

仮想現実空間における火災避難訓練と行動選択データの収集

Indoor Fire Evacuation Drill in Virtual Reality Space and Collecting Behavior Selection Data to Sophisticate Simulation Model

飯島 正[†], 高浪晃暉[‡], 岩佐貴俊[‡], 佐藤亮太[†], 金子雄太[‡], 内川 賢[†]

Tadashi IJIMA[†], Koki TAKANAMI[†], Takatoshi IWASA[‡],

Ryota SATO[†], Yuta KANEKO[‡], and Ken UCHIKAWA[†]

[†]慶應義塾大学 理工学部

[‡]慶應義塾大学大学院 理工学研究科

[†]Faculty of Science and Technology, Keio Univ.

[‡]Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

要旨

仮想空間において屋内火災を体験させ、実際の身近な環境における多様な状況設定での避難訓練を安全に実施し、避難スキルの向上を図る。それとともに、従来は机上で行っていた行動選択アンケートを、仮想空間内で被災体験中の被験者に対して実施することで、シミュレーション上での被災状況をより的確に被験者に認識させ、より的確な行動選択データを収集し、行動パターンを生成する。さらに、その際に各種の生体情報を収集し、分析に使用する。これによって、避難シミュレーションにおける被災者の振る舞いの高度化、洗練化を図る。

この研究計画は本年度より開始したばかりであるが、本報告は、その初期の中間報告である。

1. はじめに（本研究の目的）

屋内火災が発生した時、火災発生の際に構内放送があっても、被災者はすぐに避難行動を開始せず、様子見の姿勢をとることが多いということは広く知られている。その後、火や煙を実際に見たり、音や匂いでそれを感じたり、また停電の発生、周囲の人間の避難開始といった状況に至って避難行動を開始することが多い。こうした避難行動は、被災者の心理的傾向や心理状態にも関係しており、不安感の強い傾向にあるほど、一般に避難開始時刻は早まる。そうした心理傾向を導入した避難者行動シミュレーションは未だ例がすくない。その精度を向上させるには、被災者集団の構成員の心理傾向を把握し設定するしかない。

そこで、事前の心理テストに加えて、臨場感を高めた仮想現実空間の中で行動選択データを収集することでデータの質を高めると同時に、体験型訓練にも役立つことが本研究の目的である。行動データの収集の際には、合わせて各種生体情報を収集し、両者を突き合わせることで、データ取得時の被験者の状況をより詳細に把握することを試みる。

一方、著者らの研究プロジェクトでは、これまで、事前に机上での質問紙に基づく心理テストを行った上で、多様な被災状況における行動選択をアンケートによって求め、幾つかの仮説の下、共分散構造分析を行うことで、その関係をパス分析等で調査分析してきた。さらに、その行動選択をマルチエージェントシミュレーションに組み込むことで、特定の性格傾向分布を持つ集団的な避難行動（例えば避難開始のきっかけやタイミング、周囲の被災者の行動への追従性、消灯や煙等の環境変化との関係、避難方向）と、それに対する効率的な避難誘導に関して、シミュレーションに基づく調査実験を繰り返してきた。その結果、シミュレーション中のエージェントの行動をより現実に近づけ、体験型シミュレーション自体も高度化することを目指している [5]。

しかし、机上での質問紙（アンケート）による行動選択の調査では、想定されている被災状況を対象者に説明し理解してもらうことが容易ではなく、実際の行動選択と必ずしも一致しない傾向があると予想される。そこで、被験者に立体視によって臨場感を高めた没入型のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着してもらい、仮想現実 (VR=Virtual Reality) 空間の中で、行動選択アンケート（質問もするが、それ以上に、実際に行動してもらってその記録をとる）を実施し、より精度の高いデータの収集を行うことを提案する。さらに、その際の被験者の各種生体情報を取得する。行動選択時の被験者の生体情報は、そのときの被験者の状況を把握するために有効なデータとなりうるものと期待している。

