

VR技術を用いた火災体験シミュレータ"fire cube"の開発

須賀昌昭 山田常圭^{*1}
阿部伸之^{*2}

概 要

安全・安心の確保が社会的に求められている。地震や火災など、日々の生活に災いをもたらす事柄に遭遇することなく、快適に暮したいと誰もが願うものである。一方で、いつ起こるか分からない災害に備えることも重要であり、現実には起きてしまった場合の被害を最小限に食い止める予防措置も講じておかなければならない。

本稿では、VR技術を火災分野に適応し、擬似体験による教育・啓蒙・訓練等への活用を念頭に、独立行政法人消防研究所(現総務省消防庁消防研究センター)と共同で開発を進めた火災体験シミュレータ“fire cube”を紹介する。

擬似体験を提供する空間である体験室、機器類などのハード面、体験室に備えられた機器類を制御し環境要素を実現するためのソフト面、及び開発した施設を用いて試行した被験者実験の概要を報告する。

Development of "fire cube" - a Unique Fire Simulator using Virtual Reality Technology -

Abstract

Safety is one of humanities key desires. Whilst everyone hopes disasters such as fire and earthquakes will not happen, it is very important to provide a safety net against any disaster and to take measures to minimize their impact on society.

This report introduces a unique fire simulator called “fire cube” jointly developed by the National Research Institute of Fire and Disaster and FUJITA Corporation. This development of the “fire cube” using virtual reality technology is proposed for disaster-related education for ordinary people and simulation training for firefighters.

This report also outlines required equipment and facilities, software which handles the movement of any devices and creates pseudo-climate conditions in the virtual experience space, and evaluation of this system by examinee experiments.

キーワード: バーチャルリアリティ, 火災体験,
避難, 音声誘導, 被験者実験

*1 総務省消防庁消防研究センター 博士(工学)

*2 総務省消防庁消防技術政策室 博士(工学)

§1. はじめに

VR とは、“Virtual Reality”（人工現実感）の略語で『みかけや形は現実そのものではないが、本質的あるいは効果として現実であり現物であること』¹⁾を意味する。『仮想現実』と訳されることが多いが、みせかけの現実を想起させる表現は必ずしも適切ではない。また、視覚による情報量が他の感覚による情報量よりも卓越することから、VR=CG 映像を想起しがちである。しかし、日常生活では遭遇する機会の少ない体験、例えば火災を再現する上では、火煙からの熱、におい、燃焼部材がはぜる音などが重要であり、聴覚・触覚・臭覚等、人間の五感すべてに働きかける再現が現実感を得るために不可欠となる。

VR 技術は、航空機のパイロット用操縦シミュレータとして用いられてきた。体験そのものに危険が伴い、現実すること自体が不可能なテロ対策や戦闘訓練にも応用され、軍事用に開発された VR 技術が冷戦終了以降、民生用に転用され、工学や医学分野で普及することとなった。近年は、実物を構築するのに時間や経費がかかる自動車や建物等の設計ツールとしての利用も普及してきている。

本稿では、VR 技術の火災分野への適応を念頭に、独立行政法人消防研究所（現総務省消防庁消防研究センター）と共同で開発を進めた、火災体験シミュレータ“fire cube”（商標登録第4723831号、以下 fire cube）を紹介する。



図1 簡易版システムの体験状況

§2. 火災体験シミュレータの開発

本研究では、単年度毎に開発目標を設定し、段階的に開発を進めた。研究当初は体験空間の構築に主眼を置き、次にインタラクティブ性の付加並びに向上を目指し、最終年度は被験者実験への適用を試行した。

2.1 簡易版システムの開発²⁾

研究初年度は、既往の火災シミュレーションや実験結果に基づく煙の降下状況などが視覚的に確認できる walkthrough 型 VR モデルの作成を目指した。次節に示す全身体感型シミュレータへ拡張するための原型として、試験的な開発を行った。主たる仕様を以下に示す。

- ・CPU:Xeon1.4GHz プロセッサ, Intel860 チップセット
- ・映像提示装置:ヘッドマウントディスプレイ(以下HMD)
- ・位置情報の入力手段:ゲームパッド
- ・VRソフトウェア:商用レベル(VRに関わる専門知識があまりなくてもプログラムが作成・変更ができること)

