

バーチャルリアリティの 避難行動シミュレータへの応用

目黒公郎¹・芳賀保則²・山崎文雄¹・片山恒雄³

¹正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)

²正会員 工修 (株)東京ガス (元東京大学大学院生 〒106 東京都港区六本木7-22-1)

³正会員 Ph. D. 科学技術庁 防災科学技術研究所 所長 (〒305 茨城県つくば市天王台3-1)

本報では、避難行動の新しい解析手法として、バーチャルリアリティ(VR)を応用した解析システムを開発し、これを用いた避難行動解析を行った。すなわち、同じ構造を持つ実際の迷路とVR迷路を用いた避難行動実験を行い、両者の結果を比較・検討することにより、VRによる疑似避難体験が実際の避難行動において訓練効果として現われること、VRを用いて避難時の行動特性を再現し得ることを確認した。

避難訓練のマンネリ化による参加者の減少と意識の低下、危険性のある訓練の実施が難しいことなどを考えると、防災教育や避難訓練等へのVRの利用価値は高い。さらに、実際に建設する前の計画や設計段階で、対象となる施設や構造物の安全性を評価できるなどの点で、VR避難解析システムは大きな可能性を持つ。

Key Words: virtual reality, evacuation, human behavior, maze experiment, education of disaster prevention, disaster-fighting drill

1. はじめに

安全な都市空間や構造物をつくるには、構造強度的な安全性はもちろん、日常的にも災害時にも、そこに住んだりその施設を利用する「ひと」の安全性が確保されなくてはならない。阪神・淡路大震災では、崩壊した膨大な数の構造物被害に隠れてそれほど目立たなかったが、被災した屋内から屋外までの避難や避難所までの避難が非常に困難であったという声を多く聞いた。この地震は大多数の人々が自宅に居る早朝に発生したために、不特定多数の人間が出入りする大規模施設等での避難の問題は顕在化しなかった。しかし地震が、朝夕のラッシュ時、劇場やデパートなどが多くの人々で込み合う時間帯に発生していれば、この問題が格段に重要となったであろうことは自明である。このような「ひと」の安全性を検討するには、人間の行動を適切に把握することが不可欠になるが、その分析はなかなか厄介であり、一筋縄ではいかない。

従来この種の人間行動の研究は、大きく分類すると「過去の災害事例調査^{2,3)}など」「被験者実験^{4,5)}など」「コンピュータシミュレーション^{6,7,10)}など」の3つの手法を用いて行われてきた。「過去の災害事例の調査」では、得られるデータが実際の災害時のデータである点が他の2つの手法と決定的に違う重要な点である。しかしデータ数が少ないこと、防災上重要となる死者の行動が基本的に不明であるなどの点

で、十分な分析が行えない場合が多い。「被験者実験」については、被験者の安全性の問題から、災害時の環境を再現することが難しく、災害時の緊迫した状況下での実験データの収集は困難である。また、大規模な都市空間や構造物全体を対象とするような実験は実施困難である。「コンピュータシミュレーション」は、電算機の性能の向上を背景としてその可能性を高めてきているが、従来の手法ではモデルやパラメータが多くの変数に基づくこと、個人特性や避難空間の細かな情報を考慮することができない、などの問題をそれぞれ抱えている。

このような状況下で、「より適切に人間行動を分析するにはどうすれば良いのか?」最近数年間、著者らは実験的・解析的な研究を進めながら、それぞれの手法の欠点を補い合って、長所をうまく組み合わせたような分析法はないものかと考えてきた。決して最終的な結論に至っていないわけではないが、現時点で最良と考えている分析法は、最終的にはコンピュータを使ったシミュレーションである。もちろんそのモデルは、避難者の個人特性を細かくモデル化できなくてはならないし、避難環境も同様に細かく表現できるものでないといけない。この時、個人特性や環境をモデル化するためのパラメータは、現実をうまく反映できる手法を用いた被験者実験から得る。そして実際の過去の災害事例データを用いてキャリブレーションを行う。このようにして決定した人間と空間のモデルを用いたコンピュータシ

ミュレーションがいいと考えている。

最近、3次元コンピュータグラフィクス(CG)、インタラクティブ・マン・マシン・インターフェイス、テレプレゼンスなどの技術の進歩によって、「人工的に作り出した仮想的な世界をあたかも目の前にある現実の世界のように感じさせる」バーチャルリアリティ(VR)の技術^{11), 12)}などへの関心が高まっている。本報で紹介する避難行動の新しいシミュレーション法も、このVR技術を応用したものである。これは避難行動解析の主たる手法である「被験者実験」と「コンピュータシミュレーション」を有機的に組み合わせ合わせたものであり、両者の欠点を補う手法となり得る。すなわち、災害時の個人特性をうまく取り出すための手段としての可能性と、防災教育や避難訓練などへの高い適用性を有している。この種の研究が進み、将来的に避難解析上必要な様々なパラメータが決定されれば、多数の避難者を容易に取り扱え、しかも1人1人の個人特性と避難環境を細かくモデル化できる手法¹³⁾を用いることで、解析対象空間の「ひと」の行動を考慮した安全性が議論できるようになると期待される。

2. 避難行動解析への バーチャルリアリティ(VR)の応用

筆者らは、最近数年間にわたり、災害時における人間の避難行動について、実験的・解析的な手法を併せて研究を行ってきた^{13), 19)}。その中の1つに避難行動解析へのVRの応用に関する研究^{17), 19)}がある。これまでにVRを用いた避難行動シミュレータを開発し、VR技術を応用した閉空間からの避難行動解析の可能性を確認している。本報では図-1に示すフローにした

がって、実際の迷路を用いた実験(実迷路実験)と同じ構造を持つVR迷路を用いたシミュレーション(VR迷路実験)を行い、両者の比較からVR空間での避難行動の再現性の確認と、VRシミュレーションの訓練効果を評価する。そしてそれらの結果から、閉空間からの避難行動特性を分析する。

本研究で用いたVRシステムの構成を図-2に示す。DOS/V互換パソコン(Gate way 2000, CPU: ペンティアム90MHz, メインメモリ: 32MB, ハードディスク: 1GB)に画像処理ボードを組み込んだハードシステム上に、VR開発用ツールとして、W.インダストリー社のWorld Tool Kit (WTK)²⁰⁾を用いてシミュレータのシステムを構築した。WTKは約400ほどの関数から構成されるC言語のライブラリであり、これらの中から目的に応じて適当な関数を選択・組合せ、C言語を用いてプログラミングした。仮想空間を構成する迷路

