

ルームスケール VR における IoT 機器の 協調制御機能の設計と試作

阿部 真成斗[†] 高橋 秀幸[†]

近年、バーチャルリアリティ(Virtual Reality: VR)機器が普及し、一般家庭でも身近なモノになりつつある。VR 機器によって、VR 空間にいるかのような没入感の高い体験を得ることができるが、現実空間と比較すると VR 機器を使用した体験では、違和感や物足りなさを覚える人も少なくない。加えて、視覚と聴覚が遮断されるため周囲の変化に気付くことが難しい。本研究では、現実空間の IoT 機器の連携によって VR 体験向上の支援と現実空間の変化を VR 空間に反映することが可能な VR システム構築基盤の実現を目指す。具体的には、既存の様々な VR 体験向上支援に対する装着型周辺機器の重量や圧迫感などの課題に対して、非装着型の体験向上のための支援方法について検討する。本稿では、ルームスケール VR における IoT の協調制御機能の設計と IoT 家電や自走ロボットを用いた VR 体験向上支援機能と現実空間反映機能、試作システムについて述べる。

Design and Development of Coordinated Control Function using IoT Devices for Room Scale VR

Manato Abe[†] Hideyuki Takahashi[†]

In recent years, virtual reality (VR) device has spread and becoming a familiar item in general households. Using VR device, you can get a highly immersive experience as if you were in a VR space, but there are many people who feel uncomfortable and unsatisfactory when using a VR device. In addition, it becomes difficult to notice changes in the situation in real space to the blockage of sight and hearing. In this research, we aim to realize a VR system construction platform that can support the improvement of VR experience and reflect changes in the real space in the VR space in cooperation using IoT devices. Currently, various devices that can improve VR experience are being actively developed, but there are problems that the weight and oppression using wearable devices, and devices of non-wearable that can improve VR experience is required. In this paper, we describe the design of the IoT coordinated control function in room-scale VR, and the operation confirmation of the prototype system of the VR experience improvement support function and the change reflection function of the real space using IoT home appliances and self-propelled robots.

1. はじめに

近年、高機能な VR 機器の低価格化や自宅等の部屋の一部の空間を動きながら VR を体験することが可能なルームスケール VR 技術の向上によって、VR 空間の体験が身近なものになりつつある。しかし、一般的な VR 機器は、視覚と聴覚情報に加えて、コントローラーの振動という単純な触覚情報の提示のみであり、より一層の没入感の向上が課題となっている。そのため、VR 体験の向上を目的とした装着型周辺機器の開発が活発に行われている。装着型周辺機器としては、VR 機器に装着することで風や温度などが体感できる Feelreal [1]、動き回らずに寝ながらの姿勢に特化することでより高性能で快適性を目指したヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いた HalfDive [2]などが存在するが、重量や圧迫感が体験を阻害する場合がある。そのため、非装着型周辺機器の開発も行われている。例えば、ポット型の装置内に入ることで風や温度などを感じることができる SENSIXS [3]がある。しかし、一般家庭で VR 機器を使用する場合は、移動可能な範囲(プレイエリア)の制約がある。また、VR 体験中は、聴覚や視覚が遮断され、生活環境の変化や災害等の危険に気付くことが難しい。以上の問題は、VR 空間と現実空間との間にギャップが発生していることが原因といえる。

本研究では、ルームスケール VR を想定し、VR 空間と現実空間の融合を実現するために現実空間の部屋の広さ(ルームスケール)に応じた VR 体験向上の支援機能と現実空間の変化などを IoT 機器が連携することで VR 空間に反映する機能を有した VR システム構築基盤の実現を目的とする。本稿では、IoT 機器が能動的に連携しながら VR 環境を構成するための動的構成法を提案する。具体的には、ルームスケール VR における IoT の協調制御機能の設計と IoT 家電や自走ロボットを用いた VR 体験向上支援機能と現実空間反映機能、試作システムについて述べる。