取得予定（現在、予備実験としてデータ収集を行っている）の生体信号/生体情報は、ワイヤレス心電

計による心拍揺らぎ測定, NIRS (近赤外光分光法, 光トポグラフィー) による脳血流計測, 瞳孔径と瞬目の状態と視線 (HMD 内), 脳波 (但し, 開眼状態で運動を伴う計測のため, まずは参考に留める), サーモグラフィーによる鼻部皮膚温の非接触計測, 皮膚抵抗などである. このうち, 瞳孔径と瞬目の状態と視線に関しては, HMD 内部での計測経験を持っていない. それ以外の生体信号計測と分析に関しての経験は, HMD とは独立なので既に保有している. このような被験者の心理的な行動傾向を生体情報をも含めて取得することで, シミュレーションを高度化する目的の研究は従来見受けられない.

但し, 仮想現実空間内における被災体験は, 必ずしも被験者に十分な臨場感を与えることができず, 現実とのズレを生じてしまう可能性はある. 現時点では, 仮想現実空間と現実空間との間のズレに関しては, 十分な知見が得られていない. 一方で, 仮想現実空間では, 仮想現実空間特有のストレスも知られている. ヘッドトラッキング機能があるヘッドマウントディスプレイを使っているにもかかわらず, フィードバック映像への追従が時間的に遅れたりズレたりすると, 装着者は特有の車酔いのような症状を発することがある. これは, いわゆる VR 酔いを言われるもので, 時間的ズレだけでなく, 運動感覚の欠如や日常的な体性感覚との違いからも引き起こされると言われている. 著者らは, 従来より, 情報システム利用時の生体情報を収集し, 情報システム利用者の心理的負担 (メンタルワークロード) をストレスの形で, 推定し, それをもとに情報システムのユーザビリティを向上させる研究も行ってきた [7]. こうした症状に関しても, その原因の追求と定量的な改善方法を検討するために, 著者らの生体情報計測と心理的負担の推定の経験を活かすことを目指している.

さらに, これらの成果は, 再び仮想空間における体験型訓練に反映する. 著者らが状況適応型避難訓練と名づけた仮想現実空間 (以下, VR 空間とよぶ) での避難訓練への応用を継続して試みる. 小中学校や職場などで避難訓練を経験することは多いが, いろいろな状況を設定した訓練を何通りも実施する余裕はない. 通学・通勤で使う駅構内など公共施設の建造物での避難体験も重要であるにもかかわらず, そうした公共空間での避難訓練のための占有使用は実現が難しい. 介護施設や病院などでは自力避難可能な避難者のための訓練だけではなく, 介護者が要介護者を補助して避難する状況も実地体験しておくことの価値は高い. どのような避難訓練でも, それを体験するかしないかの差は大きい, 現実の被災と訓練の間には, その臨場感に大きな違いがあるとはいえ, 下手に臨場感を高めようとすると怪我などの危険を伴いかねない. そこで, 一種のシリアスゲームとして, VR 空間においてできるだけ参加者に安全に多様な経験をしてもらうことを目指している. 建造物の建築時に作成される標準的な設計データさえ入手できれば簡単に避難訓練用の VR 空間を構築できるプラットフォームを構築中である (現在は, 標準的な 3D-CAD で採用されている CAD データから変換可能な標準データ形式 IFC (Industrial Foundation Classes) を採用している).

本研究成果は, これまで, 避難行動シミュレーションにおいて, 十分な根拠なくモデル化されることの多かった人の行動選択をより詳細に高い精度であつかうために生体情報を活用することから, 質的研究 (定性的研究) と量的研究 (定量的研究) を融合させた混合アプローチを採用した避難行動研究のデザインとして意義があると考えている.

2. 研究計画と現状

本研究においては,

- (a) VR 空間の構築と利用,
- (b) VR 空間での生体情報計測,
- (c) データの解析,
- (d) シミュレーションへの反映,

といったステップがある. このうち, 現在進行中の (a) と (b) のステップに関して述べる.