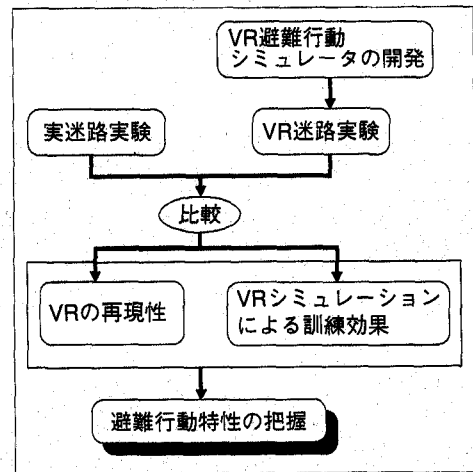


図-1 本研究の流れ

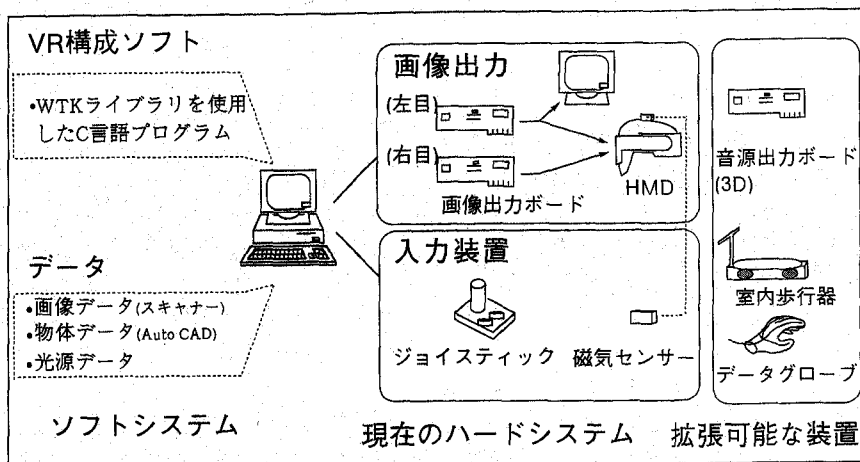


図-2 VRシステムの構成

内の壁やドア等は、Auto CAD²⁾を用いて作成し、スキャナーで取り込んだ写真画像を貼り付けるなどして現実感を高める工夫もした。VR実験時に用いる画像の入出力装置には、それぞれヘッド・マウント・ディスプレイ(HMD)とジョイスティック、頭の動きを計測する磁気センサーを用いている。HMDは両目の画像に視角差を与えることで被験者に立体的に見える映像を提供する装置である。今回用いたHMDは1.3インチの2枚のAM-LCDタイプ液晶パネル(解像度742×230の17万画素、24ビットフルカラー1677万色対応)から構成されるシステムである。HMDに取り付けた磁気センサーによって計測された頭の動きから画像の座標変換や陰面処理などを行い、被験者の頭の動きに合わせた映像をHMD上に映し出す(図-3)。なお本システムでは、複数人(ただし操作は1人)で仮想空間を見ることもできるようにした。すなわち、HMDを付けた被験者の見ている映像を偏光板を通した2台のプロジェクターに分配して送り、これを映し出した大型スクリーン上の映像を偏光めがねを用いて見ることで、3次元映像を体験するシステムである。ただし今回の実験では、HMDを着用した被験者にのみ映像を提供するシステムとした。

ところで、ここで紹介したシステムは、研究の第1ステップとして構築したものであり、健常者が避難行動をとる上で最も影響が大きいと考えられる視覚の再現をまず試みたものである。もちろん実際の避難行動では、聴覚・触覚・嗅覚なども重要であるし、より詳細な避難行動解析においてはこれらの感覚も考慮しなくては行けない。視覚以外のこれらの感覚については、今後拡張していく予定である。

3. 避難シミュレータ作成時の工夫

本研究では、VR空間に東京消防庁池袋防災館にある煙体験コーナーの迷路を再現し、VR迷路内からの脱出行動をシミュレーションするシステムを作成した。以下に、プログラミング・各種パラメータの設定・物体作成などで工夫した点をまとめる。

(1) 接触判定とドアの開閉

VR空間内で、床や天井、壁や避難誘導灯など、独立した動きをしない物体をユニバースと呼ぶ。一方、施錠されてないドアや被験者など、VR空間内で動く物体をオブジェクトと呼ぶ。

被験者が壁や施錠されたドアを通り抜けられないようにしたり、施錠されてないドアの開閉を行ったりするために、被験者和其他の物体との接触判定が必要となる。被験者を表わすオブジェクトと壁などのユニ

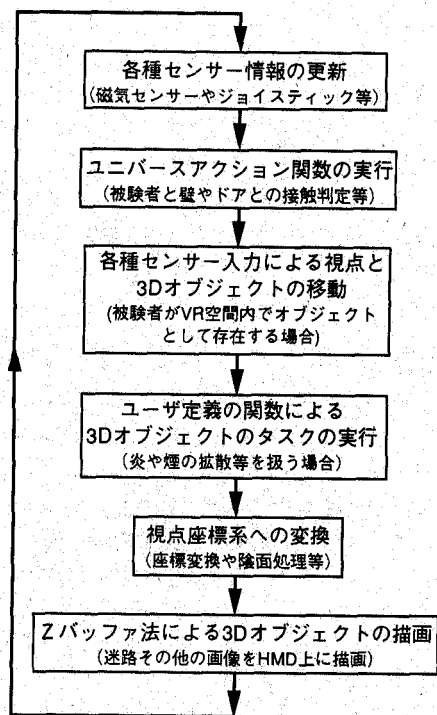


図-3 VRシステムにおける画像処理の流れ

バースとが接触した時に、視点の向きはそのままに、位置を1つ前の画像(フレーム)に戻す。またこの時、接触していることを被験者に認識してもらうために、一瞬画像全体を明るくするようにした。

施錠されていないドアについては、ドアのオブジェクトと被験者のオブジェクトが接触した時にドアを約90度回転させ、設定した時間が経過すると自動的に閉じるようにした。また自分で開けたドアは通り抜けられるようにした。理由は引いて開けるドアの場合に、開いてきたドアに体が接触するので、体を避けないと、ドアの開閉や通り抜けができないためである。とくに、袋小路のように身を避ける場所がない場合、被験者はドアと壁の間に挟まれて身動きがとれなくなる。このような不都合さを避けるための条件である。またドアの開閉する角度が90度になると、開いた後のドアがあたかも横の壁に存在する別のドアのように見えてしまうので、ドアの開閉角は最大でも85度とした。さらに迷路内のドアは、各々の大きさ、形状、回転軸、回転方向などが異なるため、各ドアの属性は別ファイルとして管理している。