2. 関連研究と課題

既存研究として、現実空間を VR 空間に反映するシステムや家電・ロボットを利用した VR 体験向上のための開発・研究が行われている。例えば、運搬用ロボットで家具を制御し、VR 空間の触覚情報を再現する研究 [4]として、ロボットが VR 空間の触覚情報を再現するために家具を移動するシステム実現への取り組みが行われている。また、実世界環境をリアルタイムに VR 空間に反映する研究 [5]として、カメラ情報をもとに生成した点群データから実世界の物体をリアルタイムに VR 空間に反映する取り組みがある。さらに、VR 空間で触覚刺激を提示するための熱源配置効果を評価する研究 [6]では、4つのヒーターと熱を遮断するアルミ板をモーターで駆動させること

[†] 東北学院大学教養学部情報科学科
Department of Information Science, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University

により VR 空間内の熱の再現を行うための研究開発が行われている。既存研究の多くは、プレイエリアに制約のない VR 空間を対象としており、一般家庭などの制約が厳しいルームスケールでの環境を想定していない。加えて、現実空間へのフィードバックやインタラクションに関する機能が不足している。本研究では、ルームスケールを考慮しつつ、IoT 機器の能動的な連携によって現実空間でのインタラクション機能を備えた VR 環境の動的構成法によって課題解決を目指す。

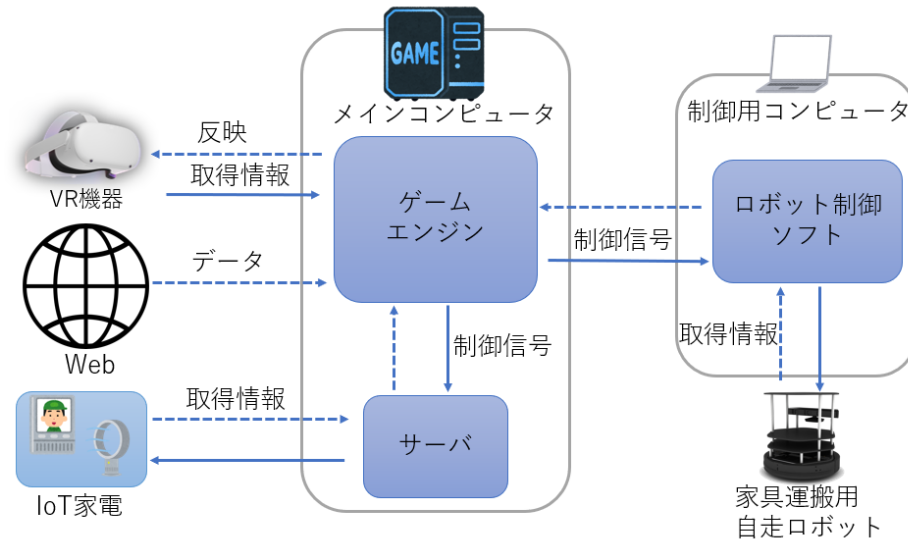


図 1 VR システム環境構築基盤の構成

3. VR 環境の動的構成法の提案

3.1 提案手法の概要

まず、VR シーンに応じて、能動的に提供可能な VR システム環境構築基盤の概要を図 1 に示す。本手法では、VR 環境の動的構成法として、(1)VR 空間の状況を現実空間で再現するため VR シーンに応じて、IoT 家電やロボットが連携し、利用者周辺に VR 体験を向上するための能動的な環境を構築するための VR 体験向上支援機能と(2)現実空間の状況や変化を VR 空間に動的に反映する現実空間反映機能をを提案する。それぞれ、現実空間を VR 空間に近づけると VR 空間を現実空間に近づけることによる 2 つの方法で現実空間と VR 空間の間に生じたギャップを埋める。具体的には、

扇風機やヒーターなど一般家庭に存在する多様な IoT 家電と連携し、それぞれの機能を駆使して様々な VR シーンの再現を行う。自走できない IoT 家電は、自走ロボット上に設置することで VR シーンの変化の度、適切な場所へ移動、IoT 家電から提示される触覚や嗅覚情報等を変化する。また、IoT 機器からのセンシング情報や Web からの災害情報や気象情報等を VR 空間に随時表示することにより、VR 機器使用時には認知が難しい生活環境の変化を VR 空間内に反映する。

