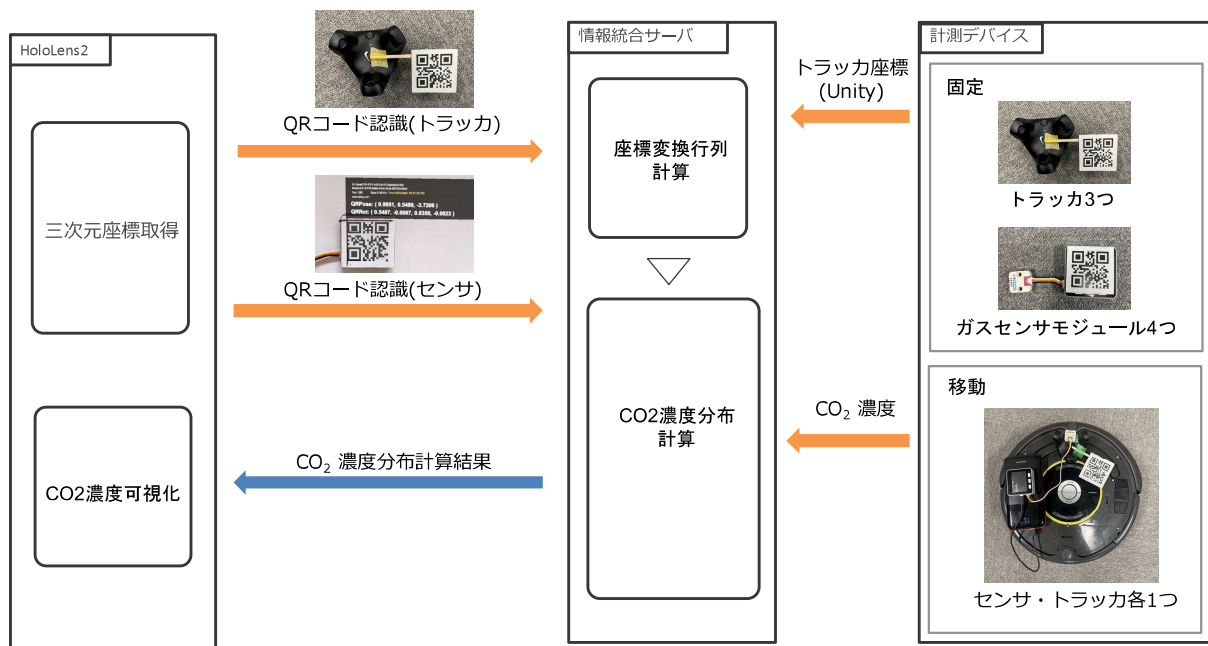


図3 提案システムの構成

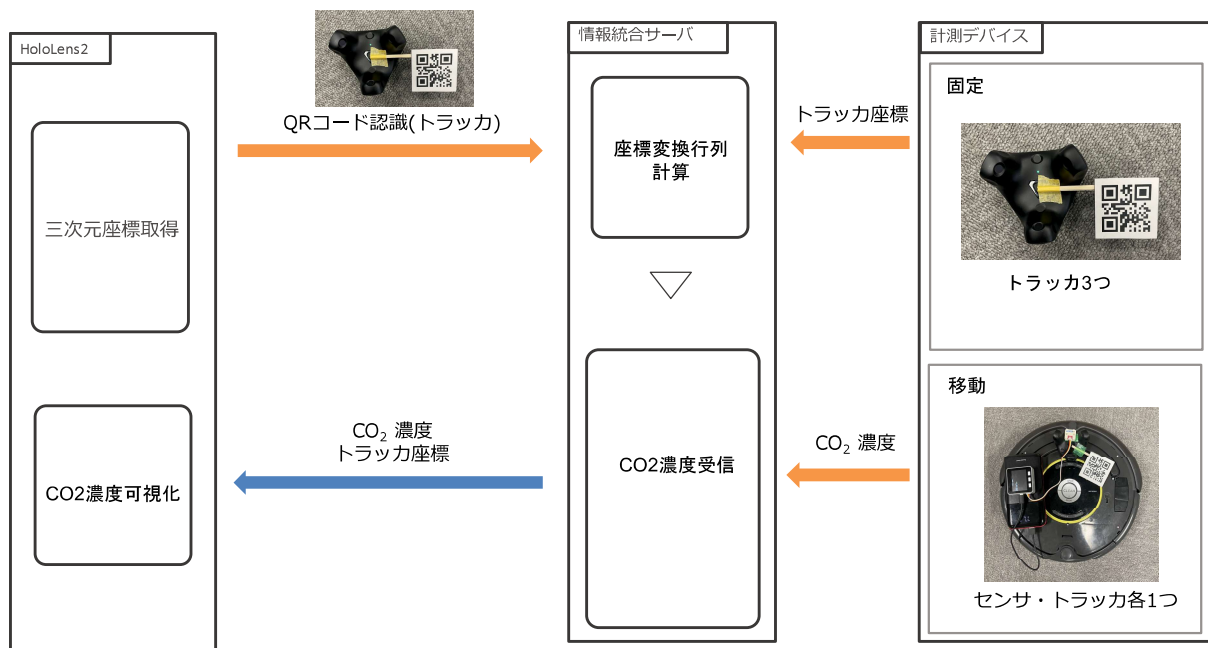


図4 構築したシステムの構成

CO₂濃度の測定値にブレがないか調査した結果を報告する。CO₂濃度の測定値を図6に示し、マイコンに搭載された3軸加速度センサの地面に垂直方向の加速度のグラフを図7に示す。衝突などにより加速度が大きく変化した時点でも、CO₂濃度の測定値が大きく変化することはなかった。自律移動ロボットが大きく揺れた場合でもCO₂濃度の測定値に影響はないといえる。

4.3 自律移動ロボットの三次元座標計測

自律移動ロボットの三次元座標取得のために、トラックを1台取り付ける。トラックの位置はベースステーショ

ンを基準として算出される。トラックとして用いるVIVE Trackerには赤外光センサが搭載されており、ベースステーションから照射される赤外光レーザを赤外光センサで受光することによって、位置情報・角度情報を取得できる。図8のように、QRコードを取り付けたトラックを室内に3つ設置する。自律移動ロボットに取り付けたトラックと、室内に設置した4つのトラックのQRコードをHMD内蔵の環境認識カメラで検出することで、HMDの座標系におけるトラックの位置を取得できる。トラックの三次元座標と、トラックに貼り付けたQRコードの三次元座標をそれぞれ4台分取得することにより、座標変換行列を算出する