(a) は, さらに 4 つのサブテーマ

- (a-1) VR 空間におけるアバターの操作の実現,
- (a-2) VR 空間のための環境情報の取得と空間構築,
- (a-3) VR 空間における災害の再現,
- (a-4) VR 空間内の周囲の避難者の振る舞いモデルの構築

に分けられる。このうち(a-4)は(d)にも含まれる。

(b)に関しては、(鼻部皮膚温、脳血流、脳波、心拍揺らぎ、瞳孔径、瞬目、皮膚抵抗など)数多くの生体情報を取り扱う。それぞれのVR空間での測定技術(開眼状態で運動を伴うので雑音の混入が予想される)を確立することが重要である。

本研究計画に先立ち、著者らは、避難シミュレーションに関連して、以下のような研究を行っている。

(i) 質問紙による行動選択アンケートと性格5因子モデルに基づく性格診断によって得られた集団の避難行動シミュレーション^v

(ii) 3次元CADデータから抽出した建造物情報と広域地理情報に基づくエージェントベースドシミュレーション [6]

上記の(i)では避難者の行動と心理的傾向を質問紙によって推定し、それに基づくシミュレーションを実施した。これによって避難者集団の心理的傾向の分布を与えて、それに基づいた集団行動予測を行う基礎を構築した [5]。しかし、被験者の行動選択の傾向を質問紙によるアンケート(実際にはWebアンケート)で行ったため、被験者には切迫感がなく、被験者の自己判断にもとづくため、その行動選択が現実に近いものである保証が十分に得られなかった。(ii)では、Java言語のためのゲームエンジンjMonkeyEngineをつかった人の行動シミュレーションの3次元可視化も行っており、VR空間の構築準備を進めてきてきた。現在は、ヘッドマウントディスプレイOculus Rift DK2での使用のために、Unityというゲームエンジンを併用している。

さらに、研究代表者とその研究室では、これまで生体情報センシングを用いて情報システム利用時のストレスやメンタルワークロード(心理的負担)推定を幅広いセンサを使い実施している [7]。しかし、VR空間での測定に関してのスキルは有していない。VR空間での生体信号/生体情報計測のスキルの蓄積が急務である。

(iii) 赤外線熱画像カメラによる顔の鼻部皮膚温計測、顔の可視光動画像からの画像処理による瞬目(瞬き)回数計測、NIRS(近赤外分光法)携帯型センサによる脳血流量計測、ワイヤレス心電計による心拍揺らぎの計測に基づく、情報システム利用時のストレス評価 [7]

2.1.(a) VR空間の構築と利用

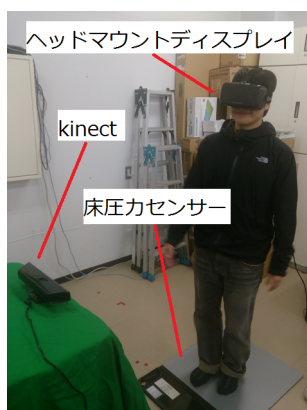


図1: ヘッドマウントディスプレイを装着した被験者



図2: 仮想現実空間内のアバター (Unityで構築)

2.1.1.(a-1) VR空間におけるアバターの操作の実現

これには、基本的にヘッドマウントディスプレイを装着した被験者がその動きに応じて、その姿勢情報を変化させる技術が必要である。ヘッドマウントディスプレイ(HMD)にはOculus Rift DK2を使用している。同機では、赤外線カメラでHMDに付けられた赤外線LEDの赤外光を捉えて、頭部追跡(ヘッドトラッキング)ができるが、立位で使うことから、圧力センサから取得した被験者の足跡データ(図3)や、距離画像センサなど(kinect)から取得した被験者の姿勢データ(図4)を反映させる。これらに関しては技術的蓄積を保有している。

VR空間での行動選択アンケートは、本研究計画の目的の一つであり、これまでの保有技術のもとに新たに構築していくべき要素である¹。VR空間での行動選択アンケート(図56)の回答は、最終的には

