

人感センサーを用いた照明設備の省エネルギーの効果の可視化

-UnityとOculusを用いた設計段階に適用可能な可視化ツールの開発-

Visualizing the effect of human-sensor for lighting energy saving

-Application of Unity and Oculus for developing the visualization tool in design stage-

○沈 振江*¹, 杉原健一*², 稲垣吉城*³, 滕 瀟*³

Zhenjiang SHEN*¹, Kenichi SUGIHARA*², Yoshiki INAGAKI*³, and Xiao TENG*³

*1 金沢大学地球社会基盤学系 教授 博(工)

Professor, School of Earth and Civil Engineering, Kanazawa University, Dr.(Eng)

*2 金沢大学自然科学研究科研究員 博士(工学)

Researcher, Graduate School of Nature Science and Technology, Kanazawa University, Dr.(Eng)

*3 金沢大学自然科学研究科環境デザイン専攻 大学院生

Graduate School of Nature Science and Technology, Kanazawa University

Summary:

In the "Basic Energy Plan" established by the Japanese Cabinet in 2014, we aim to realize ZEB (Net Zero Energy Building) on average for newly built buildings by 2030. In this research, in order to share the energy saving effect of the lighting design of the motion sensor between the user and the designer, the purpose of this research is to develop a tool for visualizing the energy saving effect using the motion sensor on the virtual space using the game engine. It is considered that the spread of motion sensors requires a means of communication (tool) for users and designers to share the same image of the rendering of the target space at the stage of lighting planning.

キーワード: 照明; エネルギー消費; 設計段階; VR

Keywords: Lighting; Energy Consumption; Design Stage; VR.

1. はじめに

本研究では、人感センサーの照明設計の省エネルギー効果を利用者と設計者の間で共有するため、ゲームエンジンを用いて仮想空間上に人感センサーを用いた省エネルギー効果の可視化ツールの開発を目的とする。

平成26年度に閣議で定められた「エネルギー基本計画」において、建築物については、令和12年までに新築建築物の平均でZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）を実現することを目指している^{1), 10), 11), 12)}。

平成24年の経済産業相資源エネルギー庁の中小ビル等の更なる省エネ・節電に向けた調査²⁾において、ビルの業務部門の用途別電力使用の状況において、照明が電力消費の割合の内約4割を占めているということが分かった。なお、照明の省エネ機器の普及に関して、住宅の居住者に対してアンケート調査を行い、照明設備の所有率を調査した報告^{3), 8), 9)}がみられる。宗方らの研究³⁾では、LED所有率が47.5%、調光設備が43.5%、多灯分散照明が19.4%、人感センサーが8.3%という結果になった。

照明の評価に関する研究の中で望月ら⁴⁾の節電照明を得た今後のオフィス照明環境の研究では、オフィスの照明消費電力量は設定照度、器具の発行効率や照明率、保

守率、照明する面積と時間で決まるとされ、照明による消費電力を減らすには、それぞれの項目において対処が必要であると判断している。人感センサーは中でも時間を操作することができ、照明消費電力量を削減するうえで有効的であるといえる。

中嶋ら⁵⁾は、中規模オフィスビルに適した省エネルギー設計の実践に関する研究で、実際に人感センサーを使ってみた効果については、人感センサー有効と無効の違いが25%から45%効果はみられた。また、特に人の少ない夜間や休日に顕著に表れた。休日夜間においては70%を超える消費量削減効果も見られることが分かった。よって、人感センサーを導入することで消費量が削減できることは明らかであり照明消費電力量を削減するための導入意義があるといえる。非住宅建築物におけるエネルギー消費量計算プログラム⁶⁾では、実際に使用した際の省エネルギー効果よりも、若干過小評価となっていると言われている。設計段階において仮想空間上で建物やそこで働く人のワークスタイルに合ったエネルギー消費量をシミュレーションすることにより、利用者が省エネルギー効果をイメージできるので、人感センサーの普及を促進することができると考えられる。

本論文では、人感センサーはワークスタイルに合わせてエネルギー消費を検討できるため、本研究では人感センサーに焦点を当て、オフィスの執務者を対象に研究を進めていく。人感センサーの普及には照明計画の段階で利用者と設計者が対象空間の完成予想図について同じイメージを共有するためのコミュニケーションのツールが必要であると考えられる。特に設計段階において、人感センサーの省エネルギー効果や使用感を利用者が理解するため、VRを用いた可視化ツールの開発を検討することにした。