(2) 歩行速度の設定

VR空間内のある位置から別のある位置まで移動する場合、被験者が目にするCG画像は、1秒間に数枚～

10数枚のペースで変わる。このCG画像を描き換える速度は、コンピュータの性能はもちろん、時々刻々変化する被験者の方向と進行速度をセンサーとジョイスティックを用いて計測する時間、迷路の形状の複雑さ(表示する画像が複雑なほど座標変換や陰面処理などの画像処理に時間がかかる)、接触判定に要する時間などにより変化する。この1秒間に何枚の画像を提供するかをフレームレートと呼ぶ。

VR空間での歩行速度は、「ジョイスティックの倒し加減×フレームレート×設定値」で表現される。本シミュレータでは、操作訓練を十分に受けた研究グループの1人が、実際の迷路の最短経路を普段(多少ゆっくりめ)の歩き方で脱出するのに要する時間と、シミュレータ上で避難するのに要する時間が一致するように設定している。このように設定した値を用いると、ジョイスティックを最大に倒して得られるVR空間内での最大歩行速度は、およそ1.2m/sとなった。ところで、この1.2m/sの速度は、一般の被験者のVRの操作能力を考えた場合、これ以上最大歩行速度を速くすると、壁等への衝突を繰り返してうまく避難できなくなる値でもある。なお、現実の歩行速度の調査から、後退と横歩きは、前進の半分程度の速度を想定した。

(3) 適切な画像を能率良く提供するための工夫

フレームレートがあまりに小さいと、画像が頭の動きに追いつかず、空間を認識する上で支障をきたす。フレームレートは表示するポリゴン(面)の数に強く依存するので、本研究では試行錯誤の上、面の数を減らす工夫をした。

今回対象とする迷路には、ノブの形状が違うなど、6種類合計26のドアがついている。種類の違うドアが迷路内に点在することが迷路内での道しるべとなり、被験者の避難行動に影響を及ぼすと考えられることから、VRシミュレータにおいてもこれらの違いを再現する必要がある。開発の初期段階では、ドアのノブを円柱状の多面体で作成した。しかしこの方法によると、ドアは見かけ上は非常にリアルになるが、小さいながらも面の数が多くなるので、座標変換や陰面処理などの画像処理に時間を要し、全体のフレームレートに影響を及ぼした。そこで実際の迷路を撮影した写真を画像処理したもの(テクスチャと言う)を直方体に貼りつけてドアを表現し、面の数を大幅に減らす工夫をした。ノブを含めたドア全体を平面として扱うので、視野の周辺部に像が移動した場合に多少形状がゆがむが、テクスチャを用いることでフレームレートが大きくなり、CG画像の動きがスムーズになった。ノブを多面体の集合として扱

う場合、1つのドアで約50面の平面要素を必要としたが、上記の方法では直方体の6面と2枚のテクスチャで済む。

同様に、被験者本人を表すオブジェクトも、当初は5本指の手と胴体、それに2本の足で表現したが、面の数が多くなってフレームレートに影響が出るため簡略化した。とくに被験者を表わすオブジェクトは常に接触判定にも用いるため、最小限の面からなる構成とした。

ここで説明したようなフレームレートに関する工夫は、基本的にはコンピュータの性能が良くなれば改善される課題であり、今度はさらに現実的なものに近づいていくと思われる。

本システムで用いたHMDを装着した時、視野角は片目で約60度(左右の目に視差を付けることで両目合わせて約67度)になる。よってVR画像が実際と同じ比率の画像として見えるように視野角を設定すると、限られた狭い範囲の映像しか見えないことになる。とくに再現する迷路の通路幅が今回のように狭い迷路構造物では、被験者が仮想空間で壁に向かって立った時、実際と同じ視野角では視野が極端に狭くなって、被験者の視界には壁しか映し出されないようなことが起こる。これではVR迷路を認識するのに、実際の迷路にいる場合に比べて著しい困難をともなうことになる。そこで、人間が通常正面を向いた場合に視野に入る範囲が、HMDをつけた場合の視野と一致するように、VR画像は片目110度に設定することにした。この時、視野角を広げると視界の周辺に画像のゆがみが生じ、距離感が実際と若干変わってしまうが、これは視野角が狭いことで生じる弊害よりも小さいことを、事前の調査で確認している。

(4) データの記録

被験者の避難行動特性を正確に把握するために、1フレームごとの被験者の避難行動を、時間(測定開始からの秒数:1変数)・位置(3変数)・視点方向(4変数)のデータとしてバイナリ形式で記録するシステムとした。これにより、被験者が、いつどこを見ながらどの経路を通ったかの行動を映像として再現することが可能となる。また被験者の歩行距離や歩行速度なども簡単に計算できる。

4. 実迷路とVR迷路による実験

迷路実験は、1994年12月19,20日と1995年1月9日の3日間で実施した。被験者の母集団特性を均質にするために、東京大学大学院修士課程(土木・建築系)の学生を中心とした男性36名に被験者になってもらっ

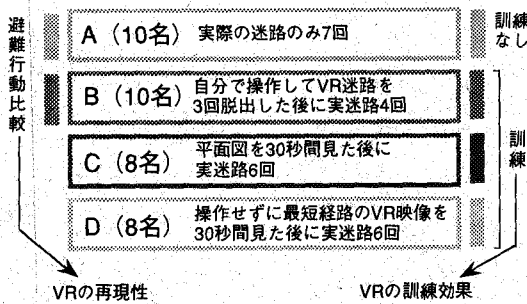


図-4 迷路実験の被験者グループ

た。東京消防庁池袋防災館にある煙体験コーナーの迷路を借用し、その傍らにVRシミュレーションシステムを設置した。

図-4に示すように被験者を4つのグループに分け、「事前に訓練を受けたか否か」「その訓練では何を用了か? 実迷路か、VR迷路か、平面図か」などの条件を変えながら、グループごとの脱出時間や脱出経路等を計測し、避難行動特性を比較した。すなわち、「事前の訓練を全く受けなくて実迷路実験を受けるAグループ(10人)」「自分で操作しながらVR迷路による避難シミュレーションを3回行った後に実迷路実験を受けるBグループ(10人)」「迷路の平面図を30秒間見た後に実迷路実験を受けるCグループ(8人)」「自分で操作しないで迷路の最短経路を30秒間で避難するVR画像を見た後に実迷路実験を受けるDグループ(8人)」に対して、事前訓練を含めて7回ずつの避難行動実験を実施した。実迷路に入る前には、迷路の入口と出口の位置を確認してもらい、「通路の中央を走ったりせずに普段通りの速度でゆっくりと避難するように」との注意をした。最終回(7回目)は、被験者が迷路に入ると同時に照明を全て消して実験を行った。ただし事前に被験者には、実験中に照明を消すことは一切伝えていない。