¹現時点では、どのようなアンケートを実施するかを示す事例を幾つか作成しているに過ぎない。

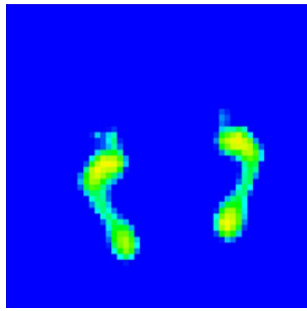


図 3: 床圧力センサーによる足跡情報取得

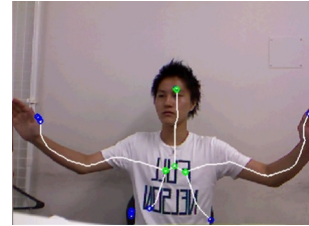


図 4: Kinect による姿勢情報取得



図 5: VR 空間内での行動選択アンケート (1)



図 6: VR 空間内での行動選択アンケート (2)

行動によって取得する。画面上に表示される選択肢にもとづき、被験者がどちらかの行動を取ることを認識して、回答とする。但し、そうした行動認識や例外(選択肢以外の行動をとった場合)の対応に関して技術的に確立するまでは、音声による回答も併用する予定である。

2.1.2.(a-2) VR 空間のための環境情報の取得と空間構築

建造物データとしての IFC データの扱い、ならびに、家具等調度品のデータの取扱が必要である。また、家具等の調度品を避けて、建造物の中で避難する周囲の避難者の行動をシミュレートするためのシミュレーションモデル構築を行っている [8]。図 7 は、建造物の設計時に作成された三次元 (3D)CAD のデータから変換された、標準的なデータ交換フォーマットである IFC データをワイヤーフレーム形式で表示したものである。図 8 は、避難シミュレーションの経過を記録しておき、Java 言語向けゲームエンジン JMonkeyEngine で三次元可視化したものである。いずれも、当研究プロジェクトに先立ち、当研究室で構築してきた技術的蓄積の一部である。

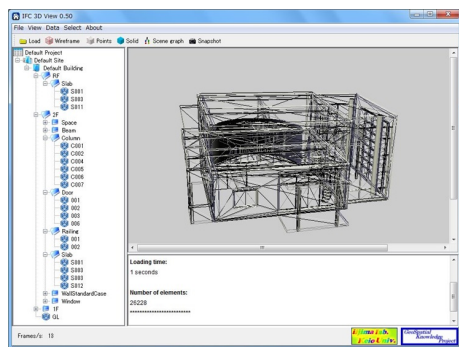


図 7: 建造物の 3D-CAD(IFC) データ

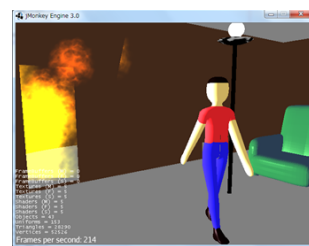


図 8: JMonkeyEngine によるシミュレーションの 3 次元化可視化

2.1.3.(a-3) VR 空間における災害の再現

屋内火災における煙や延焼の再現(物理シミュレーション)には、粒子法を用いた物理シミュレーションを実施する。Unity には、ParticleSystem が既実装されているが、本研究計画と並行して実施している広域避難シミュレーション研究プロジェクトでは、災害(津波や溶岩流など)の物理シミュレーションのために、計算流体力学(CFD)手法として粒子法を採用しており、この技術を利用することを検討し

ている。

2.1.4.(a-4) VR空間内の周囲の避難者の振る舞いモデルの構築

周囲の避難者の行動は、シミュレーションモデルを構築するが、その行動の外観的な臨場感を向上させる作業がある。シミュレーションから生成される周囲の避難者の行動は離散的な行動のシーケンスとなるが、それを滑らかに接続し、自然な振る舞いを再現する。これには、いわゆるモーションブレンドという技術を用いる。