2. 研究方法

ワークスタイルに併せてエネルギー消費の再現には、人感センサーの効果や使用感を利用者に理解させるため、設計段階で利用者と設計者の間でコミュニケーションをとる適切な手段がないため、ゲームエンジン内で人感センサーの効果や使用感を体験できるような可視化ツールの開発を本研究の目的とする。

研究手順として、まずゲームエンジンであるUnityを利用し、人感センサーのシステムを構築することで、実際の人感センサーと同様の挙動を仮想空間上に再現する。ハードウェアとしてPCとOculus Quest、ソフトウェアとしてUnityを用いる。

そして、ゲームエンジン内で人感センサーの効果や使用感を体験できるようにするために、主にPCではゲームエンジンであるUnityを用いて人感センサーの可視化ツールを開発し、Oculus Questを装着した際の操作などに対応した設計を行った。Oculus Questを使用した理由は、主に2つある。1つ目は、Unityとのデータの連携がスムーズであり開発しやすいため。2つ目は人感センサーのような動的なシステムの体験を設計段階で現実に類似した環境で体験でき、使用者のワークスタイルに併せてエネルギー消費を検討できるシステムであると判断したためである。

3. 人感センサーの仕組みと実験空間

3.1. 可視化ツールに取り込む人感センサー

人感センサーにはPIR（赤外線受動型）人感センサーが一般的に使用される。PIR人感センサーの仕組みは、人体が発している5~15 μ mの遠赤外線を検知し、センサーの範囲に入った人体と背景との温度差に応じた赤外線の輻射エネルギーの差異を検知することにより、人体を検知するものである。PIR人感センサーは赤外線を集光するための光学レンズ、赤外線検出素子、増幅回路から成り、光学レンズの設計により検知可能な範囲や感度が決定される（図1）。照明では、この人感センサーを用いて、人がセンサーの検知エリア内に入ると照明を点灯させ、人が検知エリア外に出ると消灯させることにより、不

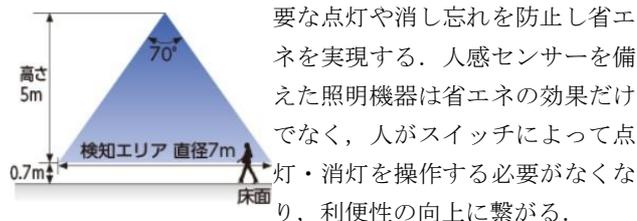


図1 人感センサーの検知エリア⁷⁾

要な点灯や消し忘れを防止し省エネを実現する。人感センサーを備えた照明機器は省エネの効果だけでなく、人がスイッチによって点灯・消灯を操作する必要がなくなり、利便性の向上に繋がる。

3.2. 可視化ツールを開発する対象空間

本研究では、金沢大学自然研2号館7階の都市計画研究室（図2）を主なスタディモデルとして使用した。面積は70.35m²で部屋用途はデスクワークとして使用している。照明器具の配置は2.4m×2.4m間隔で配置されており全部で12個配置されている。

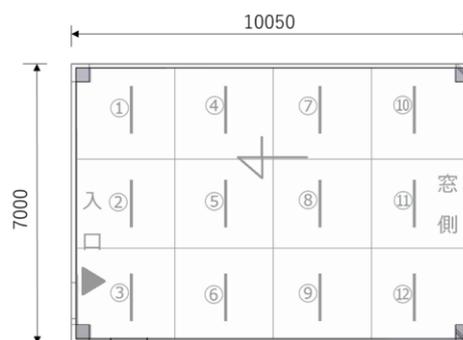


図2 可視化の対象実験空間

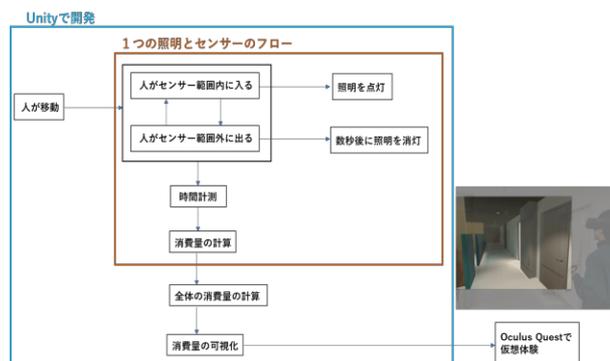


図3 人感センサーによる可視化ツールの開発

表1 照明の種類 LEKT423523YD-LD9

器具幅	W:230 mm
調光範囲	調光可能形 (約5%~100%)
器具光束	5100 lm
消費電力	33.4W(100V)
入力電流	335mA(100V)
エネルギー消費効率	152.6lm/W(100V)
付加機能	人感センサー
製品写真	