3.2 VR 体験向上支援機能

VR 体験向上のための VR シーンの再現には、多様な IoT 家電と自走ロボットを利用する。IoT 家電は、VR 空間を構築するゲームエンジン (Unity など) と家電を制御するための通信をサーバ経由で行う。サーバを経由させるのは、多様な IoT 機器との連携で生じるデバイス間の規格等の違いを吸収する狙いがある。それぞれの通信は、TCP のソケット通信で行い、ISO 参照モデル 5 層以上のプロトコルとして IoT 機器とゲームエンジンとの通信のための新たなプロトコルを設計する。自走ロボットは、IoT 家電と比べて制御が複雑であるため、サーバを経由せずにゲームエンジンと自走ロボットの制御を直接行うものとする。

コード	送信元	デバイス名前コード	アクション	レスポンス	メッセージ識別子
000	000	000	000	0	000

図 2 メッセージの構成

表 1 メッセージの構成要素の説明

要素名	説明
コード	そのメッセージの役割を表す。これをもとにサーバがメッセージ受信後にどのような作業をするのか決定する
送信元	メッセージの送信元は、この箇所に自らのクライアント識別番号を記載する。クライアント識別番号とは、クライアントがサーバと TCP 接続を確立すると即座にサーバから一意に割り振られる 3 桁の整数列のことである。
デバイス名前コード	サーバと接続している全クライアントは、事前に登録されたデバイス名前コードで分類、グループ化している。例えば、扇風機は 001 で登録されており、クライアントは自分自身がどの名前コードなのか理解している。デバイス名前コードは、3 桁の整数列でデバイス名前コードごとに一意に決められている。

アクション	サーバと接続したクライアントが行う動作を表す。例えば、起動を表すコードとして 001 が登録されており、デバイスの起動を行いたいときは 001 を送信する。
レスポンス	応答の区別を行う 1 桁の整数である。クライアントが応答を行うときに 1 と記載して送信し、それ以外の場合は、0 と記載する。
メッセージ識別子	メッセージごとに割り振られる 3 桁の整数列である。ログを記録する際に利用され、メッセージの受信順に 000 から 1 ずつ加算されていく。999 を超えると 000 に戻される。

3.3 独自プロトコルの概要

VR 空間を構築するゲームエンジンと IoT 機器との通信で使用する独自プロトコルは、(1)ゲームエンジンからの制御信号の送信と(2)IoT デバイスからのセンシング情報等の送信とでそれぞれ異なるやり取りを行う。(1)ゲームエンジンから IoT 機器を制御するための制御を行う場合は、通信相手が不特定多数の IoT 機器となるので、すべての IoT 機器に一齐送信し、IoT 機器側で受信の是非を決める。(2)IoT 機器がセンシングし、ゲームエンジンに送信する情報は、ゲームエンジンにのみ送信する。IoT 家電の制御やセンシング情報の送信等の通信には、16 桁の整数列(メッセージ)を用いる。メッセージは、図 2 に示すように 6 つに分割可能とした。この分割した内容 1 つ 1 つをメッセージの要素とする。メッセージの要素の詳細を表 1 に示す。サーバと接続した IoT 機器やゲームエンジン等のすべてのクライアントは、TCP 接続に成功した直後にサーバからクライアントごとに一意に割り振られた 3 桁の整数列であるクライアント識別番号が渡される。サーバと接続している全クライアントはコード、デバイス名前コード、アクションを示す整数列とその名前とが紐づけられた辞書を所有している。サーバに加えて、すべての IoT クライアントの IP アドレスが格納されたクライアントリストとゲームエンジンの IP を所有している。また、クライアントからの制御信号などの送信と応答はすべてログ記録用二次元リストであるログリストに記録する。ログリストは、記録されている通信内容が 1000 件を超えた場合、自動的に CSV ファイルとしてローカルフォルダに現在日時を利用して yyyyMMddhhmmss.csv のファイル名で保存される。

3.4 ゲームエンジン以外のやり取りの流れ

IoT 機器等のゲームエンジン以外のクライアントは、サーバとの TCP 接続が確立すると、サーバから即座にクライアント識別番号が送信されてくる。クライアントは、サーバから送られてきた自らの識別番号を記録し、メッセージでのやり取りを開始する。ゲームエンジン以外のクライアントはゲームエンジンとのやり取りをするため、メッセージのコード要素をゲームエンジンとのやり取りで利用する整数列にする。例えば、インターフォンが来客の通知をゲームエンジンに送信する場合、インターフォ