2.2.(b) VR空間での生体情報計測

2.2.1.(b-1) 各種生体情報の取得と雑音除去

使用するセンサ情報は大きく4通りに分けられる。一つ目は、画像系情報（サーモグラフィーから熱画像として取得する鼻部皮膚温、可視光カメラ動画から画像処理によって取得する瞳孔径変化と瞬目回数）である。図9は、サーモグラフィーによって鼻部皮膚温を計測している様子である。背景部の熱画像と鼻部の熱画像から温度差を求めている。一般に、緊張状態においては、自律神経系の影響（交感神経活動が優位となるため）で鼻部の毛細血管が収縮し、皮膚温が下がることが知られている。二つ目は、ストレスから心臓血管系に影響を受ける時系列データ（心電図のR-R間隔から取得する心拍揺らぎや皮膚電気抵抗／指尖脈波等）、三つ目は、同じくストレス指標として用いられる唾液アミラーゼ活性、最後に脳活動の一部を示すことができることとされるNIRS（近赤外光分光計/光トポグラフィ）から取得する脳血流（と脳波）の時系列情報である。図10は、光トポグラフィによる前頭部の脳血流計測の様子である。現在、VR空間での計測に入る前に、予備実験として、いわゆる演算スパンテストと反転迷路テストという二種類の課題でデータ計測を行っている。図10は、タッチパネルのディスプレイを指でなぞって二次元迷路を脱出する課題であるが、指を動かしたのとは反対（鏡像反転）した方向に、迷路を進むように作ってあるため、空間認知の際にストレスを与える課題となっている。

VR空間では、開眼かつ運動を伴う状況での計測をおこなうので、雑音の影響を大きく受けることが予想される。信号処理的手法による雑音除去は最低限必要である。

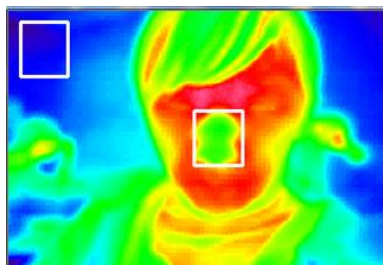


図9: 鼻部皮膚温の計測状況 [7]

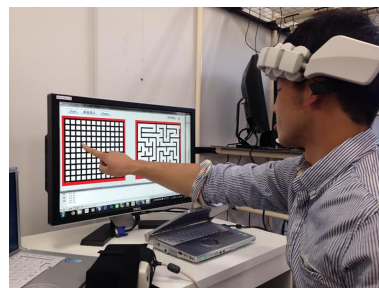


図10: 前頭部の脳血流計測 (反転迷路実験)

2.2.2.(b-2) 基礎データ収集用のVR空間の構築

避難体験のためのVR空間とは別に、並行して基礎データを収集するためのVR空間を構築し、現実空間とVR空間との間の関係を明確化することを試みる。

3. 関連研究と本研究の独自性ならびに目標

避難訓練が、実際に災害に遭遇した際の避難スキルの向上に有効であることはよく知られているが、いろいろな状況を設定しての避難訓練は、多大な時間と、危険を伴うため、なかなか難しく、どうしても通り一遍の訓練になってしまいがちである。この状況を打開するために仮想現実感を避難シミュレーションに導入する研究は、広域避難から屋内災害避難まで実施されてきた。特に訓練のための体験型シミュレーションについては国内においても活発な研究事例がある [1][2][3][4]。しかし、生体情報を取得し、被験者の心理的な行動傾向を取得することでシミュレーションを高度化する目的のものは見受けられない。

データ収集と体験的訓練という2つの研究目的のそれぞれに目標とする到達点がある。一つは、多様

な被災状況を再現した VR 空間における被験者の行動選択によって、実際の被災時の行動選択傾向を予測する方法を確立し、それを避難誘導の高度化や、避難計画立案に有効に役立てることである。もう一つは、建造物の設計図や地理情報など空間構造の情報さえ入手できれば、それを元に、その現実の空間内での避難体験を可能とする VR 空間構築技術の確立である。