高速グラフィックカードを除き、ハードウェアは一般的な仕様のものを利用した。映像コンテンツとして、開発期間中に発生した歌舞伎町明星 56 ビル火災を取り上げ、簡易版の映像型 VR モデルを作りこんだ。図1は、当該ビルの模型を作成して実施した実験結果をもとに、煙の動きを VR で表示した事例である。ヘッドマウントディスプレイを装着することにより、屋内の立体的な煙拡散状況を、歩き廻りながら擬似体験できる。煙の急速な降下や空間の大きさを、従来想定されていなかった在館者の視点から体験できる可能性が示された点が特徴と言える。

2.2 体験版システムの開発

簡易版システムでは、映像情報の提供にとどまっており、火災を実感するという点では現実に遠く及ばない点が課題であった。火災に対する教育・啓蒙や消防隊員等の訓練に VR 技術を用いる上で、火災現象の特徴である熱や音等、視覚以外の感覚による情報も重要と考えられた。火災と全く同じ熱環境や煙の状態を再現することは、体



図2 fire cube の概要



図3 体験版システムの体験状況

験者に危険が伴うため不可能である。しかしながら体験者に危険が及ばない範囲で熱環境や煙の要素を付加して現実味を向上させることは有意義である。fire cubeは、室前面にVRの大画面投影ができる他、室内の温湿度や煙の充満・排出が調整できる火災シミュレータシステムとして開発を進めた。全体の概要を図2に、体験の状況を図3に示す。主要要素技術を紹介する。

(1) 映像装置

コンピュータが出力する映像を、立体視可能なVR画像として投影する装置。プロジェクタとスクリーンで構成。

・**プロジェクタ**: 解像度 XGA, DLP 方式の反射型プロジェクタ。輝度 2000ANSI ルーメン。円偏光方式による立体視映像が投影可能。(シャットリング方式にも対応)

・**スクリーン**: 150 インチ、ハードタイプの拡散型スクリーン。プロジェクタ映像を背面投影投射式で投影。

(2) 設備機器

本システムは、空調、加湿、照明、煙発生、給排気、自然排煙、熱放射、音響等の各種設備機器および各種設備機器を制御するコントローラを備えており、次の事柄の調整が可能である(図4参照)。

・**煙発生装置**: 体験室を 30 秒以内に、劇場用の無害な煙で充満させる。

・**給排気, 自然排煙**: 給気量と排気量をバランスさせて制御する。煙発生装置で発生させた煙を、供給量を任意に制御しながら体験スペースに供給できる。また供給された煙は、排出量を任意に制御しながら排気できる。

・**熱放射**: ヒーター制御により、体験者は火災による温度上昇の放射熱を感じられる。

・**音響**: コンテンツに応じた音響を再現する。別途コンテンツを作成することにより3次元音響にも対応する。

・**設備機器用コントローラ**(PLC: Programmable Logic Controller 通称シーケンサとも呼ぶ): 給排気・空調設備機器を統合的に制御できる。

(3) 本体制御ファームウェアシステムの基本構成

体験版システムを動作させるためには、簡易版で稼動しているVR用CG描画ソフトウェアに加え、①各種空調設備機器の制御②火災性状の予測および相互の関連付け、を統括することが必要となる。関連するすべての作業を一つのコンピュータやプログラムで制御する場合、コンピュータに負荷がかかりすぎる。描画速度が低下するばかりでなく、プログラムも大きく複雑化し、軽微なシステム変更も困難になる。そのため、システム構築にあたり、全体を統合制御するコンピュータとCG用コンピュータを各々独立させ、協調的に動作させるシステムとした。動作は、制御パソコン内にあるコアプログラムで統括されている。コアプログラムは、擬似体験プログラム実行中の関連諸室の