4. 可視化ツールの開発

4.1. 開発環境

図3示すように、開発ソフトとしてUnity Technologies

が開発しているゲームエンジンソフトであるUnityを使用する。開発者はC#を用いたプログラミングが可能である。Unityは無料で開発可能であり汎用性が高い。オブジェクトの作成などに Trimble 社の SketchUp (スケッチアップ) を用いて作成している。仮想体験をするツールとして Oculus Quest を使用する。

表1のように、ライトオブジェクトに関して、【LEKT423523YD-LD9】東芝LEDベースライト40タイプ直付形W230人感センサー内蔵昼光色6500Kを参考に作成した。しかし、ライトオブジェクトの調光機能を実現していない。

4.2 センサーオブジェクト

実際のセンサーが探知する範囲の形状は円錐の形をしている。円錐形状はUnity内にはないため、SketchUpを使用して表2の②のような円錐形状を作成し、FBX形式に変換してUnityに入れることで表2の③のようなセンサーの形状をUnity内で再現した。

表 2 センサーオブジェクトの設計

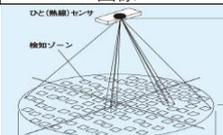
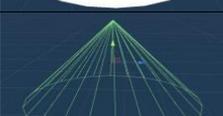
	ソフトの種類	センサー形状画像
①	実際のセンサー	
②	SketchUp	
③	Unity	
④	Unity	

表2の④では物質としての表面的な情報をレンダリングする Mesh Rendererをこのオブジェクトの要素から削除し、衝突判定を可能にする Mesh Collider を追加した。そうすることで Playerとこのオブジェクトが接触した際に検知できるようにした。

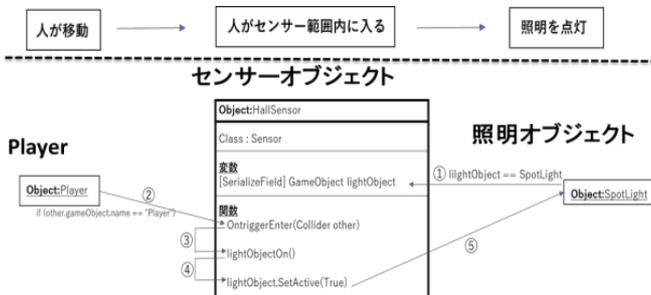


図 4 人感センサーによる照明点灯

4.3 可視化ツールの開発

仮想空間上で上記のシステムを再現するために、人感センサーの代わりとなるセンサーオブジェクトの作成・照明の代わりとなるライトオブジェクトの作成・人の代わりに仮想空間上で実際に利用者が操作し移動などができる

Playerの作成を行った。

実際に人感センサーによって照明が点灯する仕組みは、人感センサー範囲内に人が入るとその熱を検知して照明のスイッチをオンにするといった流れである(図3)。そして、Playerがセンサーオブジェクトに接触したとき信号をライトオブジェクトに送り、ライトオブジェクトをオンにするといった流れで仮想空間上にシステムを再現した。

(1) 照明点灯システム

照明点灯システムの状態遷移図(図4)をベースにシステムの説明を記す。まず、それぞれのオブジェクトに関して説明する。Object:Playerは現実世界の人の代わりである。真ん中のObject:HallSensorは人感センサーの代わりとなるものセンサーオブジェクトである。右にあるObject:SpotLightは照明の代わりとなるライトオブジェクトである。センサーオブジェクトにあるClass:Sensorはスクリプトである。また変数GameObject lightObjectはObject:SpotLightの設定をClass:Sensorから変更するための変数である。関数OntriggerEnter()はPlayerがセンサーと接触した際に呼び起される関数である。関数lightObjectOn()はライトオブジェクトにオンにする関数を呼び出すための関数である。関数lightObject.SetActive()はライトオブジェクトをオンにする信号を出すための関数である。

