

特別研究報告書

煙体感装置を用いた  
マルチエージェント避難シミュレーション

指導教員 石田 亨 教授

京都大学工学部情報学科

谷塚 俊輔

平成17年2月10日

## 煙体感装置を用いたマルチエージェント避難シミュレーション

谷塚 俊輔

### 内容梗概

仮想空間におけるマルチエージェントシミュレーションは火災避難等，危険な状況を再現するのに適している．しかし，アバター参加型のマルチエージェント火災避難シミュレーションを考えた場合，アバター操作者に仮想空間の状況が伝わり切らない為，環境による行動への影響が欠け，避難状況に適さない行動をとってしまうといった問題が生じる．そこで，VirtualReality(以下，VR)技術を用いて仮想空間の火災状況を体験者に再現することが考えられる．しかし，これにはVRが体験者に与える影響の質，仮想空間の再現レベルといった問題点が存在する．本研究では，これらの問題点を考慮し，VR装置と参加型マルチエージェントシミュレータを接続することで，より現実に近い火災避難シミュレーションを行うことを目的とする．

プロジェクトの価格が下がり，VR装置が安価に作成できるようになり，各地域でVR装置を用いて離れた人々がネットワークを通して参加する大規模な仮想避難シミュレーションが可能となりつつある．その為，VR装置を用いたマルチエージェント避難シミュレータを開発する意義は非常に大きいですが，以下のような問題点が存在する．

#### 1) VRが人間に与える影響の質

3D画像によって体験者に臨場感を与えるVRシステムが数多く存在するが，リアルな画像のみが体験者に臨場感を与える要因ではなく，その他にも視覚情報だけでは与えることのできないものが存在する．

#### 2) 現実空間への再現レベル

仮想空間に存在するものを現実空間に再現する場合においては，何らかのデバイスを用いるため，そのデバイスの応答性や，デバイスに命令を出してから実際に実行されるまでのタイムラグや，どのレベルまで仮想空間を再現するのかといった問題点がある．

本研究では仮想都市シミュレータであるFreeWalk/Qと独立行政法人消防研究所のfire cubeを用いて，煙体感装置により実際に煙を発生し煙の影響を体験者に体感させるマルチエージェント避難シミュレータを開発した．仮想空間の煙の高さは一定の領域毎に計算されており，境界線で煙の高さが変化する．そ

の為、進行方向に領域の境界が存在する場合に予め次の領域のデータの煙を発生させることで煙発生までのタイムラグを減少させた。次に、煙の滞留を考慮し、煙噴出時間を保存しておいて、噴出時に前回の噴出時間と比較して、相対的に煙のコントロールを行った。また、エージェントのシナリオに煙が与える影響を記述する際には、煙を離散的にとらえたシナリオ記述になる。マルチエージェントシミュレーションを行う場合には仮想空間の状況を実空間に完全に再現することが目的ではなく、アバター、エージェントが受けるのと同様の影響を与えることが目的となっている為、デバイスの制御をエージェントの煙による影響を記述するのに必要な段階分けに簡略化することができる。

本研究では、アバター操作者に避難状況に近い行動決定を行わせる為に、煙体感装置を用いたマルチエージェント避難シミュレータを開発した。このシミュレータによる成果を以下の様に考察する。

#### 1) 環境変化が行動に与える影響の実現

環境変化が行動に与える影響には明示的なものと感覚的なものが存在し、CAVEなど視覚による臨場感を与える装置では仮想空間上でシミュレートされる感覚的な影響を再現することができなかった。本システムでは同一の感覚的影響を与える要因を仮想空間と現実空間に再現することで明示的、感覚的両方の影響をアバターの行動にも再現し、避難状況時に近い行動決定を行うことを可能とした。これにより、火災避難時の環境変化がアバターも含めた避難時の群集インタラクションに与える影響をシミュレートすることができるようになった。

#### 2) シナリオ記述に基づくデバイス制御方法

マルチエージェント避難シミュレーションにおけるアバター操作者には災害状況を忠実に再現することが目的なのではなく、アバターやエージェントが受けるのと同様の影響を再現することが目的となっている。その為、エージェントの行動に煙が与える影響を記述するのに必要な段階にデバイス制御を簡略化できる。

本研究では煙体感装置を持つVR装置 fire cube と仮想都市シミュレータ Free-Walk/Qを用いたシミュレータを開発した。これにより、体験者は煙による影響を考慮したエージェントのシナリオ同様に行動決定を行うことが可能となり、アバターも含めた火災避難時の群集インタラクションをシミュレートすることが可能となった。またマルチエージェントシミュレータにVRを応用する場合に必要なデバイス制御の方針を提案した。

## Multiagent Evacuation Simulation Using Smoke-Generating Equipments

Shunsuke Taniduka

### Abstract

Multiagent simulation in virtual spaces is suitable to reenact dangerous situations e.g. fire evacuation. But if we execute multiagent simulation in fire evacuation with avator, environmental influences to actions is lacked and avator controllers make action decisions which isn't suitable to evacuation situations because it can't convey situations in virtual spaces to avator controllers. It is available to reenact user fire situation in virtual space with virtual reality. But there are problems like kinds of VR influences to user or the level of reenactment of virtual spaces. This research make it to the purpose to execute more real fire evacuation simulation by connecting VR devices with multiplayer multiagent simulator which can solve these problems.

Projectors become cheaper. So we can make VR devices easily. Massive evacuation simulation in virtual spaces is being able to do by people who join simulation at various places using VR devices. So the signification to develop Multiagent evacuation simulator with VR devices is very important ,but there are problems listed below.

#### 1) Kinds of influences to persons with VR

Many VR systems give users high realistic sensations with 3D pictures. Not only realistic pictures are factors to be able to give users high realistic sensations, but others can do so without using visual infomations.

#### 2) The level of reenactment to real spaces

When reenacting things in vidual spaces to real spaces, we use some devices. These devices have problems like responses, time lags and the level of reenactment to real splaces.

In this reserach ,I have developed multiagent evacuation simulator which gives smoke influences to users using smoke-generating equipments by using virtual city simulator FreeWalk/ $Q$  and fire cube of National Research Institute of Fire and Disaster.

Smoke height is figured in each area and changes at each boundary. So

in case there are boundaries ahead, generating smoke in next area in advance shortens time lag till generating smoke in real world. Secondly, I control smoke relatively by saving smoke-generating time and comparing previous generating time.

And when describing smoke influences to agent scenarios, they are described thinking smoke discretely.

In multiagent simulation it is not aim to reenact virtual spaces to real world, but to approximate action decisions to agents. So you can simplify device control to stage divisions which can describe smoke influences in agent scenarios.

In this research, I have developed multiagent simulator using smoke-generating equipments to make avator controller decide actions in evacuation situations.

I consider this simulator make these results listed below.

**1) Achievement of influence that environmental changes gives action**

There are explicit and sensuous influences which environmental changes give action decisions. Devices which give high realistic sensation by visual information like CAVE can't reenact sensuous influences. This simulator can reenact explicit and sensuous influences to action decision of avators by reenacting the same factor to virtual and real spaces. As a result, it can simulate influences which environmental changes in fire evacuation give to crowd interactions.

**2) Scenario based device control method**

In multiagent evacuation simulation it isn't aim to reenact situations in virtual spaces, but to reenact action decision in fire evacuation to avator controllers. So device controls can be simplified to some steps which satisfy describing smoke influences.