図4 fire cubeの構成要素

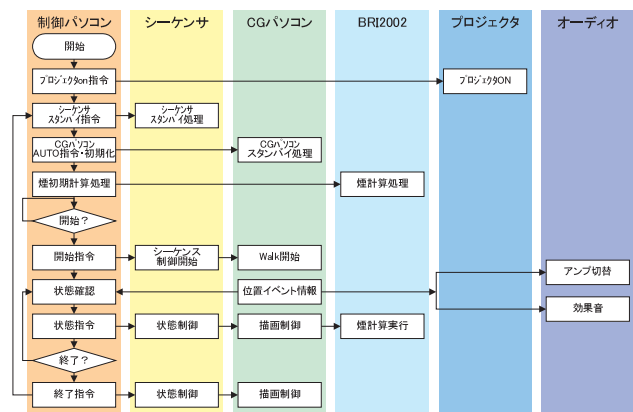


図5 fire cubeの制御フロー³⁾

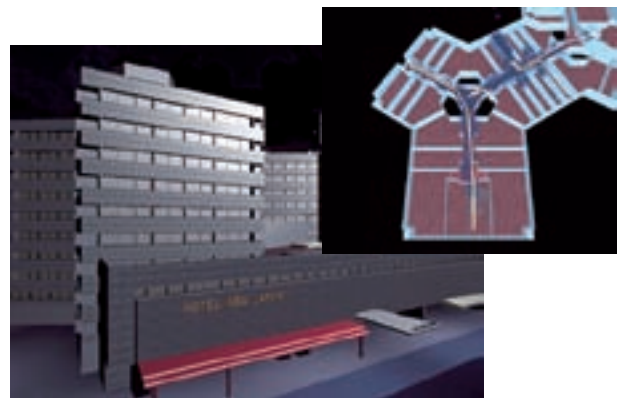


図6 体験版用コンテンツ(ホテル火災モデル)

温熱状態、設備機器を制御する役割を担う他、映像プロジェクタや体験室照明の電源 ON/OFF などを行う。一方CG用PCはVR画像の表示が主体である。全体の制御フローと各々のPCの役割を図5に示す。

(4) 体験版の映像コンテンツ

開発初期の段階では、CGと室内への煙充満等、各種設備機器の連動制御を可能とすることを目的に建物火災のモデルを作成した。VRのプラットフォーム(プログラム)としては、商用コードのオメガスペース⁴⁾を採用し、昭和57年のホテルニュージャパン火災を取上げた(図6参照)。その理由は、本火災が我国の火災史上に残る大惨事で

あったこと、および建物平面が複雑で避難に困難をきたしたと考えられており、在館者の視点で火災を再認識することが今後の避難対策に参考となると考えられたためである。モデル作成にあたっては、各種資料⁵⁾をもとに当時起きたであろうと推定されるシナリオを予め作成し、宿泊者の視点から火災の初期状況を疑似体験できる内容を再現した。火煙の挙動は、予め定めた火源に対してゾーンモデル(BRI2002)を用いてシミュレーションし、その結果を基に VR で描画した。このモデルは、一定のシナリオに沿って視点移動が行われるタイプのコンテンツで、見た目には映画をみているのと変わらない。しかしながら、空間モデルは3次元データ構造をもっている。後述するインタラクティブ制御への拡張を経て、一般の PC で見られるように開発した CD 版⁶⁾では、建物内を自由に視点移動が可能となっている。

2.3 インタラクティブ制御に拡張

ホテル火災の事例では、予め定められたシナリオに沿って視点移動が行われるため、体験者に行動選択の余地はなかった。火災を疑似体験する上では、現象と行動の相互依存性(インタラクティブ性)も重要になる。例えば火災室と廊下の間の扉を開けた場合と閉めた場合では火災の成長も廊下への煙の流出状況も異なったものとなる。こうした時々刻々の状況変化にも対応できるシステムへの拡張を継続して実施した。体験者自らが自由に任意の移動が可能で、かつ移動に伴って生じる扉開閉等の影響が火煙の挙動にインタラクティブに反映されるシステムへの改良を目指した。インタラクティブモデルの技術的検討対象として、図 7 に示すような一般的な事務所ビルの火災モデルを作成した。VR のプラットフォームとしては、一般的に入手が容易な OpenGL・Performer⁷⁾を用いた。本事例では、図 8 中のゾーン1の事務室で火災が発生し隣室の在館者(体験者)が避難する場合を想定している。こうしたインタラクティブな機能を付加する上で幾つかの技術的な課題が明らかとなった。重要な点は、システム運転時の各イベント発生時直後に、描画、音響、煙計算、空調設備制御等の CPU 負荷が短期的に集中するため、PC の能力や OS によっては、計算遅れ、データ欠落等の不具合が生じることである。このため、扉の前に立った場合には、次の部屋に入った場合を想定して、煙制御のモードを次の部屋の状況に対応できるように準備しておくなど、プログラムを改造する必要が生じた。