次に状態遷移図に関して説明する。まず、①で [SerializeField]GameObject lightObject に Object:SpotLight を代入することでClass:Sensor から Object:SpotLightの設定を変更することができる。そして、②ではもしObject:HallSensorに接触したオブジェクトの名前がPlayerだった場合、関数OntriggerEnter()を実行する。③では、関数OntriggerEnter()が実行されたことで、関数lightObjectOn()を実行する。④では、関数lightObjectOn()が実行されたことで、Object:SpotLightをオンにする信号を送るための関数lightObject.SetActive()を実行する。⑤関数lightObject.SetActive()が実行されたことで、Object:SpotLightが引数 Trueを受け取り、オブジェクトの状態をActiveに変更する。

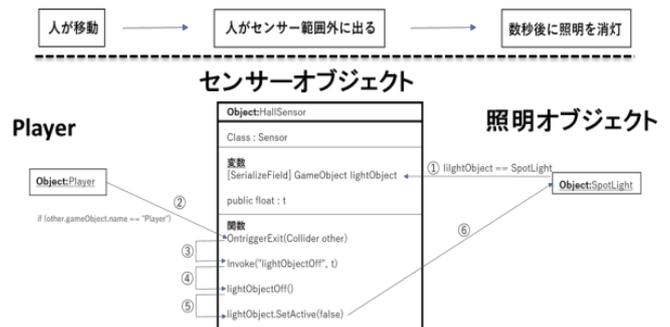


図 5 人感センサーによる照明消灯

以上によって、人感センサー範囲内に人が入るとその熱を検知して照明のスイッチをオンにするシステムを作成した。

(2) 照明消灯システム

実際に人感センサーによって照明が消灯する仕組みは、人感センサー範囲内に人が入っていた状態から人感センサー範囲外に出るとその熱の移動を検知してある一定時間経過後、照明のスイッチをオンからオフにするといった流れである(図5)。

まず、この段階では新に必要なオブジェクトに関して説明する。OntriggerExit()はPlayerがセンサーと接触状態から非接触状態になったときに呼び起される関数である。関数 Invoke()は時間t秒後に関数lightObjectOff()を呼び出すための関数である。関数lightObjectOff()はライトオブジェクトにオフにする関数を呼び出すための関数である。関数lightObject.SetActive()はライトオブジェクトをオフにする信号を出すための関数である。

次に状態遷移図に関して説明する。まず、①で [SerializeField]GameObject lightObject に Object:SpotLight を代入することでClass:Sensor から Object:SpotLight の設定を変更することができる。そして、②ではもしObject:HallSensorに接触したオブジェクトの名前がPlayerだった場合、関数OntriggerExit()を実行する。③では、関数OntriggerExit()が実行されたことで、関数Invoke()を実行する。④では、関数Invoke()が実行されたことで、関数lightObjectOff()を時間t秒後に実行する。⑤では、関数lightObjectOff()が実行されたことで、Object:SpotLightをオフにする信号を送るための関数 lightObject.SetActive() を実行する。⑥ 関数 lightObject.SetActive() が実行されたことで、Object:SpotLightが引数Falseを受け取り、オブジェクトの状態をActive状態からNot Active状態に変更する。

以上によって、人が人感センサー範囲内からセンサー範囲外に移動したときその熱を検知して照明のスイッチをオンの状態からオフの状態にするシステムを作成した。

4.4 開発した可視化ツールのイメージと問題点

実際にシステムを実行した様子が図-5 である。左側は人とセンサーが接触する前の状態である。カプセル型のオブジェクトは体験者をシステムのアバター (Player) として作成したオブジェクトである。円錐型のオブジェクトは人感センサーとして作成したセンサーオブジェクトである。図6では2つのオブジェクトが非接触状態であるため、右上にある照明オブジェクトは点灯していない。右側は人とセンサーが接触した状態である。アバター (Player) とセンサーオブジェクトが接触したことで、右上にあるNot Activeな状態の照明オブジェクトをActive な状態にするように信号を送り、Activeに状態なった照明オブジェクトが発光し周囲のオブジェクトに光を与えている様子である。