In this research I have developed multiagent simulator using firecube, VR device which has smoke-generating devices, and FreeWalk/Q, virtual city simulator. As a result, those who experience can make action decisions by feeling smoke by sense of smell or other senses excluding sense of sight, and I can simulate crowd interaction including avator. And I proposed the way of controlling devices in case applying VR to multiagent simulator.

# 煙体感装置を用いたマルチエージェント避難シミュレーション

## 目次

第1章	はじめに	1
第2章	マルチエージェントシミュレーション	2
2.1	関連研究	2
2.2	参加型マルチエージェントシミュレーション	3
第3章	環境がシミュレーションに与える影響	4
3.1	環境変化による影響	4
3.2	エージェントに対する環境変化による影響	6
第4章	煙体感装置を用いたマルチエージェントシミュレータ	9
4.1	アバター操作者に対する環境変化による影響	9
4.2	マルチエージェントシミュレータによる煙体感装置制御	11
第5章	実装例	16
第6章	考察	19
第7章	おわりに	21
	謝辞	22
	参考文献	23
	付録	A-1

## 第1章 はじめに

火災における死亡者数は多く、日本国内における年間死亡者数は毎年約2,000名に及び、その多くは逃げ遅れによるものである。その為、火災時においてはいかに迅速に避難するかが重要であり、火災避難訓練をしておくことで避難にかかる時間を短縮することができる。

しかし、実際に人間と火を用いるような火災避難シミュレーションは一般的に安全面、コスト面などの理由から現実に行うことが困難である。そのため仮想空間において人間の代わりに自律的に動作を行うエージェントを用いた、マルチエージェントシミュレーションを用いて火災避難訓練を行うことはこれらの問題点を解決する手段の一つとして非常に有益なものである。しかし、仮想空間における避難シミュレーションをより意味のあるものにするためにも、より現実に近いシミュレーションが求められる。

仮想空間で行うことにより安全面は解決でき、人間を集めなければならないコスト面の問題はエージェントを人間の代わりに使用することで解決できる。避難訓練を行うにあたりマルチエージェント避難シミュレーションに人間がアバターとして参加することを考えた場合に、体験者に避難状況をどのように再現して現実感を与えるかということが問題点となる。

避難経路を確認するといった平常時の心理状態での仮想空間シミュレーションであれば、環境が行動に与える特別な影響を考慮しなくても十分で、仮想空間を画面から認識するだけで参加することができる。しかし、仮想空間において火災避難シミュレーションを行う利点として安全面があることから、実世界では行えないような実際に火を用いた大規模な避難シミュレーションを行えることが望ましい。その為には、現実の火災現場における火災避難の様に災害時の避難状況などをシミュレートする場合には、環境が群集避難に与える影響を考慮する必要がある。

火災における死亡の主要原因の一つとして、煙の中に長時間いることで起こる一酸化炭素による中毒死が挙げられ、その事実も一般的に広く知られていることから煙が避難者の意識に与える影響は少なくない。その為、煙の中に一定時間以上滞在することを避けたり、煙から離れるといった様な避難行動や、煙に対する危機感から他者に助けを求める、または求められるといったインタラクション等が煙による環境の変化から生まれる可能性がある。よって、火災避

難シミュレーションを行うにあたって、煙の存在は群集の避難行動に大きな影響を与えるため、無視することができない [1] .

そこで、Virtual Reality(VR) 技術を用いて、火災時の状況をアバター操作者に体感させることを提案する。しかし、それには以下の様な問題点がある。

#### 1) VR が人間に与える影響の質

3D 画像や巨大スクリーンなどによって体験者に臨場感を与える VR システムが数多く存在するが、リアルな画像のみが体験者に臨場感を与える要因ではない。テレビで見るのと、その現場に実際に居ることの間には大きな差が生じる様に、画像による視覚情報のみでは与えることができない影響というものが存在する。

#### 2) 現実空間への再現レベル

仮想空間に存在するものを現実空間に再現する場合においては、何らかのデバイスを用いるため、そのデバイスの応答性や、デバイスに命令を出してから実際に実行されるまでのタイムラグや、どのレベルまで仮想空間を再現するのかといった問題点がある。

本稿では第 2 章で避難シミュレーションについての概要と問題点について述べる。第 3 章では煙による環境変化が参加型避難シミュレーションにどのような影響を与えるのかについて考察し、煙による環境変化が行動変化に影響を与えるということを実現するために必要となる機能を FreeWalk/Q に実装したことについて述べる。第 4 章で、VR 装置と煙体感装置について説明し、煙体感装置と参加型マルチエージェントシミュレータの接続と、煙体感装置の制御方法について述べる。第 5 章において実際に煙体感装置を用いたマルチエージェントシミュレーションの実装について述べる。第 6 章では、本研究における成果や今後の課題などの考察を行う。

## 第 2 章 マルチエージェントシミュレーション

### 2.1 関連研究

マルチエージェントによるシミュレーションには、群集の歩行者モデルに歩行者間の心理的ストレスによる歩行特性を考慮したもの等これまでに数多くの研究がされてきた。マルチエージェントによる群集シミュレーションの多くは、粒子モデルや、簡単なフレームによる描画などで行われている [2] .

群集シミュレーションを避難訓練に応用することを想定した場合、人間が参

加できることが必要となるが，上記の群集シミュレーションはアバターの参加を想定していない．アバター参加を考えるとリアルに再現された仮想空間など参加者に現実に近い感覚を与えるといったことも必要となってくる．

## 2.2 参加型マルチエージェントシミュレーション

参加型マルチエージェントシミュレーションでは仮想空間におけるマルチエージェントシミュレーションに人間がアバターとして参加することを可能にする．参加型マルチエージェントシミュレーションには FreeWalk[3] などがあり，アバターとエージェントが仮想空間内に混在し，参加型マルチエージェントシミュレーションを用いることで仮想空間における避難訓練を行うといったことも可能となる．

図 2.1 に仮想空間における参加型マルチエージェントシミュレーションのイメージ図を示す．

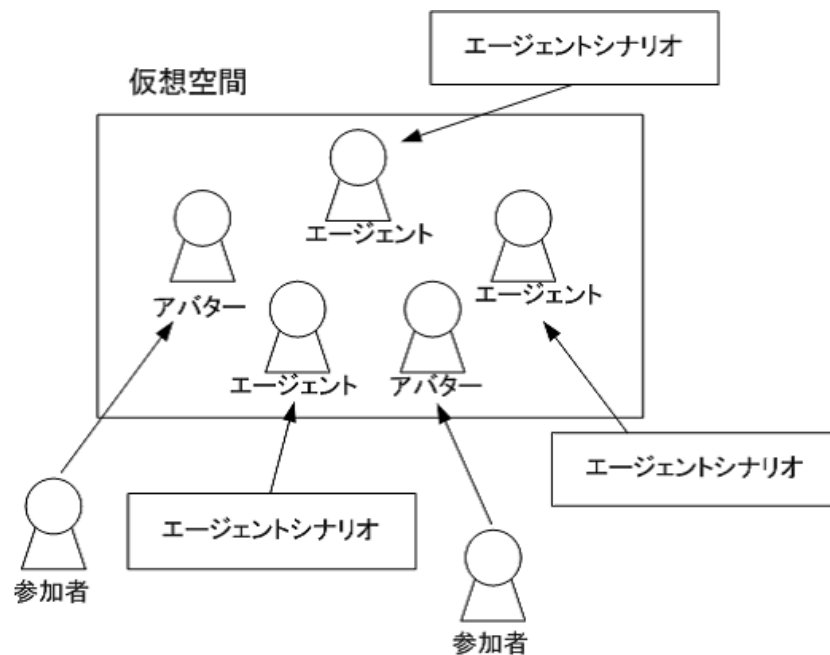


図 2.1: 参加型マルチエージェントシミュレーションイメージ図

シミュレーションにおける行動決定には環境からの影響を大きく受ける．参加型マルチエージェントシミュレーションを行うにあたって，環境からの影響を再現することが必要である．災害避難時などにおいては特に，周囲の環境は刻