図 5 センサを搭載した自律移動ロボットの全体像



図 8 QR コードを取り付けたトラッカ

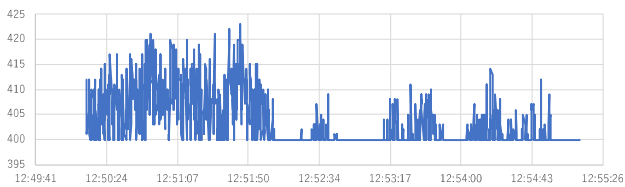


図 6 CO₂ 濃度の測定値

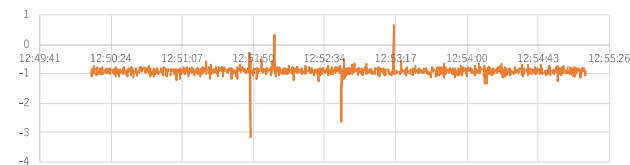


図 7 垂直方向の加速度

ことで、HMD の座標系におけるトラックの三次元座標を算出できる。

4.4 CO₂ 濃度の可視化

算出した HMD の座標系におけるトラックの位置に、自律移動ロボットに取り付けた CO₂ ガスセンサモジュールの測定値と色を対応付けた CO₂ オブジェクトを表示することで可視化する。実際の可視化の様子を図 9 に示す。

5. 今後の展望

本稿で構築したシステムでは、1つの CO₂ ガスセンサモジュールのみで可視化しており、自律移動ロボットの軌跡に沿った CO₂ 濃度の可視化のみである。今後は、自律移動ロボットに三脚を固定し、三脚にセンサを一定間隔で複数個取り付け、室内を巡回させることで、より精度の高い CO₂ 濃度の三次元濃度分布を求めることを目指す。三脚を