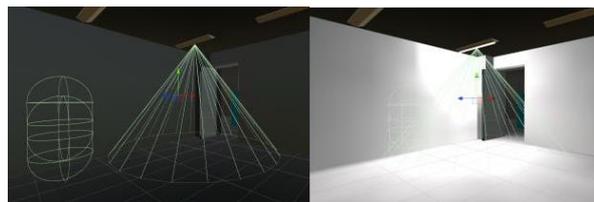


図 6 UnityのライトオブジェクトとPlayer

人感センサーによって照明が点灯するシステムに関する課題は、ライトオブジェクトの発光の仕方をできるだけ現実に似せて作成はしたが、それでも差異が生じる点。これは、Unityにあるマテリアルの発光の設定が詳細に変更できないため、周囲のオブジェクトの反射率を現実の物質の反射率と同じように設定するのが困難であるために生じている。また、家具などをオブジェクトとして設置した場合、光の計算の負荷が大きくなり、快適に操作できなくなる恐れがある点。加えて、リアルタイムで様々な場所の照明が点灯・消灯を繰り返す場合、家具によって生じる影をリアルタイムで作成するのは困難である点が挙げられる。まだ、点灯と消灯の際、ライトオブジェクトの調光機能は実現できていない。これはUnityのソフトの限界があるために生じている課題である。

5. 可視化ツールのエネルギー消費の計算

実際に消費量の計測に関しては、HEMSなどのシステムが照明の点灯と消灯を検知し消費量を計測している。本研究では、消費量の計測を行う際の計算式、電力量×時間×照明の個数を利用し、それぞれの照明が点灯していた時間を計測しデータとして取得する流れで消費量の計測を再現した。

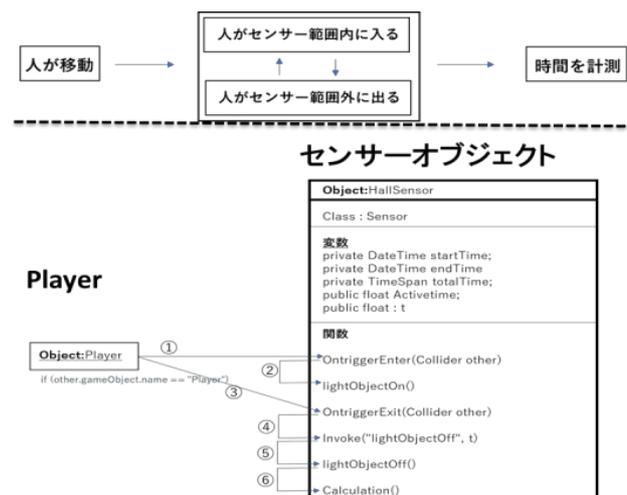


図 7 点灯時間の計測

5.1 点灯時間の計測

それぞれの照明の点灯時間を取得するシステムの状態遷移図(図7)とシステムの説明を記す。変数DateTime startTimeは、照明を点灯した時点での時間を読み取るた

めの変数である。変数DateTime endTimeは、照明が消灯した時点での時間を読み取るための変数である。変数TimeSpan totalTimeは照明が点灯していた時間を代入するための変数である。変数float ActivetimeはTimeSpan totalTimeの値を計算に使用できる値に変換した数値を代入するための変数である。変数float tは関数lightObjectOff()をt秒遅らせて実行するための変数である。関数Calculation()は計算をするための関数である。

次に状態遷移図に関して説明する。①ではもしObject:HallSensorに接触したオブジェクトの名前がPlayerだった場合、関数 OntriggerEnter()を実行する。②では、関数OntriggerEnter()実行時に、変数startTimeにシステムが実行されてから lightObjectOn()関数が実行されるまでの時間 (DateTime.Now) を代入した。③ではもしObject:HallSensorに接触したオブジェクトの名前がPlayerだった場合、関数 OntriggerExit()を実行する。④関数 Invoke() が実行されたことで、関数 lightObjectOff() を時間t秒後に実行する。⑤では、関数 lightObjectOff() 実行時に、変数endTimeにシステムが実行されてからlightObjectff()関数が実行されるまでの時間 (DateTime.Now) を代入した。また、関数 OntriggerExit() が実行されたことで、関数 Calculation () を実行する。

⑥関数Calculation() が実行されたとき、変数totalTimeに照明が点灯している時間 (endTime-startTime) の値を代入する。また、変数totalTimeのままでは計算に使用できない型であるため、変数ActiveTimeに変数totalTimeのfloat値(totalTime.Second)を代入する。