一刻と変化していき，その変化により避難行動に大き影響を与えることが考えられる．マルチエージェント避難シミュレーションに人間がアバターとして参加する場合において，エージェントのシナリオは仮想空間で起こっている避難状況を想定して記述することができる．しかし，アバター操作者には仮想空間の避難状況に基づく行動決定をしない可能性がある．例えば，現実の避難時においては煙が無い方向に逃げるなどの行動がとられるが，仮想空間に煙が出ていようと操作者にはそれに従った行動決定を行うとは限らない．よって，避難時のエージェントに近い行動決定をアバターにも行わせるようなシステムが必要となる．体験者にその現場にいるかのような臨場感を与えることを可能とするVR装置がこれまでも様々なものが研究されてきた．しかし，マルチエージェントシミュレーションにVR技術を応用する研究は少ない．参加型マルチエージェント避難シミュレーションを行うにあたって，VR装置を用いることで体験者に仮想空間の状況を再現することができると思う．

次章では，環境が行動決定に与える影響について考え，その影響をマルチエージェントシミュレーションに実装する方法について述べる．

## 第3章 環境がシミュレーションに与える影響

### 3.1 環境変化による影響

避難をしている場合，各々に避難者は完全に独立して避難をしているのではなく，避難者間で何らかのインタラクションを行って避難している．しかし，避難行動に影響を与えるのは避難者同士の社会的インタラクションのみではない．周囲の環境の変化からも大きな影響を受ける．避難状況における環境は時間が経つ毎に変化し，その変化に伴い避難者に対して与える影響が変化していく．この変化していく環境により，避難者の行動は影響を受け，また，環境変化による影響から避難者間のインタラクションにも変化を与えてしまう．その為，避難シミュレーションを行うにあたって，環境変化が避難者に与える影響を再現する必要がある．次に，環境変化が与える影響にはどのようなものが存在するのかを考える．火災避難時を例として考えると，環境変化が与える影響には次のようなものが存在する．

- 1) 避難の途中で壁が崩れる，炎の勢いが強くなるといった様に避難経路上に障害物ができ，避難者にその経路が通れないということを明示的に認識さ

せ，避難経路を変更させる影響．

- 2) 周囲に煙が充満してくると，煙を吸わない様にしてその場を離れようとしていたり，避難経路中に煙が充満していると別の避難経路を選ぼうとするといった，その環境変化が生じている避難経路を通ることは可能ではあるが感覚的にその経路を選ぶことを避けさせるような影響

一つ目を明示的な環境変化による影響，二つ目を感覚的な環境変化による影響と呼ぶことにする．

この二つの影響を人間が受け取る手段は異なる．明示的な環境変化による影響は主に視覚情報から得ることができる．感覚的な環境変化による影響は視覚情報だけでなく，嗅覚や触覚，温度感覚など視覚以外からの情報も含めて得ることができる．

このことから，明示的な環境変化による影響は画面上に表示することで再現でき，また CAVE などの視覚情報から臨場感を与える様なシステムを用いることでよりリアルな再現を行うことが可能である．

しかし，感覚的な環境変化による影響は視覚からのみでは再現することが不可能である為，他の手段が必要となる．嗅覚や触覚，温度感覚を用いて得ることから，感覚的な環境変化による影響は，同一空間に存在する物から得ていることが分かる．この様に考えると視覚のみから得ることができる環境変化による明示的な影響は異なる空間から得る情報からも受け取ることができて，感覚的な環境変化による影響は同一空間上にあるものからしか受け取ることができないという仮説が考えられる．この仮説を参加型マルチエージェントシミュレーションに当てはめて考えると図 3.1 のように示すことができる．

アバターとエージェントは仮想空間から明示的，感覚的な環境変化による影響の両方を受け取ることが可能である．しかし，アバターの行動決定は現実空間のアバター操作者によって決定されるので，アバター操作者に対して与える必要がある．明示的な環境変化による影響は仮想空間の画面上への表示から与えることができるが，感覚的な環境変化による影響はアバター操作者の存在する現実空間から与える必要がある．