ンがメッセージを作成し、サーバに送信する。サーバは、メッセージを受信後、コードの判別、受信したメッセージのコードの変更、メッセージ識別子の割り振り、メッセージ識別子要素の変更、メッセージのログリストへの記録、ゲームエンジンの IP に作成したメッセージの送信を行う。ゲームエンジンは、メッセージに記載された処理を行い、メッセージの応答を作成し、サーバに送信する。サーバは、応答を受信後、応答のメッセージ識別子を参考にログリストの元メッセージの行に応答を記録する。

3.5 ゲームエンジンのやり取りの流れ

ゲームエンジンは、TCP 接続開始後、ゲームエンジン登録作業を行う。ゲームエンジンがサーバからの識別番号を受信・記録した場合、すぐにゲームエンジン登録コードである 006 をメッセージのコード要素に記載し、サーバに送信する。サーバがメッセージを受信すると、クライアントリストから該当のゲームエンジンの IP を削除し、ゲームエンジンの IP を個別に保持する。以上の登録作業終了後からゲームエンジンはやり取りを開始する。ゲームエンジンは、ゲームエンジン以外のすべてのクライアントに対して送信を行うためのコードをコード要素とする。また、制御したい IoT 機器等のデバイス名前コードを記述、そのデバイスが行う動作も正確に記述する必要がある。メッセージを作成しサーバに送信後、サーバはコードを元に、メッセージの更新を行い、ゲームエンジン以外の全クライアントに送信する。メッセージを受信するクライアントは、応答メッセージを作成し、サーバに送信する。ログの記録処理は、ゲームエンジン以外のクライアントと同様である。

3.6 デバイス・アクションの追加機能

デバイス名・アクション名とそれぞれの 3 桁の整数列は、サーバとクライアントが所持する辞書で紐づけられている。この辞書への追加をクライアントから行うことができる。クライアントは、デバイスを追加する場合は 004、アクションを追加する場合は 005 をコード要素に記述したメッセージを作成し、サーバに送信する。サーバは、メッセージ受信後にデバイス名・アクション名の受信待機状態となる。クライアントは、追加したいデバイス名・アクション名をサーバに送信する。サーバが、そのメッセージを受信後、そのデバイス名・アクション名の 3 桁整数列を割り振りサーバが所持する辞書に登録する。なお、割り振られる 3 桁の整数列は 200 から 999 までであり、000 から 199 までの整数列は、静的な整数列となっている。その後、デバイスの追加なら 014、アクションの追加なら 015 をコード要素に記載したメッセージをクライアントに送信する。クライアントは、そのメッセージを受信後、デバイス名・アクション名の受信待機状態となる。サーバは、デバイス名・アクション名とそれに対応する 3 桁の整数列を同時に送信する。クライアントは、デバイス名・アクション名と整数列を受信すると自身の所持する辞書に登録を行う。

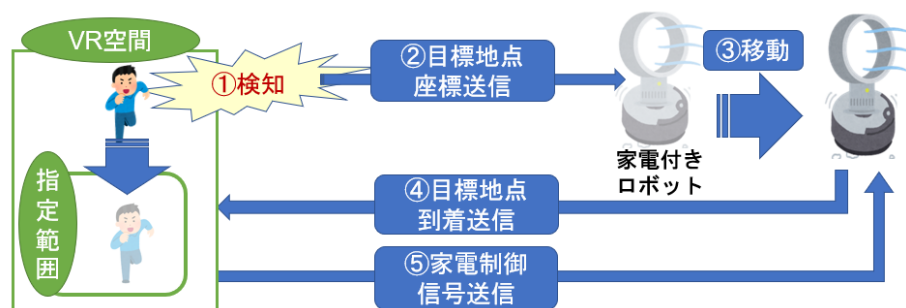


図3 VR空間の再現の流れ

3.7 IoT家電と自走ロボットによるVR空間体験向上支援

VR体験向上支援機能におけるVR空間の再現の流れを図3に示す。VR空間内で利用者が操作するアバターが多様なVRシーン(風が強く吹いているシーン等)の場所に侵入した場合、そのことを検知し、ゲームエンジンから自走ロボットへ目標地点への移動指示を行う。自走ロボットが目標地点に到着すると、ゲームエンジンに通知を送る。ゲームエンジンが通知を受信後、その自走ロボットに搭載されているIoT家電を制御する信号を送り、そのシーンの再現を開始する。なお、IoT家電制御信号の送信は、必ずしもロボットの目標地点到着時に行う必要はないため、移動指示を出すまえに、送信することも可能である。