コアプログラムには、疑似体験プログラム実行中に体験者の状態(位置・歩行速度等)、扉開閉のイベント状態を管理し、設備機器を制御する役割を追加した。CG 用 PC は、ゲームパッド(市販のゲーム機用をキー割付変更し転



図 7 インタラクティブ制御検証用コンテンツ

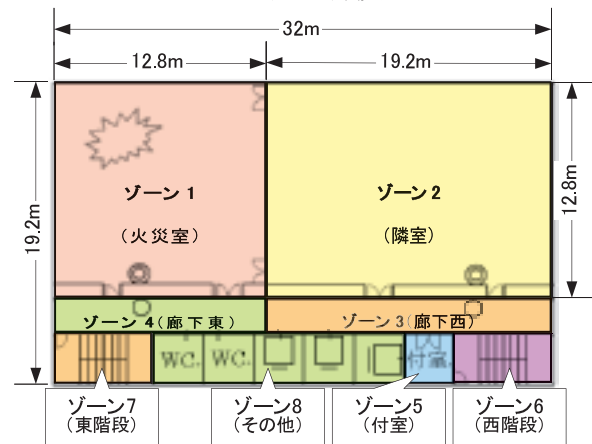


図 8 事務所ビル平面図

表 1 モデル構築時の技術課題と対応³⁾

技術的課題	対応
1) 扉開閉時等イベント発生時に対象の扉を特定	扉、排煙機機動釦の周囲にイベント発生ゾーンを設定し、その範囲内でのみ当該イベント(扉開閉等)が可能のように設定。
2) イベント発生時の煙予測再計算	イベント発生時に新しい開口条件を入力データとして再計算。計算所要時間は、1秒間隔、4分程度の予測で1~2秒
3) 種々の煙、熱状況を再現するためのシーケンス制御	・煙高さ計算結果の変化量より制御パターン(9パターン:煙排出~煙量噴出(多))を選択。 ・室移動及び再計算後は即時に、その他は5~10秒毎に新たな制御パターンを設定。 ・火災と在館者位置が一定距離の場合における放射パネルの ONN/OFF 制御。

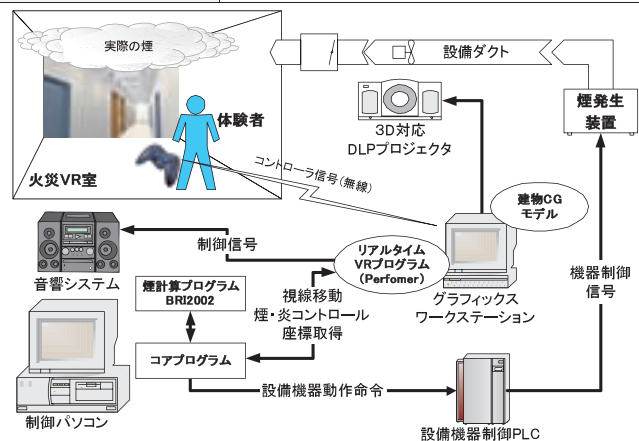


図 9 fire cube システム構成概要

用)の操作内容を描画に反映させる機能を追加した。独立に稼動しているコンピュータ同士を相互に協調的に動作させるため、データ通信方式を LAN により制御するシステムに改良した。インタラクティブモデル構築時の課題と当面行った対応をまとめて表 1 に、改良後の fire cube システム構成概要を図 9 に示す。