まず，次節においてエージェントに対して与える環境変化による影響について考える．

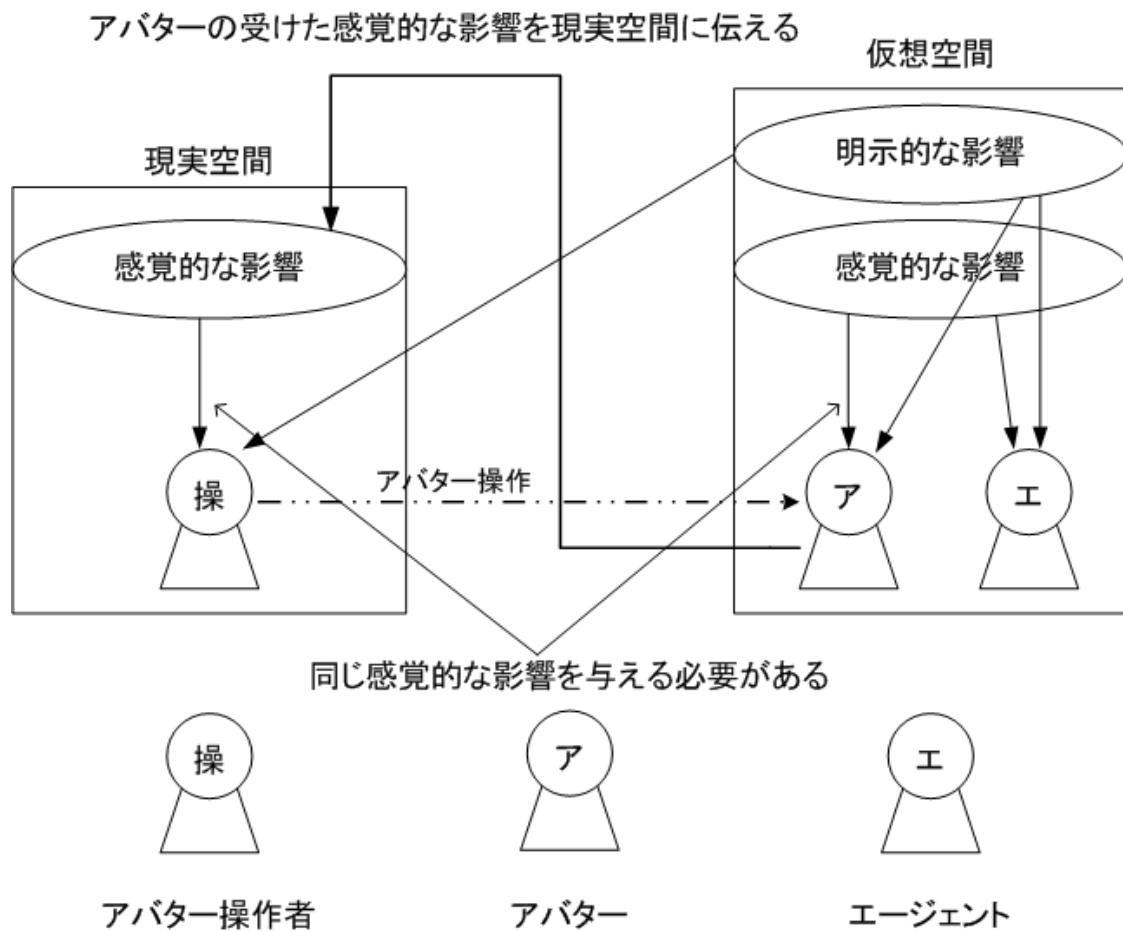


図 3.1: 明示的影響，感覚的影響の影響範囲

### 3.2 エージェントに対する環境変化による影響

避難行動に影響を与えるような環境変化には様々なものが存在するが、火災時における煙を例として考える。仮想空間上に煙を発生させることによって、エージェントと煙が同一空間上に存在することになり、エージェントは煙の変化による明示的影響，感覚的影響の両方を受け取ることが可能となる。また、煙による感覚的影響を避難者はできるだけ受けないように振る舞う。その理由としては、感覚的影響が避難を困難にする原因となるからである。感覚的影響を受ける状態、つまり周囲に煙が充満しているような状態においては煙を吸入してしまい、人間の体の状態に影響を与えてしまうからである。その結果人間の避難行動に影響が出て、状態変化が上限に達すると避難が不可能

になることも考えられる。つまり、感覚的な影響には許容する上限があり、この上限によって感覚的な影響の受け取り方も異なることが考えられる。この状態変化の上限に達するまでの時間を煙の中に滞在可能な時間的制約とすると状態変化の上限として以下の指標がある。

1) 怒限度

過去の実験から得られた火災からの煙などに対して人間がどの程度耐えられるかの指標である。火災時に発生する最も危険な有毒ガスの一つである一酸化炭素(CO)の場合、致死量の一酸化炭素濃度を含む煙の中での吸入時間は1,2分が限度

2) 温度変化二乗の時間積分値

避難時において、温度変化の二乗の時間積分値が10,000を超える場合、避難者は避難不可能となる [4]。

$$\int (\Delta T)^2 > 10000$$

状態変化が行動に影響を与えることを考えた場合、その影響は個人間でバラつきがあるが一つの指標としてこれらを用いることができる。

次に、煙による影響をエージェントが受けることを可能にする為に、仮想空間システムに煙を知覚するコマンドを実装した。図 3.2 に煙感知時のエージェントの実行処理のシステム構成図を示す。

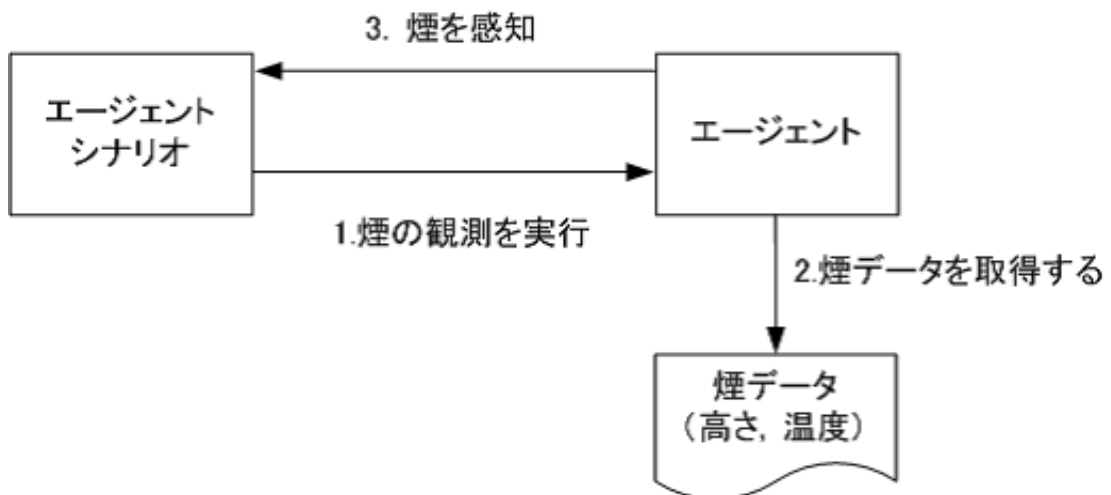


図 3.2: エージェントの煙感知のシステム構成

煙感知コマンドを追加することにより、煙による影響をエージェントのシナリオに記述することが可能となる。煙感知コマンドはエージェントの周囲にある煙のデータを得て、そのデータから煙の影響を求める。また感覚的な影響の上限の実装として、エージェントが煙を知覚した際にエージェントの口の高さに煙が存在すると、煙を吸入したとみなし、エージェントの状態変化を求めて処理を行う。表 3.1 に煙感知コマンドの仕様を示す。

表 3.1: 煙感知コマンド仕様

煙感知コマンド	
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・周囲の煙が指定した条件を超えれば実行</li> <li>・条件として煙の中における滞在時間が指定されていた場合にはエージェントの口の高さにまで煙がある場合には、実行エージェントの状態を変化させ状態変化が上限を超えた場合に実行される。</li> </ul>
条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・煙の中における滞在時間</li> <li>・煙の温度変化量</li> <li>・煙の高さ</li> <li>・煙の煤濃度</li> </ul>
補足	<ul style="list-style-type: none"> <li>・条件は複数の指定が可能</li> <li>・複数指定した場合には最も早く上限を超える条件が選択される</li> <li>・条件指定が無い場合には煙の中における滞在時間に怒限度を適用してその範囲内でランダムな時間を上限にする</li> </ul>

パラメータとして煙の高さを指定した場合のシーケンス図を図 3.3 に示す。煙感知コマンドの使用法としては、エージェントの各状態において煙感知コマンドを実行させる。