以上によって、それぞれの照明の点灯時間を取得するシステムを作成した。ここで、取得した照明の点灯時間は全体の消費量の計算の際に利用する。

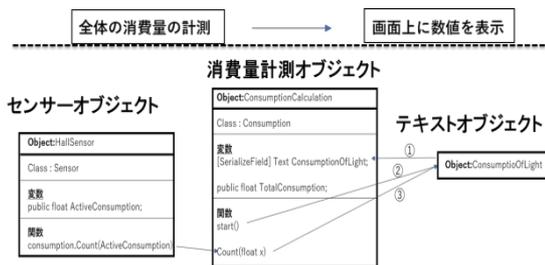


図 8 消費量計測

5.2 エネルギー消費量の計測

実際に消費量の計測に関しては、HEMSなどのシステムが照明の点灯と消灯を検知し消費量を計測している。本研究では、照明一つ当たりの消費量の求め方であるエネルギー消費量=電力×時間の式から、前項で求めた点灯時間を用いて消費量を求めている(図7)。

変数Activetimeは照明が点灯していた時間を代入する変

数である。変数float ElectricPowerは照明一つ当たりの電力を代入するための変数である。変数float ActiveConsumptionは、照明一つ当たりのエネルギー消費量を代入する変数である。関数Calculation()は照明一つ当たりのエネルギー消費量を計算するための関数である。

状態遷移図(図 8)に関して説明する。照明一つ当たりのエネルギー消費量=電力×時間より、変数ActiveConsumptionを照明一つ当たりの消費量、変数ElectricPowerを電力、変数ActiveTimeを点灯時間として、ActiveConsumptionに消費量の値 (ElectricPower*ActiveTime) を代入することで照明一つ当たりのエネルギー消費量を求めている。

以上によって、照明一つ当たりのエネルギー消費量の計測を行った。ここで求めたそれぞれの照明を合算することで部屋全体の照明のエネルギー消費量を算出することができる。しかし、照明一つ当たりのエネルギー消費量を求めるシステムに関する課題は、実際に同じ時間点灯した際の照明1つ当たりのエネルギー消費量はエネルギー消費量の値の正確性を確かめる必要がある。

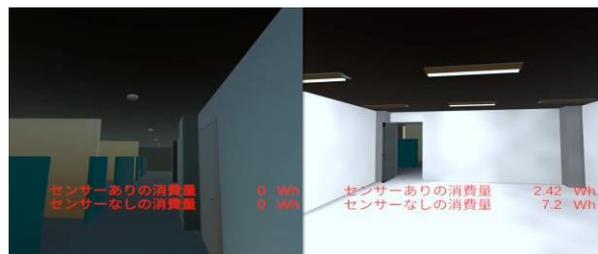


図 9 Oculus に導入した可視化ツールのイメージ

6. Oulus を用いた利用者の体験

可視化ツールのエネルギー消費の計算は図9のようにリアルタイムで利用者に確認できるようにしている。具体的には、WifiあるいはBluetoothを通して、PCからOculusに AirLinkあるいはCableLinkにより繋がり、仮想空間において、Playerが移動し、場所によって人感センサーによる照明の点灯と消灯を繰り返す、エネルギー消費量を確認できるようにしている。

都市計画研究室の学生6名を対象に実験を行い、可視化ツールの有効性を確認した(図10)。まず、Oculusの操作性が非常によいことがわかった。そして、Oculusの仮想空間において、実際の研究室にあるような歩き回る感覚がある。まだ、開発された人感センサーによる照明もうまく機能していることとエネルギー消費量の表示リアル的に表示するので、人感センサーによる省エネルギーの効果を理解できた。具体的には、操作性に関して、インタビューにより、下記のことがわかった。1) 人が実際に移動しないので、VR体験には利用者の安全性が確保されている。2) VR環境の臨場感に関して、SKETCHUPで整備した3次元の設計図データにも対応でき、

臨場感が非常に良い。そして、エネルギー消費量の理解には、3) 移動しながら、人感センサーの作動と電気利用との関係が視覚的に確認でき、人感センサーの有無によりエネルギー消費量が表示され、比較できるので、省エネルギー効果は把握しやすい。問題点として、コントローラを用いて目的地を指定して移動することになり、停留の場所が制限される。



図 10 利用者が Oculus を利用するイメージ

7. 結論

本研究では人感センサーの効果を利用者と設計者の間で完成予想図を共有するためのコミュニケーションの手段を作成するために、ゲームエンジンを用いて仮想空間上に人感センサーの挙動のシステム設計をすることを目的として研究を進めた。研究の進め方としては①人感センサーの実態を調査②システム設計③可視化の手順で行った。