さらに、煙の供給にも即時性が要求されるため、蓄煙チャンバーや加熱ヒーターの追加など、ハード面の改良を実施した。

2.4 fire cube を用いた被験者実験の試行

開発段階において、VR 技術を用いた防火教育や訓練としての多種多様な応用の可能性があることは既に判っていたが、それ以外にも、従来、容易にはできなかった安全研究への適用可能性が多々あることも感じられた。例えば火災状況下における避難者の視点からの避難安全に関わる行動や心理面の研究もその一つである。従来行われてきた、煙の充満した廊下に被験者を暴露させ生理・心理的な面から避難行動への影響を調べるといった類の実験⁸⁾は、直接的に避難安全に関わる貴重なデータが得られる。一方、昨今の安全衛生面に対する社会規範上、今後の実施は困難になることが予想される。また、実験室における実験では、条件が非常に限られたものとなり、地下街等の広大な空間に煙を充満させ、非常時に人間がどのような避難行動をとるのか、どうすれば避難しやすくなるのか？といった実験を行うことは難しい状況にある。これらの実施困難な環境下での人間行動の研究を行う上で、開発した fire cube が有効に活用できるのではないかと考えられた。VR 技術の応用研究として、避難誘導灯の有無や音声誘導による避難行動の変化等に関する誘導効果の評価手法の検討を試みた。

地下鉄車両火災が起きた韓国大邱市中央路駅の再現空間を作成(図 10 参照)⁹⁾し、火災発生時の煙が広がっていく状況の下で、照明の有無や誘導灯の位置の変化による避難行動への影響について fire cube 内で実験を実施している。このような VR を用いた仮想空間内の実験が実空間での実行動とどのような対応関係にあるのかを検討することは、今後 VR による避難行動研究を行う上では不可欠である。このコンテンツでは、開発の過程において、煙の伝播状況を科学的に再現するために、CFD(数値流体力学を用いたシミュレーション)の計算結果¹⁰⁾を取り込む試みを行っている。計算時間が膨大となるため、人間行動とのインタラクティブ性を確保することは現時点では不可能である。予め定められた条件での計算結果を VR 上で表示することとした。煙の表示は一見簡単にみえるが、避難に影響を及ぼす光学的な要素を取り入れるの



図 10 被験者実験に用いた地下鉄モデル



図 11 室内の音圧分布(従来型スピーカ, 2KHz)

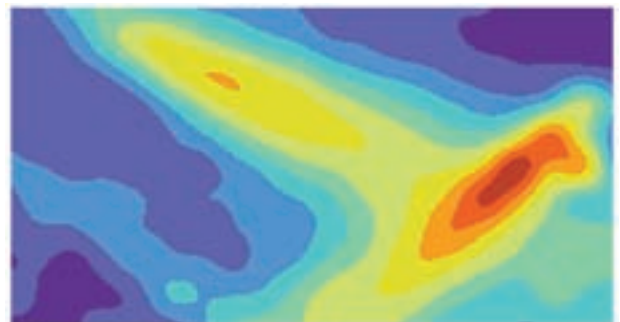


図 12 室内の音圧分布(指向性スピーカ, 2KHz)

は大きな技術的な課題である。煙を通してものを見る場合、視点と対象物の距離にわたって減光率の積分が必要となる。結果として、遠いものほど見えにくく、近いものは見え易く表現される。基本的なアルゴリズムは完成を見たが、視点を移動させた場合、計算負荷がかかり表示が追いつかないため、改良を加える必要がある。

また、実空間における避難行動と VR 空間における避難行動の対応関係を把握するため、災害の発生等により照明が遮断された室内空間を想定し、音声誘導の可能性を検証する被験者実験¹¹⁻¹³⁾を実施した。この実験では指向性の異なるスピーカを用いることにより、実空間において室内の音圧分布が異なる状況を作り出した。図 11 は従来の拡散型スピーカによる音圧分布であり、スピーカ近傍を除き、一様に近い分布が得られている。図 12 は指向性の極めて鋭いパラメトリックスピーカを用いた場合の測定結果である。音圧の高い部分がスピーカ正面に直線状に生じることや、壁面による反射の影響が読み取れる。

fire cube 内に、視覚情報と音圧分布が実空間と同様に变化する空間を再現し、被験者の避難行動、アンケート調査結果を基に、検証を加えたところ、避難に要する時間などの絶対値は若干異なるが、避難すべき非常口への到達傾向など、定性的には同様の結果が得られた。実験条件次第では、実空間における実験に代わる手法として適用できる可能性が確認された。なお詳細な実験結果については、現在分析を進めている段階であり、別の機会に報告する。