仮想空間システムに煙感知コマンドを実装することによりエージェントのシナリオに煙による明示的、感覚的な影響を考慮した記述を行うことが可能となる。

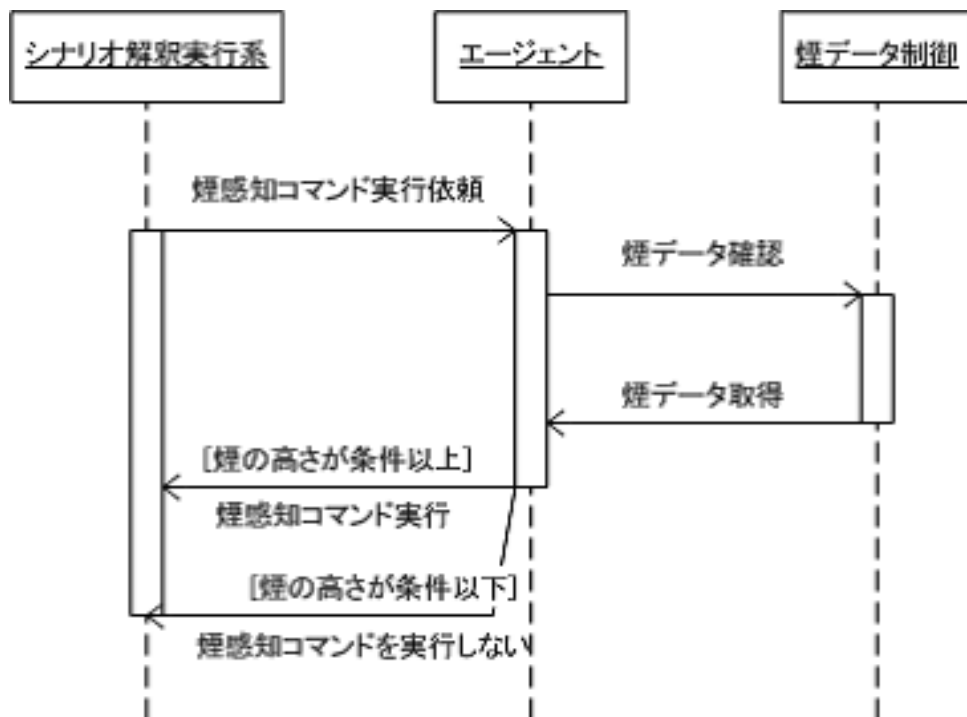


図 3.3: 煙感知コマンドシーケンス図

しかし，アバターに対しては煙による明示的な環境変化による影響は画面に表示される煙によって可能ではあるが，前述の様に感覚的な環境変化による影響は同一空間上のものからのみ受け取ることが可能である．

そこで，次章ではアバター操作者に感覚的な影響を含めた煙による影響を与えることを考える．

## 第 4 章 煙体感装置を用いたマルチエージェントシミュレータ

### 4.1 アバター操作者に対する環境変化による影響

アバターに仮想空間における環境変化による影響を与える為には，アバター操作者に環境を再現する必要がある．環境を実空間に再現する手段として，VR装置を用いることが考えられる．

VR装置を用いることでこの明示的な影響をリアルな画像の表示などによってさらに強く与えることは可能で，これには CAVE[5] や CABIN[6] といった VR装置を用いることが考えられる．これらは体験者を部屋の中に閉じ込めて，部屋全体にリアルな 3D 画像などを描画し，視覚情報によって体験者に臨場感を

与え、高い仮想空間への没入感を与えることができる。実際、これまでにこれらの装置を用いた分散協調 [7] など様々な研究が行われてきている。しかし、マルチエージェントシミュレーションに VR 装置を応用しているような研究は少ない。

しかし、これらの VR 装置はあくまでも視覚情報を用いている為に、明示的な環境変化による影響を与えることはできても、感覚的な環境変化による影響をアバター操作者に対して与えることはできない。

3.1 節で述べたように感覚的な環境変化による影響は同一空間上のものからしか得ることができない為、現実空間においてアバターに直接感覚的な影響を与える環境を再現するようなシステムが必要となる。

このような VR 装置と参加型マルチエージェントシミュレータを用いることでアバター操作に環境変化による影響を実現した避難シミュレーションを行うことが可能となる。

火災避難シミュレーション環境変化としては煙による影響が大きいため、現実的に煙を発生させることが可能な煙体感装置を用いることを考える。

煙体感装置を用いることで、実際に煙を発生させ、煙による感覚的な影響をアバター操作者に与えることが可能となる。

図 4.1 に巨大スクリーン、煙体感装置を持つ VR 装置を用いてマルチエージェントシミュレーションを行う際のシステム構成図を示す。

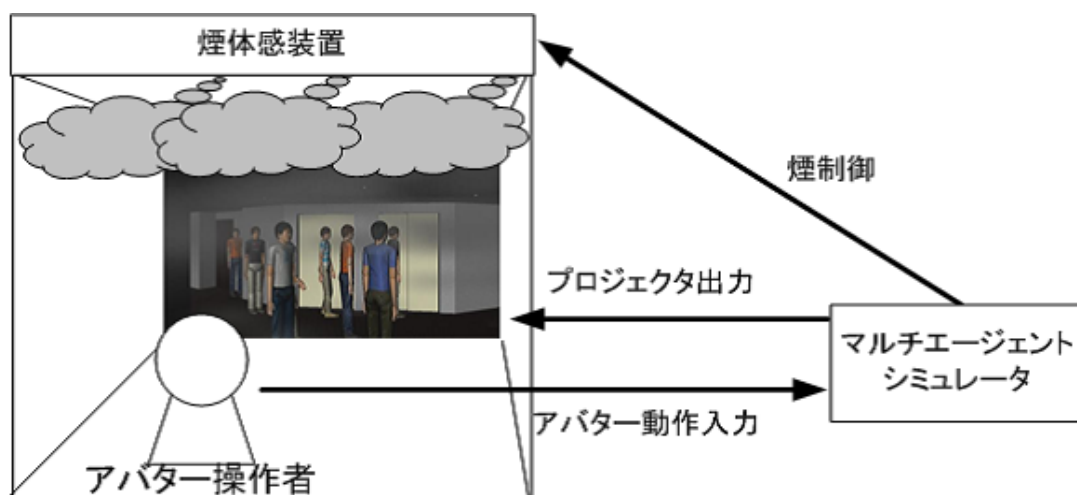


図 4.1: VR 装置を用いたマルチエージェントシミュレータのシステム構成図

## 4.2 マルチエージェントシミュレータによる煙体感装置制御

巨大スクリーンを用いることで、CAVEのような視覚から与える臨場感をアバター操作者に与え、より強く明示的な環境変化による影響を与えてシミュレーションに参加させることが可能となる。しかし、視覚情報のみでは前述の様に感覚的な環境変化による影響を与えることができないので、実際の煙を発生させてアバターに体感させることが必要となる。その為にマルチエージェントシミュレータから煙の制御を行う。仮想空間における煙を現実空間に再現する際には以下のような問題点が存在する。

- 1) 現実空間と仮想空間の同期
- 2) 現実空間への再現レベル

一つ目の問題点として、現実空間と仮想空間を同期させることが考えられる。一般的に仮想空間での事象の発生を確認してから、現実空間への再現が始められる。デバイス性能によっては動作命令を行ってから、実際に動くまでに大きな遅延が生じる。また、一度現実空間に発生させたものは残ってしまう為に、前後の関係に強い依存ができてしまう。

二つ目の問題点として、仮想空間の環境を現実空間にどのレベルまで再現する必要があるのかといったことが考えられる。現実空間において仮想空間を正確に再現するのは非常に複雑なデバイス制御が必要となって困難であり、また高いデバイス性能が必要になるが、デバイス性能には限界がある。

一つ目の解決方法としては、仮想空間で次に生じる事象を予測することによって、あらかじめデバイスに命令を行うことで遅延を解消することが考えられる。また、前後の関係における依存は前後を独立したものと捉えるのではなく、1セットとして考え、後のデバイス命令は前の命令に対して相対的に行うことで解消できる。

二つ目の解決方法としては、デバイス制御を簡略化することが考えられる。本研究においてVR装置を用いて仮想空間を現実空間に再現するのは、より緻密な再現を目指しているのではなく、参加型マルチエージェントシミュレーションにおいてアバター操作者が環境変化による影響を受けない為に生じるエージェントの行動決定との大きな差という問題点を解決する手段として用いている。その為、それを解決するのに必要となるだけのデバイス制御に限定すればよい。

以上の問題点を考慮して、マルチエージェントシミュレータから煙体感装置の制御を行う。

3.2 節で述べた煙感知コマンドは、周囲の煙の状況や吸入による状態変化によって変化する避難行動を記述するためのコマンドであった。煙感知コマンドは実行エージェントの周囲にある煙の高さや温度等のデータから状態変化の計算を行っているため、アバターに煙感知コマンドを実行させることによって周囲の煙のデータを受け取ることができる。そして、そのデータを用いて煙体感装置の制御を行うことが可能となる。