実験に用いた迷路の構造を図-5に、HMDに写し出される映像(ただし片目分)を図-6にそれぞれ示す。図-5に示す1~Mは最短経路から外れた小スペースである。迷路実験の様子を図-7に示す。VR実験では、被験者によってVRの操作能力に大きな差が生じる。そこで煙体験コーナーと同じ構造のVR迷路実験を行う前に、構造の簡単な2つの迷路を用意し、これらを用いたシミュレーションを繰り返し体験してもらい、VR操作法の修得と各被験者のVR迷路実験における学習能力の差を予め確認しておいた。

全ての実験が終了した後に、簡単なアンケートとインタビューを行い、実験に関する印象や感想を聞き、数値データだけでは理解しにくい心理状況などの把握に務めた。

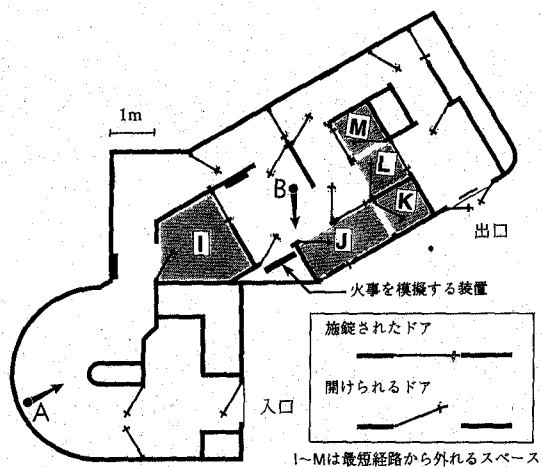
5. 実験結果と考察

以下に、実迷路実験とVR迷路を用いたシミュレーションの結果を、アンケートとインタビューによる回答を折り交ぜながら比較し、VRによる疑似体験の訓練効果と再現性、災害時の避難行動特性について考察する。

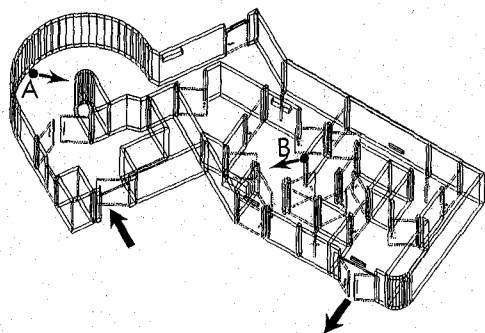
(1) 訓練の効果

図-8, 9は、各グループの脱出時間と脱出歩行速度の平均値を実験回数ごとにまとめたものである。両図からわかることは、実験を重ねることで、避難時間が短くなり、歩行速度が早まる傾向があること、また事前の訓練を全く受けなくて実迷路に入ったAグループに比べて、事前に何らかの形で迷路を体験したグループ(Aの2回目, B, C, Dの実迷路1回目)が、脱出時間においても歩行速度においても勝っている点である。平均脱出時間を見ると、Aグループの初回の平均脱出時間が88秒なのに対し、Aの2回目はもちろん、他のいずれものグループとも34~48秒早く迷路から脱出できている(図-10)。同様なことが、脱出経路長においても言え、Aグループの初回が41.8mであるのに対して、Aの2回目, B, C, Dの実迷路1回目が、それぞれ27.2m, 26.8m, 33.1m, 27.7mという結果が得られた。そこで、VRによる疑似体験が実際の避難行動において訓練効果として現れるかどうかを、グループごとの脱出時間を分布と仮定して検定を行った。その結果、経路学習なしで実迷路に入るより早く脱出できることが、片側5%の有意水準で示された。

図-8より、Bグループの実迷路による1回目の脱出時間が、Aグループの2回目と近いことから、ここで用いた程度の複雑さの迷路では、VR体験3回分の効果が実体験1回分に相当すると言える。またVR映像による最短経路を体験したDグループの平均脱出時間が、事前に平面図を見たCグループよりも良かったことから、VR映像による疑似体験が避難訓練において高い効果を示すことがわかる。当初最も高い学習効果が予想されたCグループの避難行動が、BやDグループ以下で、しかも分散値が大きかった理由は、実験後のアンケートとインタビューから、平面図から3次元的な空間をイメージする能力の個人差が大きいためと推察された。今回の実験の被験者母集団が、図学や製図等の教育を受けている土木・建築系の大学院生であることを考えると、平面図から空間をイメージする能力は一般の人々よりも優れていると思われる。この結果から、一般の人々を対象とする避難誘導においては、平面図を用いた経路表