3.8 現実空間反映機能

多様な現実空間の変化を反映するために、(1)IoT機器と連携し生活空間の状況変化の通知と(2)Webから情報を取得し、居住地域や国全体としての状況変化の通知という2つの手法をとる。IoT機器は、VR体験向上支援機能で使用したサーバを使用し、同様のプロトコルでゲームエンジンと通信を行う。IoT機器の役割は、主に居住場所のセンシングである。例えば、通信機能を備えたインターフォンと連携し、来訪者の有無を監視・通知する、火災報知器と連携し、火事の発生をいち早く通知するなどである。一方、Webからの情報取得は、ゲームエンジンから直接に行う。Webからの情報は、主に居住地域の変化など広い範囲での変化を監視・通知するため使用する。例えば、地震情報等の災害情報や降雨情報等の気象情報を監視・通知するために利用する。

4. 試作システムの設計と実装

4.1 開発環境

試作システムとして、VRデバイスにMetaQuest2, IoT機器はArduinoで作成する。

Arduinoはノートパソコンで制御する。VR空間を構築するために使用するメインコンピュータは、GPUがNVIDIA製RTX2080surper, メモリ32GB, CPUがIntel Core i7でありOSとしてWindows10を使用した。自走ロボットには、Turtuelbot 2を使用した。Turtuelbot2の制御用コンピュータとして、OSとしてUbuntu14.04.5のノートパソコンを使用し、Robot Operating System (ROS)で制御を行っている。

4.2 設計

試作システムの設計を図4に示す。MetaQuest2はメインコンピュータと接続する。ゲームエンジンとしてUnityを使用し、Unity上で構築した3D空間をMetaQuest2に投影するために、OculusIntegrationというアセットを利用した。Turtuelbot2は制御用コンピュータに接続し、Turtuelbot2上にコンピュータを搭載する。Turtuelbot2の制御には、ロボット制御ソフトROSを使用し、ROS内にROS-TCP-EndpointというUnityとの接続を担うパッケージをインストール、Unity側にもROSとの接続を担うROS-TCP-Connectorをインストールする。各種IoT家電との接続は、独自プロトコルを搭載したPythonサーバをメインコンピュータ内に構築し、UnityとIoT家電を接続する。IoT家電は、Arduinoを用いて独自プロトコルを搭載した扇風機とインターフォンをPythonで実装する。Unityにも独自プロトコルを搭載した。Web情報は、Unityが降雨情報と地震情報をYahoo!気象情報APIと強震モニタAPIを用いて取得する。

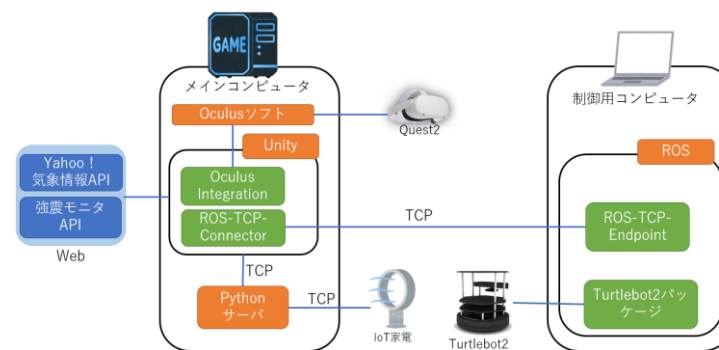


図4 試作システムの構成

4.3 試作システムの詳細と実験

IoT機器の協調制御機能の試作を行った。試作システムは、VRシーンとして春の花見を再現した。利用者は、VR機器を利用しVR空間上のアバターを操作、春の花見を体験する。その際、(1)VR体験向上支援機能が風を再現する。また、利用者がVR