実際には、煙感知コマンドによって煙体感装置の制御を行うのではなく、煙感知コマンドによってアバターの周囲の煙の高さなどのデータを受け取ってそのデータを煙体感装置の制御を行う部分に渡して、命令を送る。図 4.2 に煙体感装置の制御のシーケンス図を示す。アバターが仮想空間における煙のデータを煙感知コマンドによって受け取り、そのデータを煙体感装置と通信を行い制御する部分に渡す。そして、煙データを基に煙体感装置に煙噴出命令を送る。

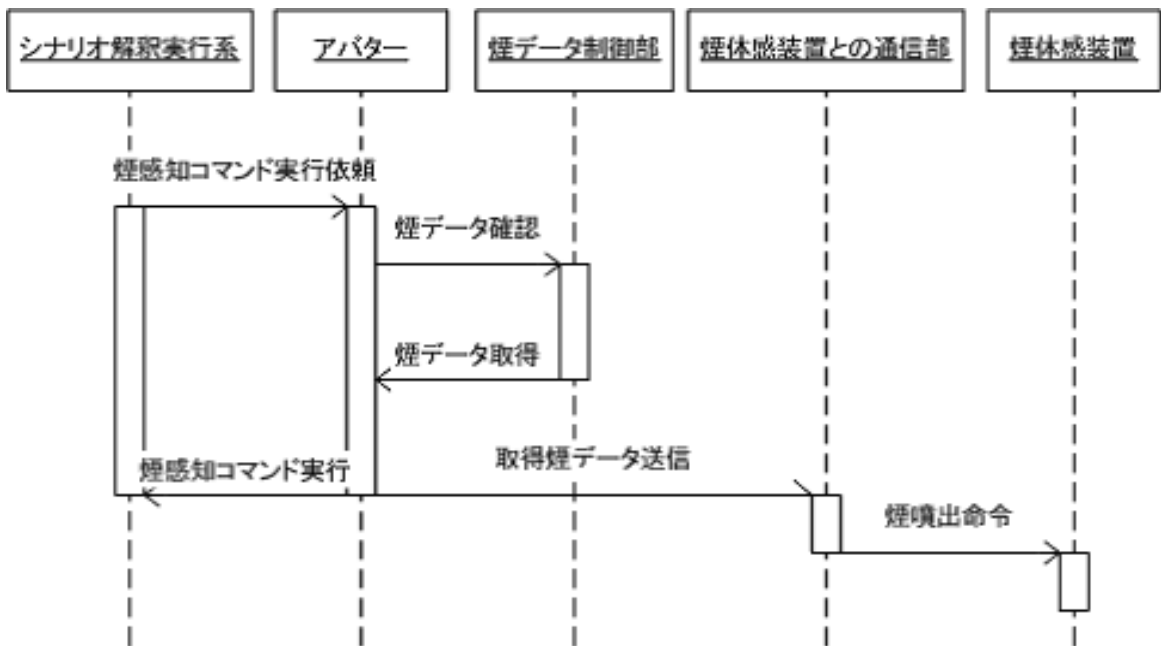


図 4.2: 煙制御のシーケンス図

制御部分では前回の煙噴出時間との比較から、何秒間煙を発生させ、排煙を行うのかを決定する。

煙体感装置を用いる際には、上述したものと同じ様に問題が生じる。一つ目に対応するものとしては、煙体感装置は動作を開始させてから、実際に煙が発生するまでに大きな遅延が発生する。また、前回に発生させた煙が滞留する影響を受けてしまう。二つ目として、現実空間においては、煙の高さの制御が非常に困難である。

一つ目を解決する方法として、先行して煙データを得るということを行う。煙の流動モデルは仮想空間を一定の領域毎に分割し、各領域毎に煙のデータを計算している。よって、煙のデータは領域が変わる時に性質が変わるので、進行方向に煙の領域の境界線が存在する場合に、あらかじめ次の領域の煙データを用いることで、煙噴出命令を出してから実際に煙が噴出されるまでのタイムラグを減らしている。煙領域の境界を先行して確認し、次の領域の煙データを得る図を示す。前方に煙領域の境界が無い場合には、アバターの現在の位置の領域の煙データを用いて、そのデータに基づいて煙を発生させる(図4.3)。前方に煙領域がある場合には、次の領域の煙データを用いて煙を発生させることで煙噴出命令から実際に煙が噴出されるまでのタイムラグを減らしている(図4.4)。

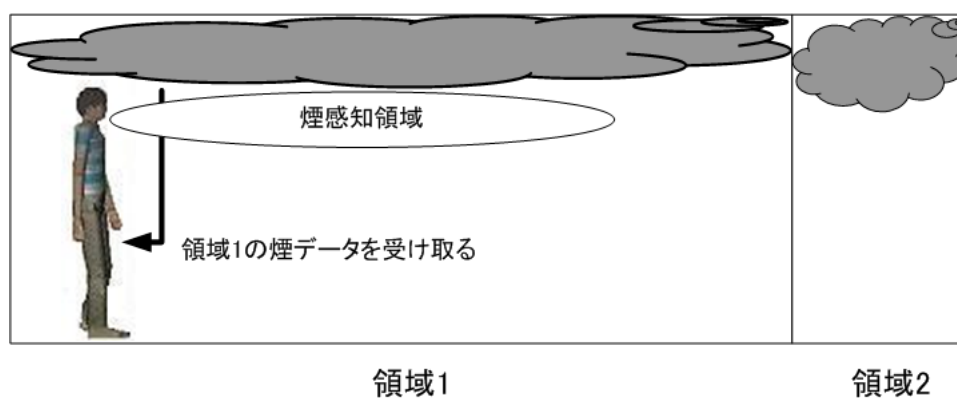


図 4.3: 煙感知領域に煙領域の境界が無い場合

仮想空間での煙の描画は描画命令を出した時点のデータから描画が可能であるが、現実空間の煙は滞留するために、煙を噴出する時に、その前に噴出した煙が滞留している。そこで、前回の煙の噴出時間と比較して相対的に煙の制御を行うことが必要となる。

現実空間の煙の高さのコントロールに関しては、気温や風など様々な影響を受ける為に、細かいコントロールを行うことが非常に困難であり、仮想空間と

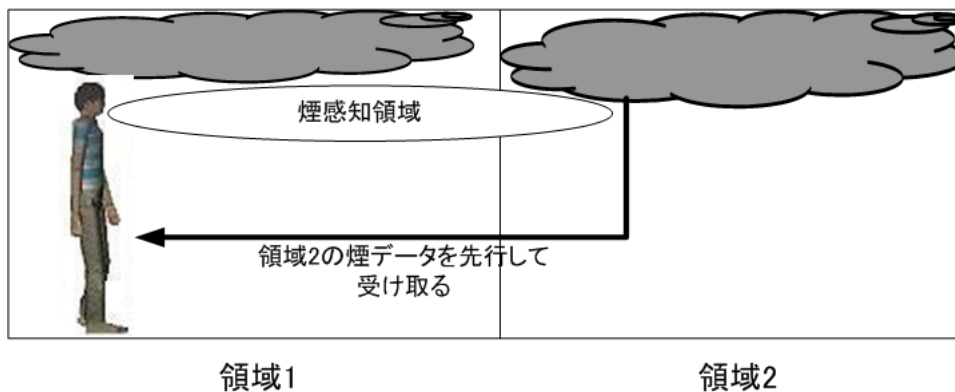


図 4.4: 煙感知領域に煙領域の境界を発見した場合

全く同じ煙を現実空間に再現することは不可能である。

仮想空間を現実空間に再現することだけが目的であれば、デバイス性能を可能な限り高める、複雑な制御方法を用いるといったことで可能となる。しかし、VR装置を用いたマルチエージェントシミュレーションにおいては仮想空間を現実空間に完全に再現することが目的ではない。アバター操作者の行動決定にも仮想空間においてエージェントが環境から受ける影響と同じ影響を与えて、アバターの行動にもエージェントの行動ルールと同様に避難時における環境からの影響を再現することが目的である。