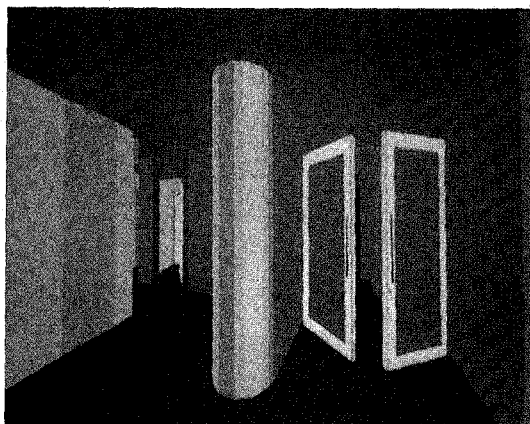


(a) 迷路の平面図

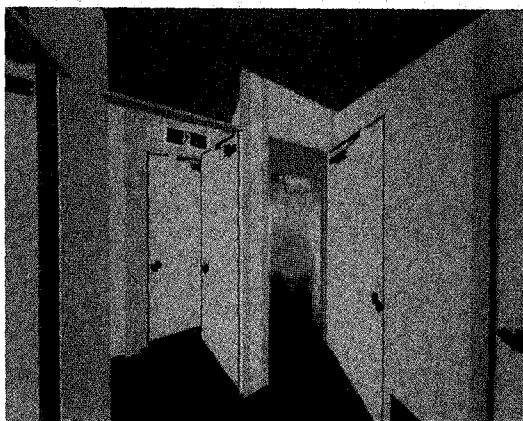


(b) 上方の視点から見た迷路の構造

図-5 実験に用いた迷路の構造

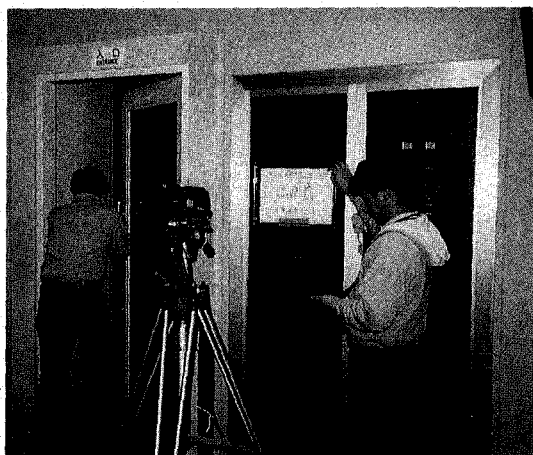


(a) A地点から見たVR映像

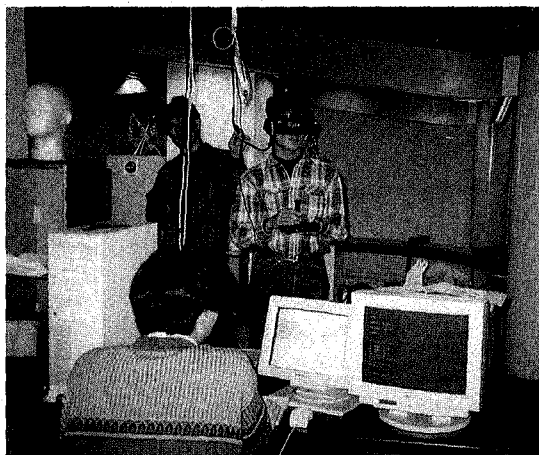


(b) B地点から見たVR映像
(右手に火事を模倣する装置が見える)

図-6 VRによる迷路内の映像



(a) 実迷路実験の様子



(b) VR迷路実験の様子

図-7 迷路実験の様子

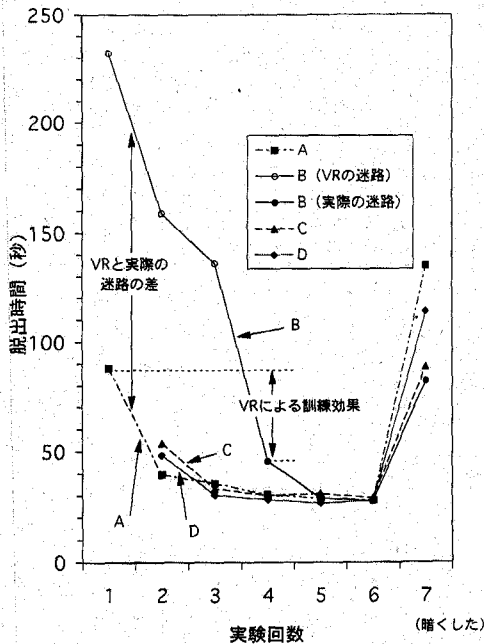


図-8 グループ別の平均脱出時間

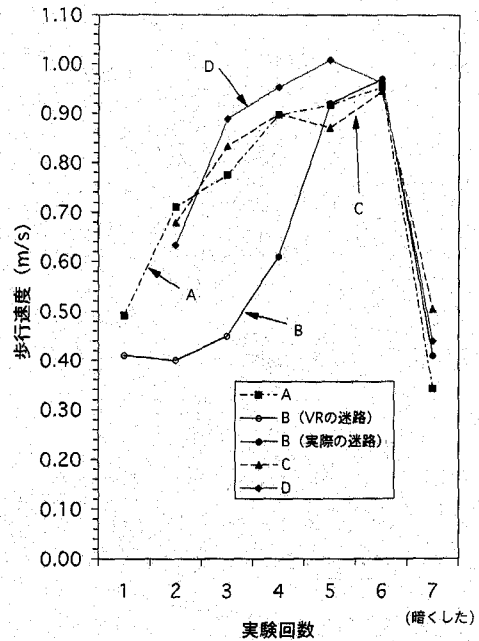


図-9 グループ別の平均歩行速度

示に加えて、動画による経路表示を行うことがより効果的であると考えられる。例えば、現状ではホテルの客室から避難口までの経路説明は、平面図を用いた経路表示が一般的である。しかしこの表示に加えて、TVモニターなどを用いて、その客室から避難口までの経路を、周辺の様子も含めて、空間的に広がりをもった動画によって誘導するようなシステムを採用することが有効と思われる。

(2) VRの再現性

VRの再現性を調べるために、迷路内の3箇所の分岐点で、実験の1回目にもどの経路を選択したかを調査した(図-11)。初めの分岐点では、方向的には右側が出口に近いにも関わらず、通路を直進する傾向が両者の実験で確認された。同様に残りの2つの分岐点でも、両者の実験ともに直進する傾向が認められた。これらのことから、定性的には人間の避難時における進行方向の選択傾向が、VRでも再現できることが確認できた。

次にAグループとBグループの脱出時間、脱出経路長、歩行速度の平均値を比較した。図-12によると、VR迷路実験では実迷路実験に比べて、脱出時間で2~3倍、歩行距離で1.5倍~2.5倍、歩行速度で0.7~0.8倍程度となっている。実験回数を重ねることによる脱出時間と歩行距離の減少傾向が実際と似ているのに比べて、迷路を脱出するまでの平均歩行速度は多少違う。1回目では両者の差は小さいが、2・3回目では

実迷路実験では歩行速度が高まるのに対して、VR迷路実験ではその率が低い。原因としては、「ジョイスティックで行う操作が実際に歩行するよりも難しく、被験者が十分に慣れていなかったこと」「今回のVR実験で採用した最大歩行速度が実際よりも遅いこと」「視野角と距離感の問題から、迷路が複雑になっている部分で被験者が出口への経路を見落とした可能性があること」などが考えられる。アンケートからも、「距離感がつかみにくい」「自分の歩行速度が認識しにくい」「方向感覚を失いがち」「操作方法が難しい」などの回答が得られている。

VRシミュレータでは、ジョイスティックとHMDの上に付けた磁気センサーで、身体の変りや前進後退などの操作を行っているが、距離感についての問題は、視野角の設定が主な原因である。3.3節でも述べたように、今回のVRシステムでは、通常視界に入る範囲の映像を、狭いHMDの視野角に凝縮して映し出すようにした。この時、視界周辺部の画像の変形を小さくするために、周囲の視野の縦横比をなるべく変えないようにしたことから、視界中央部分の画像が小さくなり、遠くにあると認識される結果となった。