体験をしている中、来訪者があった場合に(2)IoT機器による現実空間反映機能で来訪者の存在を通知、急な雨や地震などが発生した場合も、(3)Webによる現実空間反映機能で利用者に危険などを知らせる。

(1) VR体験向上支援機能による花見の風再現実験

VR体験向上支援機能の実装として、春の花見における風の再現を行う。今回の試作で作成したVR空間を図5に示す。VR空間上にデフォルメされた桜の木を作成し、桜の花びらを散らした。花びらはUnityの標準機能である風のような物理演算処理を行うWind Zoneを利用することで、風で花びらが舞っている様子を表現する。このようにすることで、利用者に風の方向を視覚的に認識させることが可能である。また、VRシーンの変化をわかりやすくするため、シーン変化の検知領域を設定し、領域の床を赤くした。ユーザが操作するアバターが赤い床の検知領域に入った場合、UnityからTurtlebot2に移動指示が送信され、Turtlebot2が目標地点に移動する。その実験の様子を図5に示す。Turtlebot2が目標地点に到着するとUnityに通知が行く。通知を受け取ったUnityは扇風機を起動させるメッセージをPythonサーバに送信し、サーバはそのメッセージをArduino用コンピュータに送信、コンピュータはArduinoに伝え、作成した扇風機のモータが回転を始める。その扇風機を図5に示す。

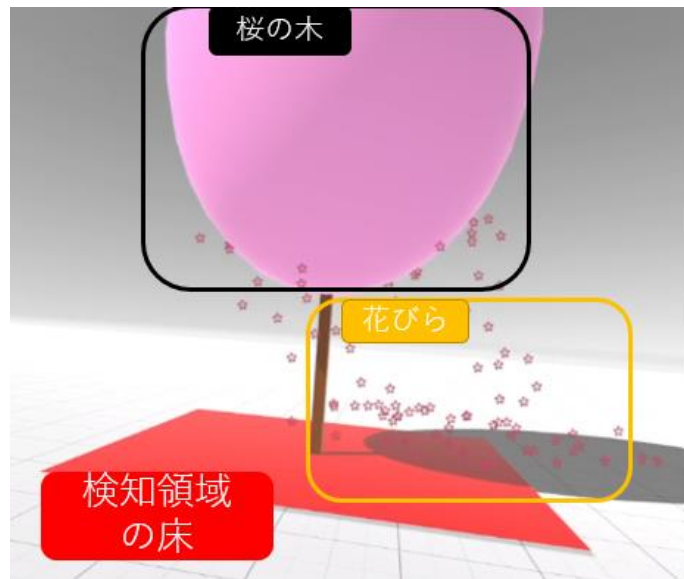


図5 VR空間



図6 Turtlebot2の移動実験

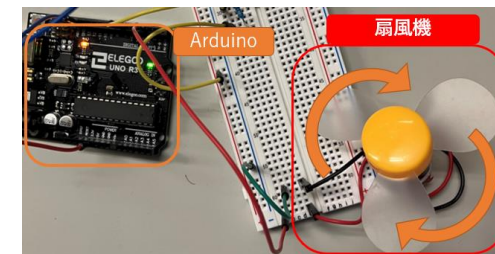


図7 Arduinoと扇風機

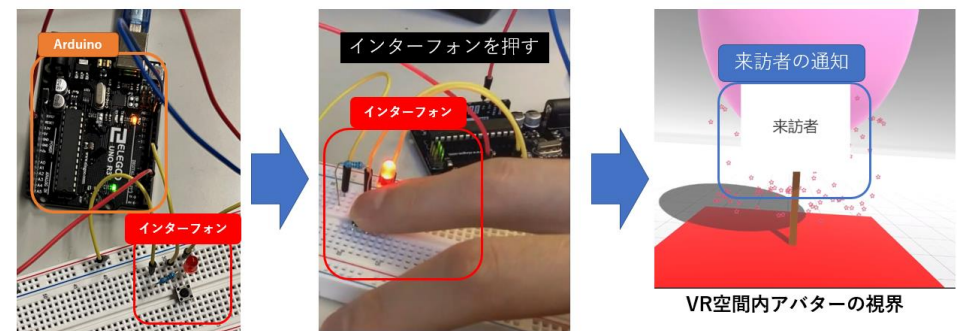


図8 来訪者の通知実験

(2) IoT 機器による現実空間反映機能の動作実験

VR 体験中に来訪者にインターフォンが押されたことを想定する。Arduino で作成したインターフォンのボタンが押された場合、接続されたコンピュータから Python サーバへメッセージを送信する。Python サーバはメッセージを Unity に送信し、Unity はその通知を受信後、VR 空間のユーザの視界の正面に来訪者が来たことを通知するテキストを表示する。動作実験の流れを図 8 に示す。