人間が周囲の煙から受ける影響について考察する。まず、煙が存在しない状態。次に、直接煙に接触はしていないが、煙が頭上に存在する状態。次に、煙が顔の高さにまで降りてきて、視界が塞がれる、煙を吸い込んでしまうといった状態。最後に、完全に煙に覆われてしまって、煙を避けようの無い状態。煙を人間が感じるのにはこれら4つの段階が簡単に考えうる。

避難シミュレーションにおけるエージェントシナリオの記述を考える。エージェントシナリオの状態遷移図の例を図 4.5 に示す。

現実には煙の高さは連続的に変化する。しかし、煙を感知して煙による影響を受けることを考慮したシナリオを記述する際には、連続する全ての煙の高さに対応することは事実上不可能である。その為、煙の量を離散的にとらえたシナリオ記述が行われ、エージェントシナリオ上では煙の高さは断続的なものとして扱われる。

図 4.5 のエージェントの状態遷移図において、煙からの影響を受けて実行されるのは1~4の状態遷移である。その為、このシナリオを用いて行われるマル

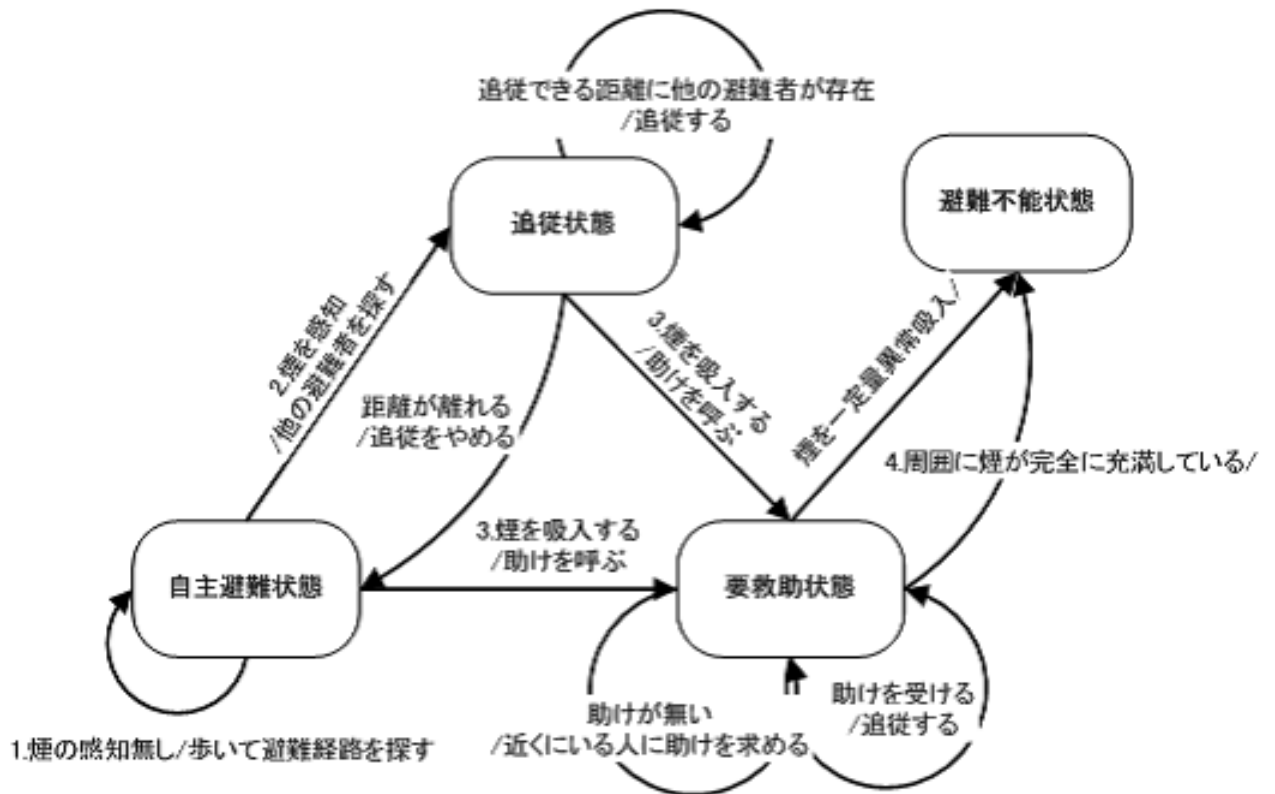


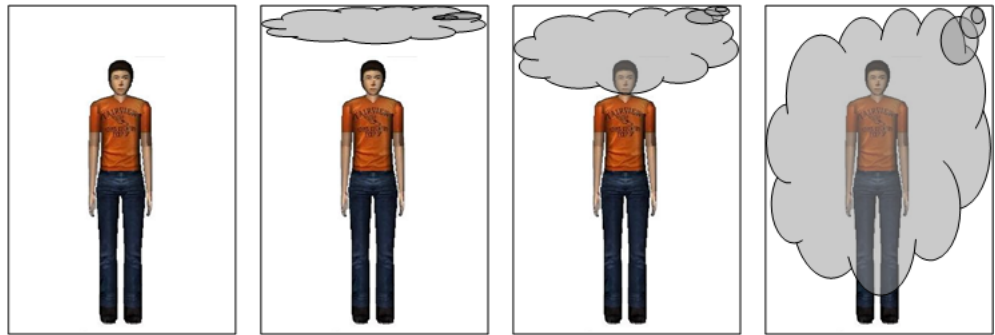
図 4.5: エージェントの状態遷移図例

エージェントシミュレーションにおいては煙の高さは図 4.6 のように 4 段階のものとして扱われ、エージェントに対する煙の影響はこの 4 段階に分類することが可能となる。

アバターとエージェントは同一空間上に存在する為、煙による影響を等しく受け取ることになる。アバター操作者にはアバターと同じ影響を与えることが必要なので、アバター操作者にも同様に煙の感知を 4 段階に分けて与えることになり、煙体感装置により発生させる煙の量を 4 段階にすることになる。

結果として、煙体感装置の制御はエージェントのシナリオ記述に基づいて行われていることになる。図 4.7 に煙体感装置の制御の段階分けを決定する際のデータフロー図を示す。

以上より、マルチエージェントシミュレーションを行う際に、煙の高さを忠実に再現することを目的に煙体感装置の制御を行うのではなくエージェントのシナリオ記述に基づいて行うことで、デバイス制御を簡略化しつつ、煙からの影響を仮想空間上と等しく受け取ることが可能となる。