前者には、現実空間と VR 空間のギャップという大きな壁がある。しかし、従来までの質問紙による調査分析に比べると、対象者への被災状況の説明が遥かに的確に行えることから、この研究により、多様な行動選択データの収集・蓄積が可能となり、シミュレーションの高度化が図れると期待している。後者に対しては、現在、建造物の三次元設計情報（CAD データ）として一般に使われているものから、変換できる標準データを採用することで、空間情報の入手を容易化することを目指す。VR 技術が今後、発展していくことは十分に予測できるが、それが精緻化していく一方で、空間モデリングに対する負担は、従来よりも大きくなっていく。避難体験は、実際に対象者が生活している空間を対象として実施することに大きな意義がある。しかしその空間データの作成に大きなコストがかかるようでは普及させることはできない。本研究では、既にあるデータ（最近では、建造物設計時に何らかの三次元 CAD が使われることが一般的）を再利用することで、コストを抑えつつ、いろいろな場所で、いろいろな状況での避難体験を「安全に」積むことのできる環境の構築を目指している。

4. おわりに

本研究計画は、今年度から始めたばかりであり、本報告は、その初期の中間報告である。しかし、本報告で述べてきたとおり、従来からの研究プロジェクトの延長線上にあり、これまで蓄積してきた知見とスキルを有効に活かすことができると考えている。

謝辞

当研究室・SIM/GIS 班 (シミュレーション/地理情報システムグループ) のこれまでの卒業生の皆さん (八島 敬暁 (2012 年度修士了), 藤田 智紀 (2012 年度学部卒), 瀬良 篤 (2012 年度学部卒), 久光 遼平 (2011 年度学部卒), 岡野 智哉 (2010 年度修士了), 松田 匠未 (2009 年度学部卒)) に感謝します。

参考文献

- [1] Branislav Ulicny, Daniel Thalmann: “Crowd simulation for interactive virtual environments and VR training systems,” *computer Animation and Simulation 2001, Eurographics 2001*, pp 163-170, 2001.
- [2] Shendarkar, Tucson, Vasudevan, Seunggho Lee, and Young-Jun Son: “Crowd Simulation for Emergency Response using BDI Agent Based on Virtual Reality,” *Proc. of the Winter Simulation Conference*, pp.545-553, 2006.
- [3] 飯田明彦, 山田常圭, 阿部伸之, 山田茂, 山村明義, 小田博志, 須賀昌昭, 鈴木修: “バーチャルリアリティー技術を用いた体験型火災シミュレータ装置の開発,” *日本火災学会研究発表会概要集*, pp.72-75, 2003.
- [4] 谷塚俊輔, 中西英之, 石田亨, 阿部伸之, 山田常圭: “建物火災を対象とした擬似体験型マルチエージェントシミュレータの開発,” *人工知能学会第19回全国大会*, 2005.
- [5] 八島敬暁, 山崎淳城, 瀬良篤, 藤田智紀, 飯島正: “人間の行動シミュレーションのためのパーソナリティと有限の処理能力を有するエージェントモデルの構築,” *情報システム学会, 第8回全国大会・研究発表大会*, 2012.
- [6] 山崎淳城, 八島敬暁, 藤田智紀, 飯島正: “各個人を対象とする情報収集/提供機能を備えた防災・減災のための地理情報システムの構築,” *情報システム学会, 第8回全国大会・研究発表大会*, 2012.
- [7] 石井愛弓, 飯島正: “センサーによって取得したストレスレベルによる利用者インタラクションの設計・評価,” *第9回全国大会・研究発表大会*, 2013.
- [8] 岩佐貴俊, 飯島 正: “屋内避難シミュレーションのための人工ポテンシャル法による経路生成～衝突を回避しつつ目標地点へ向かう滑らかな経路計画に向けて～,” *電子情報通信学会, 知能ソフトウェア工学研究会, 信学技報, Vol.114, No.66, KBSE2014-2*, pp.7-12, 2014.