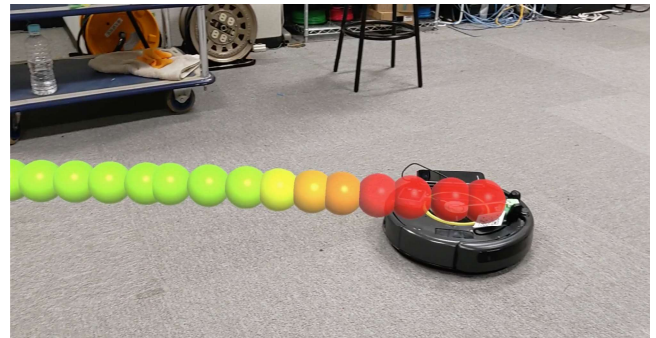


図 9 CO₂ 濃度の可視化

用いた計測のイメージを図 10 に示す。また、3.2 説で述べた提案システムの、室内に設置した 4 つの CO₂ ガスセンサモジュールの値と自律移動ロボットに取り付けた CO₂ ガスセンサモジュールの値のうち近傍の 4 つの測定値を用いて、四面体要素内を線形補間する部分の実装を進める。また、現在の Cube オブジェクトを用いた可視化の見せ方は、ユーザに圧迫感を与えてしまうため、煙や霧のように可視化するなど、よりユーザにとって最適な可視化の見せ方についても検討を進める。

6. おわりに

本稿では、移動体を用いた室内における CO₂ 濃度の AR 可視化システムを提案し、従来システム、構築したシステムの概要について述べた。本研究では、実際に AR 表示可能な HMD として Microsoft HoloLens 2、自律移動ロボットとして iRobot Roomba 600 Series、CO₂ ガスセンサモジュールとして M5Stack Gray と TVOC/ eCO₂ ガスセンサユニットを用いてシステムを試作した。CO₂ ガスセンサモジュールを取り付けた自律移動ロボットを室内で巡回さ

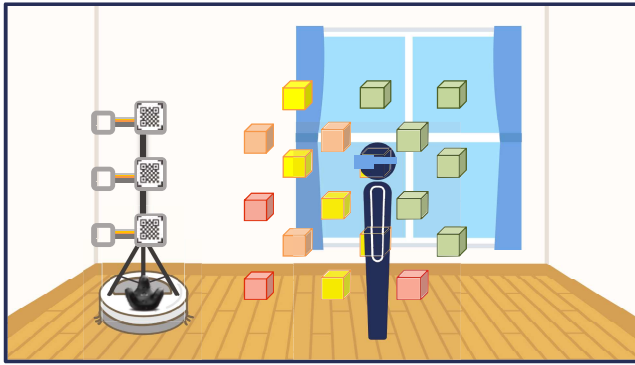


図 10 三脚を用いた計測のイメージ

せることで自動的に CO₂ 濃度分布を取得し、AR を用いて CO₂ 濃度を球体オブジェクトの色で表現することで可視化できた。

参考文献

- [1] 村上周三: “住まいと人体、工学的視点から”; 臨床環境医学, Vol. 9, No. 2, pp. 49–62 (2000).
- [2] 厚生労働省: “商業施設等における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について”; <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000616069.pdf> (最終アクセス日: 2022 年 05 月 17 日).
- [3] 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/seikatsu-eisei10/> (最終アクセス日: 2022 年 05 月 23 日).
- [4] Z. Peng and J.L. Jimenez: “Exhaled CO₂ as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities”; *Environmental Science & Technology Letters*, Vol. 8, No. 5, pp. 392–397 (2021).
- [5] 曾根直人: “換気を促すための二酸化炭素濃度表示装置の試作”; 鳴門教育大学情報教育ジャーナル, Vol. 18, pp. 61–64 (2021).
- [6] Y. Kataoka, W. Teraoka, Y. Oikawa, and Y. Ikeda: “Real-time Measurement and Display System of 3D Sound Intensity Map using Optical See-Through Head Mounted Display”; *SIGGRAPH Asia 2018 Posters*, Article No. 17 (2018).
- [7] J. Burgués, V. Hernández, A.J. Lilienthal, and S. Marco: “Gas Distribution Mapping and Source Localization Using a 3D Grid of Metal Oxide Semiconductor Sensors”; *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 304, pp. 1–15 (2020).
- [8] 大塚真帆, 磯山直也, 内山英昭, 清川清: “センサ配置の自動校正が可能な二酸化炭素濃度の AR 可視化システムの提案”; ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2021 予稿集, p. 59 (2021).