図 9 VR 空間上の地震情報の通知

図 10 VR 空間上の降雨情報の通知

(3) Web による現実空間反映機能の動作実験

VR 体験中の地震や降雨の発生を想定する。地震情報は、強震モニタ API から情報を取得し、地震発生を検知すると、震源地、マグニチュード、最大震度を VR 空間のユーザの視界正面にテキストで表示する。表示の様子を図 9 に示す。なお、今回の実験では、日時を実際の地震が発生した日時に変更してリクエストを送ることにより動作確認を行った。降雨情報は、事前に居住場所の緯度経度を登録しておき、その緯度経度地点における降雨強度を Yahoo! 気象情報 API から取得し、降雨強度が 0 より大きくなった時点でユーザの視界正面に降雨情報が表示される。なお、API へのリクエスト頻度は 1 日の最大リクエスト数より 2 秒毎としている。表示の様子を図 10 に示す。なお、動作実験は雨の日に行った。

5. 評価

今回、IoT 機器と連携し現実空間と VR 空間を融合するためのシステムを設計・試作した。試作システムの IoT 家電は、扇風機とインターフォンのみ作成したが、デバイスやそのデバイスが所有する機能を追加可能であるため、IoT 家電と連携することで VR 空間の再現が可能であるといえる。また、家電を搭載可能なサイズの自走ロボットとの連携も可能である。IoT 家電と Web と連携することにより現実空間の変化の通知も可能であることが確認できた。本研究では、既存研究で課題とされていた、(1)

現実空間でのインタラクションの不足や(2)一般家庭での使用の想定という 2 つの課題を解決した。(1)現実空間のインタラクションの不足に対しては、VR 空間と連動し、IoT 家電での VR 空間の再現や、自走ロボットとの連携による IoT 家電の移動により解決した。(2)一般家庭での使用の想定は、自走ロボットを利用し家電を動かすことで複数の家電を必要としないことやインターフォンや扇風機といった家電を利用することで解決した。

表 2 既存研究との比較

	当システム	RoomShift[4]	熱源配置[6]
現実空間の インタラクション	IoT 家電の機能, 自走ロボットの 動き	家具運搬ロボットの 動き	ヒーターの機能
想定する プレイエリア	家庭環境	環境の指定なし ※家庭環境や オフィス環境での 使用可能性あり	想定なし

6. おわりに

本稿では、ルームスケール VR における IoT 機器の協調制御機能の設計について述べた。また、MetaQuest2 や Turtlebot2 を用いたシステムの試作と動作確認実験を行った。今後は、実際に使用しての評価と、より多様な IoT 家電への対応を課題として検討を行う。

参考文献

- 1) Feelreal, <https://www.kickstarter.com/projects/feelreal/feelreal/> (accessed 2023-01-20)
- 2) HalfDive, <https://diver-x.jp/halfdive/>, <https://www.youtube.com/watch?v=dqfVp144vUU> (accessed 2023-01-20)
- 3) 感覚現実感ポッド: SENSIKS, https://vr-360.net/blog/sensiks_170529.html (accessed 2023-01-20)
- 4) R. Suzuki, et al., "RoomShift: Room-scale Dynamic Haptics for VR with Furniture-moving Swarm Robots," Proc. of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-11, Apr. 2020.
- 5) 服部 広大, 長尾 確, "仮想空間への実世界環境のリアルタイム反映とその評価," 情報処理学会第 82 回全国大会, 4ZC-01, pp.1-2, Mar. 2020.
- 6) 伊藤 互輝, 羽田 久一, "VR 空間で全周囲から触覚刺激を提示する為の熱源の配置と検討," エンタテインメントコンピューティングシンポジウム (EC2019) 予稿集, pp.303-309, Sep.2019.