また本VRシステムでは、スティックの傾け加減により歩行速度を変えられるように設定したが、通常のゲームなどではスティックの加減は必要ないことから、多くの被験者は適切な速度の加減を行わず、最大限に傾ける操作しか行っていないように見受

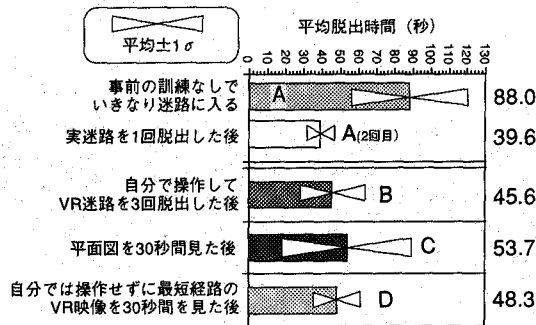
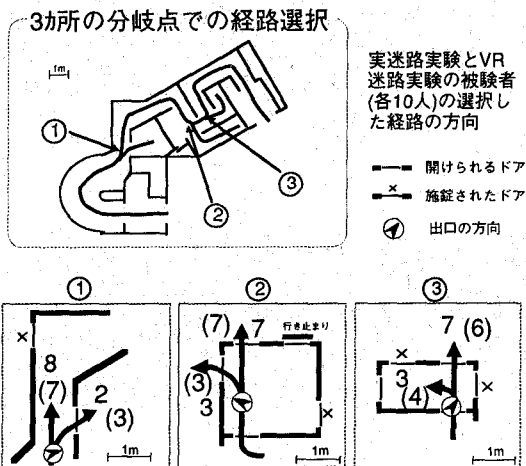


図-10 初めて実迷路に入った時の平均脱出時間



数値はそれぞれの経路を選択した被験者の数 ()内の数値がVR迷路実験による結果

図-11 経路選択における実迷路実験とVR迷路実験の比較

けられた。この点と上で述べた距離感の違いが、自分の歩行速度が判断しにくい原因になったと思われる。

一方、方向の変更については、ジョイスティックを用いるのではなく体を実際に回転させるので、方向感覚はかなり再現できると考えていた。しかし、実際はその場で体を回転させることと、実際の歩行で右や左に曲がることの違いが、一部の被験者の方向感覚を失わせることになったようだ。しかし実際には、迷路内の分岐点での経路選択特性が、図-11に見られるように、実迷路内でもVR迷路内でも同じであったことから、方向感覚については、VRの再現性はある程度高いものと考えられる。

被験者に疑似体験を伝える装置として、ジョイスティックとHMDだけしか用いていない現在のシミュレータには、上のような改善すべき課題があり、歩行動作を正確には再現できていない。より現実に近い歩行の再現が必要な場合には、実際に歩き、それ

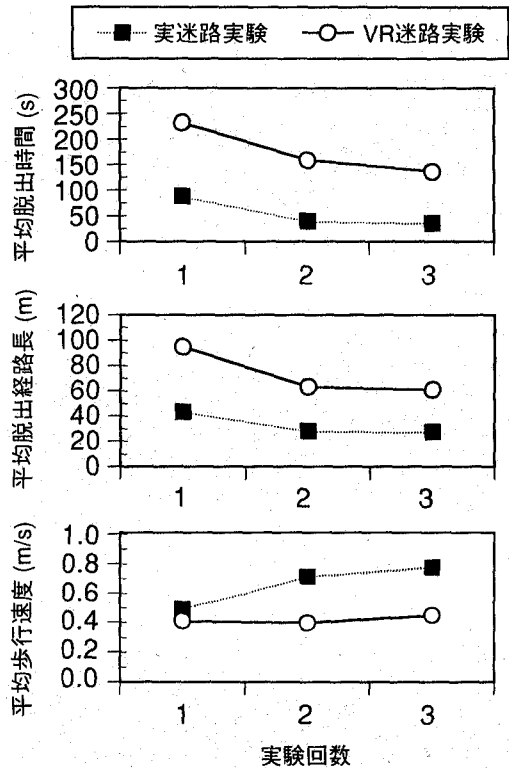


図-12 実迷路実験とVR迷路実験における脱出時間、脱出経路長、歩行速度の平均値の比較

を計測する装置の導入が必要である。また「VRは酔う」「ぐらぐらする」などの意見が出たが、これは被験者が、磁気センサーの認識許容位置からはずれると計測不能となることや、上から吊したコードがたるみ、頭に付けたセンサーに近づいて電磁誘導を起こし磁場を乱したことが原因と考えられる。

VR迷路と実迷路の見ための比較では、「見かけは驚くほど近い」「幾何学的配置は同じ」など、肯定的な回答を多く得た。これらの結果から、視覚的には現在のシステムで、再現が十分可能であると考えられる。

視覚以外の感覚については、「熱さ、痛さなどを感ぜられるか」といった意見があったが、これらは火災や煙などの災害を表現する際に必要となる感覚である。どの感覚に対しどの程度の情報を提示する必要があるのかは、状況に応じて検討しなければならない課題である。現在のシステムを用いる場合には、炎や煙の影響を音や視界の制限などで間接的に表現する手段が考えられる。

現在のシミュレータには、以上のように改善すべき様々な問題点がある。しかしその一方で、「経路

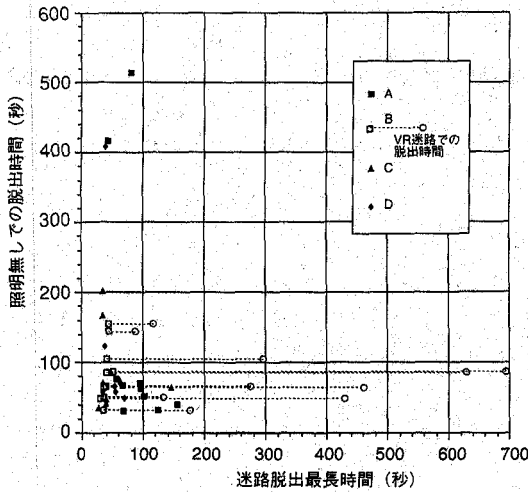


図-13 迷路脱出最長時間と照明なしでの脱出時間の関係

の選択特性」が実際と同じであること、実験回数が増すごとに迷路内部の構造を把握して、「脱出時間や歩行距離が短くなる」「歩行速度が大きくなる」といった基本的な傾向は再現されている。これらの結果から、VR空間で人間の避難行動の再現が可能であり、VRシステムを用いた都市空間や構造物の避難安全性の評価は十分意義があると言える。