§4. まとめ

2001 年度から始めた VR 技術を利用した火災体験シミュレータ装置の開発も、被験者実験に適用できるまでになり、僅かながらも実態を得るに至った。単年度毎に目標を定め、段階的な拡張を図って来たが、VR 技術が多岐にわたる総合的技術であることから、むしろ大きな失敗もなく、洗練を重ねられたのではないかと考えている。様々な分野への適応可能性を有する技術であることから、適用にあたっては、事例ごとに新たな克服すべき技術的課題が生じてくることと思われる。リアリティーを確保する上で重要な当面の検討課題として、負荷の分散、推論的なプログラムの必要性、人物の表情や動き、煙の表現、制御効率化のためのソフト改良、などが上げられる。

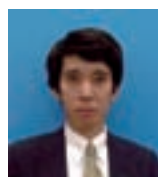
IT 進展のスピードは速く、一昨日不可能であったことが、新製品によって克服されてしまう怖さがある。負荷分散のために苦労して組上げたアルゴリズムが、マシンパワーの飛躍などにより、力技で処理されてしまう状況も起こりうる。陳腐化させない努力を続けることも必要である。また、危険を伴うなどの理由により実施が難しい被験者実験などに活用し、データの収集を図ると同時に、実験結果をフィードバックし、更なる改善を続けて行きたいと考えている。

謝 辞 本研究に貴重なご意見をいただいた東京大学石井威望名誉教授、東京大学廣瀬通孝教授、早稲田大学神忠久客員教授に深謝いたします。明治大学大学院高清水信之氏には、実験結果をまとめる際に御協力頂きました。共同研究先である独立行政法人消防研究所(現総務省消防庁消防研究センター)をはじめ、被験者実験に御協力頂いた実験被験者各位、ならびに本研究を支えて頂いた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 舘障 監修,「バーチャルリアリティの基礎 1 人工現実感の基礎」, 培風館(2000)
- 2) 山田常圭他,「VR 技術を用いた火災の擬似体験」, 第 50 回全国消防技術者会議資料(2002)
- 3) 山田常圭他,「全身体感型火災シミュレータ(fire cube)の開発」, 第 52 回全国消防技術者会議資料(2004)
- 4) 河合隆史著,「バーチャルリアリティー入門:次世代メディアクリエイター入門 2」, カットシステム(2004)
- 5) 日本火災学会,「ホテル・ニュージャパンの火災について」, 火災, vol.32, No.3, pp.22-34(1982)
- 6) 消防研究所作成「fire cube CD」(2005.3)
- 7) web サイト <http://www.sgi.co.jp/visualization/performer/> で download 可能
- 8) T.JIN et.al.,“Experimental Study on Human Emotional Instability in Smoke filled Corridor”, Journal of Fire Science, vol.8,pp.124-134(1990)
- 9) Abe Nobuyuki et.al.,“Development of Interactive Fire Simulator by using Walkthrough Virtual Reality Model”, the 8th International Symposium on Fire Safety Science, poster session(2005.9)
- 10) 阿部伸之他,「CFDによる地下鉄火災時の駅構内における熱気流の数値シミュレーション」, 日本建築学会大会(東海)学術講演梗概集, pp.43-44.(2003)
- 11) 阿部伸之他,「実空間及び VR 空間における音声を用いた避難誘導実験 その 1 実空間での指向性スピーカ及び従来型スピーカの誘導特性」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.490-493(2006)
- 12) 山田常圭他,「実空間及び VR 空間における音声を用いた避難誘導実験 その 2 VR空間での誘導効果」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.494-497(2006)
- 13) 須賀昌昭他,「指向性の異なるスピーカを用いた音声による室内誘導実験」, 日本音響学会 2006 年秋季研究発表会講演論文集, pp.781-782(2006)
- 14) 山田常圭他,「VR 技術を用いた火災体験シミュレータの開発」消防研究所報告 第 100 号, pp.280-290(2006)

ひとこと



須賀 昌昭

研究者としては、プロトタイプの実現に満足感を覚え、企業人としては、さらに洗練した実働施設“fire cube 2”の実現を夢見ている。