システム設計に関しては、1) 人感センサーのシステムについて、人がセンサー範囲内に入ると熱を検知して照明を点灯し、人がセンサー範囲内から出ると熱を検知して一定時間経過後消灯するといったシステムを構築した。2) 照明・人・センサー・部屋空間の代わりとなるオブジェクトを作成し、人感センサーのシステム・照明を点灯するシステム・照明を消灯するシステム、エネルギー消費量の計測をするシステムも作成した。3) 利用者が人感センサーのシステムを体験しつつエネルギー消費量を視認できるようにするために、利用者の視点内にエネルギー消費量を表示するためのシステムも作成した。

可視化に関しては、まず、ハードウェアとして使用するPCとOculus QuestをUSBで繋げる。次に、Oculus QuestのOSはAndroidなので、Unityで作成したデータをandroid Platformで出力しPC上で起動することで、作成したシステムをOculus Questを用いて仮想空間で体験できるようにすることで可視化を行った。

インタビューにより、VR体験には利用者の安全性、臨場感が非常に良い。そして、エネルギー消費量の理解には、人感センサーの作動と電気利用との関係が視覚的に確認でき、人感センサーの有無によりエネルギー消費量が表示され、省エネルギー効果は把握しやすい。問題点として、コ

ントローラを用いて目的地を指定して移動することになり、停留の場所が制限されることが確認された。

以上によって、作成したシステムは、設計段階で人感センサーの省エネルギー効果を検討するのに役立つのではないかと考える。本研究では、人感センサーを用いて可視化ツールの開発を行ったが、近年照明器具の制御のための情報を収集するデバイスとしては、可視画像を用いた画像処理に置き換えられる傾向があり、今後の課題としたい。また、可視化のため、調光で徐々に暗くするなどの制御も考慮されていないので、多少省エネルギー効果に影響を及ぼすが、今後に加える機能としたい。

【謝辞】

この研究はJSPS基盤研究(C)課題番号19K04750の助成を受けている。ここで記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 環境省 ZEB PORTAL(閲覧日 2021.05.20)
<http://www.env.go.jp/earth/zeb/detail/04.html>
- 2) 経済産業省・資源エネルギー庁: 中小ビル等の更なる省エネ・節電に向けて～省エネからエネルギーマネジメントへ～(閲覧日 2021.05.23)
<https://sii.or.jp/bems/file/speech0628.pdf>
- 3) 宗方淳, 福田美羽 (2015) 住宅の照明設備の使用動機に関する研究 日本建築学会環境系論文集 80(713), pp567-574
- 4) 望月悦子(2013) 節電照明を経た今後のオフィス照明環境 第9回建築設備シンポジウム「建築環境の新たな展開に向けて」 pp65-70
- 5) 中嶋 俊介, 植田 浩文, 岡 克己, 後藤 祥仁 (2010) 中小規模オフィスビルに適した省エネルギー設計の実践 : (第2報)Yビルにおける省エネルギー効果の検証 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 D-65
- 6) 国土交通省 エネルギー消費量計算プログラム (閲覧日 2022.09.23)
https://www.kenken.go.jp/becc/documents/building/Manual/webprov3_manual_20220401.pdf
- 7) 照明の制御(オフィス共用部) 照明の手法3-1 -電気設備学会(閲覧日 2021.05.20)
https://www.ieiej.or.jp/activity/environment/pdf/2015_re_consideration03.pdf
- 8) 土屋 依子, 伊藤 史子, 蘇比娜 海熱提 (2015) スマートハウスの購入行動: スマートハウスは普及するか, 日本不動産学会誌 29(3), pp32-41
- 9) 土屋 依子, 伊藤 史子, 蘇比娜 海熱提 (2015) 環境・消費志向に基づくスマートハウス購入行動の影響要因分析 - 八王子・多摩地域の戸建住宅購入者を対象として, 環境情報科学論文集 29(291), p291-296,
- 10) 経済産業相 資源エネルギー庁(閲覧日 2021.05.29)
<https://www.enecho.meti.go.jp/>
- 11) 東芝ライテック株式会社 人感スイッチ天井取付型広角検知シリーズ(閲覧日 2021.09.26)
https://www.tlt.co.jp/tlt/products/wiring/switch/ceiling_motion_sensors/ceiling_motion_sensors.htm
- 12) 環境省 脱炭素ポータル(閲覧日 2021.06.26)
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/