(3) 災害時の避難行動

図-8や図-9を見ると、いずれのグループも事前訓練の結果、実験6回目には完全に最短経路を学習し、速やかに脱出行動ができていたにもかかわらず、照明がなくなると、途端にそれまでの数倍もの脱出時間を要してしまう結果が得られた。そこで図-13に示すように、横軸に6回目までの実験における各被験者の最長脱出時間をとり、照明無しでの脱出時間との関係をプロットしてみた。最長脱出時間とは、1回の実験で最も長く迷路内にいた時間である。図-14は、図-5aに示した最短経路から外れる5つの小スペース(1~M)の内、6回目までの実験で迷い込んだことのある小スペースの数(Nr=0~5)と照明無しでの脱出時間との関係を示したものである。最長脱出時間やNrが大きい被験者は、実迷路にしるVR迷路にしる、脱出経路を見つけるために迷路内をうろろろし、結果的に最短経路以外の部分も含めて迷路全体の構造を学習していたと思われ、これが照明が無い状態でも比較的速やかに脱出できた理由と考えられる。一方、これらの値の小さな被験者は、照明のある条件では速やかに避難行動をとっていた人たちであり、最短経路以外のルートに関しては十分認識

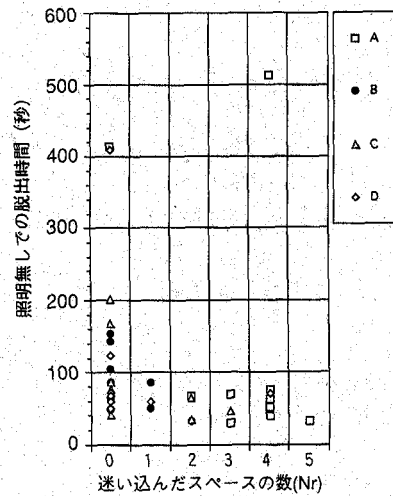


図-14 最短経路以外のスペースに迷い込んだ回数と照明なしでの脱出時間の関係

していなかったものと思われる。アンケート調査からも、後者の人たちが照明が消えたことで気が動転し、自分の位置や方向を見失って脱出に大変苦労したという回答を多く得ている。避難訓練の目的が災害軽減であることを考えると、脱出訓練において重要なのは訓練の回数ではなく、その内容であることがうかがえる。避難訓練が実施上の安全性の問題などから多くの制限を受けるのは当然である。しかしその制限の中で、災害時に考えなくてはならない状況や条件を適切に踏まえた訓練を、如何に行うかが重要であることをこの結果は示している。最短経路を覚えて避難するだけの訓練や、日常的に決まったルートだけを利用している地下鉄や地下街などで、何らかの災害があった場合などに、同様なことが起こり得ることを考えると、この結果の持つ意味は重要であると言えよう。

6. まとめと今後の課題

日常的にも災害時にも、そこに住んだりその施設を利用する「ひと」の安全性が確保されて初めて、その都市空間や構造物は安全であると言える。本報では、そのために不可欠な「ひと」の避難行動を解析するための手法として、バーチャルリアリティ(VR)を用いた避難行動シミュレータを開発し、その有用性や可能性について検討した。

同じ構造を持つ実迷路とVR迷路を用いた被験者による避難実験を行い、両者の結果を比較・検討することによって、VRシミュレーションによる疑似避難体験が、実際の避難行動において訓練効果として現

われることを確認した。また、歩行速度の設定や操作性に改善が必要だとはいえ、VRを用いて避難時の人間行動特性を再現できる可能性を示した。

災害そのものが常時には経験できないという当然の理由に加えて、災害がひとたび起こると、それに巻き込まれた人間の生命に関わることから、防災教育や避難訓練などへのVRの利用価値は高い。また避難行動のコンピュータシミュレーションにおいて必要となる避難時の個人特性をうまく取り出すための手段となり得る点を考えると、VRを用いて被験者実験することの意味は大きい。さらには実際に建設する前の計画や設計段階で、対象となる施設や構造物の避難安全性を評価する手法としてもVRが大きな可能性を持つことが認識された。

最後に、今回の実験やアンケートの結果を通して認識された課題と今後の進むべき研究の方向性をまとめておく。

視野角や歩行速度の設定、前進や後退などの歩行や曲がったりドアを開けたりする動作の操作性などは、よりリアルなシミュレータを構築するにはぜひとも改善しなくてはならない点である。技術的な問題から現状のHMDは実際の人間の視界に比べ視野角が狭く、特に今回のように狭い通路では、周囲の様子を十分認識できない。今回のVR実験では、視界周辺部の形状のゆがみを容認した上で、広い範囲の視界を狭いHMDのディスプレイ上に凝縮して映し出すことで、視野が狭いことを原因とする視覚情報の欠如を極力小さくする工夫をした。十分な視野角の映像をより現実に近い形で被験者に提供するには、プロジェクターを複数台組み合わせるとか、広い視野角の映像を表示できるHMDの開発を待たなくてはならない。歩行速度の設定やドアの開閉などをより現実的なものにするには、まずVRシステムの操作性の問題を解決しなくてはならない。今回は空間的・経済的な制約から、ジョイスティックの操作で歩行を模擬した。ドアの開閉についても、被験者のオブジェクトが施錠されていないドアと接触すると自然と開くシステムとした。アンケート結果に「距離感がつかみにくい」「自分の歩行速度が認識しにくい」などの意見があるように、より現実に近い歩行距離や歩行速度を得るには、実際に歩きそれを計測する室内歩行機のような装置をシステムに取り込む必要がある。ドアの開閉にはデータグローブ等の使用も検討しなくてはならない。

また2章でも述べたように、今回のシステムは研究の第1ステップとして構築したものであり、健常者が避難行動をとる上で最も影響が大きいと考えられる視覚の再現をまず試みている。もちろん実際の避難行動では、聴覚・触覚・嗅覚なども重要であるし、より詳

細な避難行動解析においてはこれらの感覚も考慮しなくてはいけない。避難誘導の声や音の影響、炎や煙による熱やにおいの影響を考慮したり、被験者の感覚器の性能や活動性を低下させることで怪我の影響を表現するなどの工夫も、今後検討すべき課題である。

また、今回のシステムは、閉空間内に被験者だけが存在する状況を対象とした避難シミュレーションシステムである。しかし実際の避難行動では、避難者が1人だけという状況はまれである。特に大規模な空間を対象とする場合、避難者は当然複数であり、同一空間に同時に何百・何千人という避難者が存在し、相互に影響し合うことになる。現在のVR技術では、研究の最先端的での話は別にして、現実的な問題としては、同時にVR空間内に独立して存在し、リアルタイムにインタラクションを持てるのはせいぜい数名～10名程度である。日進月歩のVR技術であるが、現実的な問題として、数百・何千人の避難者がVR空間に同時に存在し、相互に影響を受けながら行動するシステムの実現には、VR技術そのものの進歩もさることながら、電子計算機の格段の進歩が不可欠であり、今しばらくの時間が必要と思われる。このような状況下で、少しでも現実的な問題として、VRを用いて集団の中の個人の避難行動をシミュレーションするには、他の避難者の影響としては近傍の避難者に限って考えると、複数の避難者のグループを1つの単位として影響を考えるなどの工夫が不可欠であると思われる。

実験に関しては、サンプルの均質性と集めやすさから、今回の被験者は東京大学の工学系大学院生を中心とした男子学生(20～25才)に限った。彼らは土木や建築を専攻する学生で、空間認識力は一般の人よりかなり優れていると考えられる。またこの年齢層は、VRの操作を比較的容易に修得できる年齢である。一般の人々が、VR映像から空間的な位置や構造を認識したり、VRの操作を短時間でマスターすることは、今回ほどは簡単ではなからうし、特に老年の方ではなおさらである。広く一般の人々を対象とする防災訓練にVRを用いるには、年齢や性別によるVRの訓練効果の違いを調査していく必要がある。

今回の研究から、VRによる訓練効果が認められた大きな理由に、疑似的であるとは言え「体で覚える」ことの重要性が挙げられる。避難訓練のマネリ化や参加者の減少と意識の低下が問題になっている今日、通常の訓練よりも興味を持って参加してもらえるVR訓練は、これまでの訓練以上の効果を与える可能性もある。この時、実体験とVR体験の訓練効果の差を、学習時の能率や最終的に修得できる知識

の限界の違いなどから分析する必要がある。さらに両者の訓練による記憶の風化の差についても、今後調査していく必要がある。

謝辞：迷路実験に便宜をはかって下さった、東京消防庁の池袋防災館の関係者各位と被験者の皆さんに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 消防庁：阪神・淡路大震災の記録，ぎょうせい，1996。
- 2) 森田耕一：プレイトウンにいた53名の人たち(大阪千日デパート火災より)，火災，Vol. 23, No. 1, pp. 28-34, 1973。
- 3) 長田克俊：静岡駅前ゴールデン街ガス爆発について，火災，Vol. 30, No. 6, pp. 3-8, 1980。
- 4) 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 第1報 歩行経路の記憶，日本建築学会論文報告集，No. 322, pp. 157-161, 1982。
- 5) 舟橋國男：建物内通路における経路探索行動ならびに空間把握に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文報告集，No. 429, pp. 61-72, 1991。
- 6) 北後明彦：煙の中における人間の避難行動実験—避難経路選択および歩行速度に関する実験的研究—，日本建築学会計画系論文報告集，No. 353, pp. 32-38, 1985。
- 7) 戸川喜久二：避難群集流の計算について，建築雑誌，No. 4, pp. 15-19, 1954。
- 8) 日本建築センター：新・建築防災計画指針1985年版，1985。
- 9) 位寄和久：避難行動モデルに関する研究—火災状況の認識と心理状態を考慮したモデルの提案—，日本建築学会論文報告集，No. 325, pp. 125-132, 1983。
- 10) 岡崎基幸・松下聡：避難計算のための群集歩行シミュレーションモデルの研究とそれによる避難安全性の評価，日本建築学会計画系論文報告集，No. 436, pp. 49-58, 1992。
- 11) 館 睦・広瀬通孝：バーチャル・テック・ラボ，「超」現実への接近，工業調査会，1992。
- 12) 広瀬通孝：バーチャルリアリティ，産業図書，1993。
- 13) 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄：避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用，土木学会論文集，No. 513/I-31, pp. 225-232, 1995。
- 14) 横山秀史・永田茂・山崎文雄・海老原学：迷路実験に基づく緊急時人間行動特性，土木学会論文集，No. 441/I-18, pp. 180-189, 1992。
- 15) 山崎文雄・永田茂・横山秀史・大槻明：避難行動の迷路実験結果，土木学会論文集，No. 441/I-18, pp. 223-227, 1992。
- 16) 横山秀史・永田茂・山崎文雄・片山恒雄：フラクタル次元を用いた人間行動動線の定量的分析，土木学会論文集，No. 450/I-20, pp. 181-187, 1992。
- 17) 芳賀保則・目黒公郎・山崎文雄・片山恒雄：バーチャルリアリティを用いた避難行動シミュレータの開発，第49回土木学会年次学術講演会概要集，第4部，pp. 234-235, 1994。
- 18) 目黒公郎，芳賀保則，山崎文雄，片山恒雄：実迷路とVR迷路を用いた実験による避難行動特性の比較，第23回地震工学研究発表会講演概要，pp. 719-722, 1995。
- 19) 目黒公郎，芳賀保則，山崎文雄，片山恒雄：バーチャルリアリティ(VR)を用いた避難行動の基礎解析，生産研究，Vol. 47, No. 11, pp. 44-47, 1995。
- 20) Sense 8 Corporation：World Tool Kit Reference Manual, 1993。
- 21) Auto desk：Auto CAD ユーザ・レファレンス，1992。

(1996. 6.10 受付)

APPLICATION OF VIRTUAL REALITY TO HUMAN EVACUATION BEHAVIOR

Kimiro MEGURO, Yasunori HAGA, Fumio YAMAZAKI and Tsuneo KATAYAMA

A new simulator for human evacuation behavior using virtual reality (VR) is developed and applied to study evacuation from a maze. Comparing the results of experiments using the real and VR mazes of same structure, applicability and potential of VR for evacuation behavior are examined. It is found that evacuation behavior can be simulated by the VR system, and the training using VR helps smooth evacuation from the maze. Considering the issues related to disaster drill, such as its mannerism, decrease of participants and their low volition, and safety of the drill, this VR simulator has high potential and can be a useful tool for disaster mitigation. The simulator can also be applied to study the safety of the structures in the planning and design stages as well as existing ones from the view point of human evacuation.