	状態1	状態2	状態3	状態4
煙存在領域	無し	頭上	口の高さ	全体に充滿
煙の感知	無し	感知	感知	感知
煙の吸入	無し	無し	有り	有り

図 4.6: 図 4.5 の状態遷移図におけるエージェントの煙感知の分類



図 4.7: 煙体感装置の制御の段階分けの決定

## 第5章 実装例

煙体感装置を用いたマルチエージェントシミュレータを、FreeWalk/Qと煙体感装置として独立行政法人消防研究所の fire cube を用いて実装を行った。

FreeWalk は仮想空間における参加型マルチエージェントシミュレーションを可能にする仮想都市シミュレータであり、各エージェントの行動ルールはシナリオ記述言語 Q[8] によって記述される。

fire cube[4][9][10][11] とは独立行政法人消防研究所と株式会社フジタにより開発された火災疑似体験シミュレータで、W3.5m × D3.8m × H2.6m の部屋の一面に 150 インチのスクリーンがあり、またヒーターや煙体感装置といった設備を用いることによって全身で火災時の環境を疑似体験できるシステムである。

本実装では、FreeWalk/Q と fire cube の接続を行った。また、火災避難シミュレーションの舞台としてホテル火災を想定した。

煙データは仮想空間を一定の領域ごとに分割し、各領域における煙の高さ、温度などの煙のデータを時系列に沿って計算する火災数値シミュレーション、二層ゾーンモデル [12] から作成された。この煙データを用いて仮想空間の煙の描画を行っている。

fire cube のデバイスは全て設備機器を制御している PLC(Programmable Logic Controller:シーケンサ)と呼ばれる制御機器で行われている。PLC とは RS232C での接続が可能となっており、シリアルポート通信を行って、PLC に制御内容を送信して、そのデータに基づいて PLC が fire cube の煙体感装置を制御する形をとっている。図 5.1 に煙体感装置制御のシーケンス図を示す。シナリオから煙感知コマンドの実行依頼を受けるとエージェントシステム (FreeWalk) は煙データ制御 (煙サーバ) にアクセスし、煙データを取得する。取得した煙のデータを煙の噴出時間を決定する関数に送り、煙噴出時間決定関数は、前回の煙制御の内容と合わせて、煙噴出・排煙時間を決定して PLC に送り、PLC が煙体感装置 (fire cube) に噴出・排煙命令を送る。

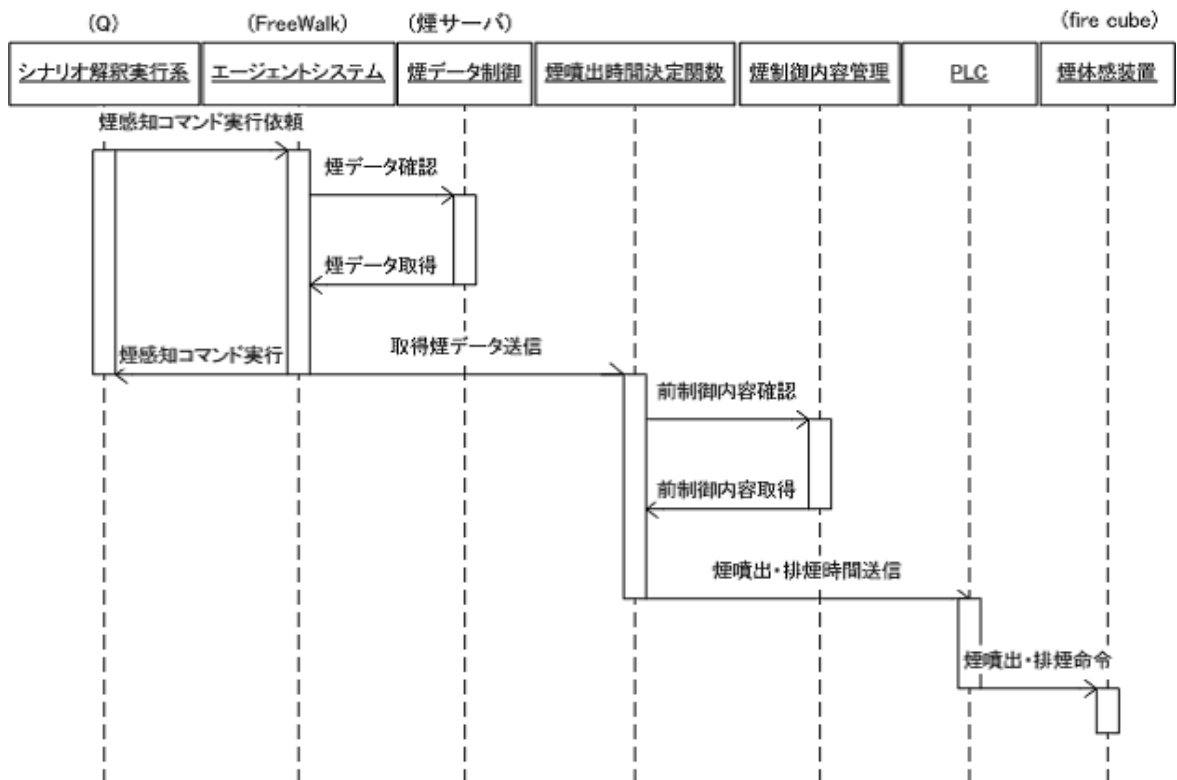


図 5.1: 煙体感装置制御図

煙感知コマンドを 3.2 節の仕様にそって FreeWalk/Q に実装した。煙感知コマンドが実行されると PLC との通信を行う部分に煙データからどれだけ煙を噴出させるのかといった命令を出す。

また、マルチエージェントシミュレータ (FreeWalk) を動作させる PC は fire cube と異なる部屋に存在するため、fire cube 内でアバターを操作できるようにする必要がある。その為、ジョイスティックを用いたインターフェース機能を FreeWalk に実装した。これにより fire cube 内からアバターの操作を行うことが可能となった。

これらの実装により、fire cube 内においてアバター操作者として FreeWalk を用いたマルチエージェント火災避難シミュレーションを行う準備が整った。実際に fire cube 内において FreeWalk での仮想火災避難シミュレーションを行う様子を図 5.2 に示す。



図 5.2: fire cube(独立行政法人消防研究所)におけるアバター操作

## 第6章 考察

本研究では、参加型マルチエージェントシミュレーションを行う際に生じるアバターへの環境変化による影響を再現することを目的とした。

本研究による参加型マルチエージェント避難シミュレーションに与える成果には以下のようなものがあると考察する。

### 1) 環境変化による行動への影響の実現

環境が行動に与える影響には明示的なものと感覚的なものが存在し、CAVEなど視覚による臨場感を与える装置では仮想空間上でシミュレートされる感覚的な環境変化による影響を再現することができなかった。本システムでは同一の感覚的な環境変化による影響を与える要因を仮想空間と現実空間に再現することで明示的、感覚的両方の影響をアバターの行動にも再現し、避難状況時に近い行動決定を行うことを可能とした。これにより、火災避難時の環境変化がアバターも含めた避難時の群集インタラクションに与える影響をシミュレートすることができるようになった。

### 2) シナリオ記述に基づくデバイス制御方法

マルチエージェント避難シミュレーションにおけるアバター操作者には災害状況を忠実に再現することが目的なのではなく、火災避難時の行動決定を再現することが目的となっている為、エージェントの行動ルールに環境変化が与える影響を考慮した記述を行うのに必要となる環境の変化の段階分けに基づいた環境変化の再現を可能にするだけのコントロールが良い。

実装例として煙体感装置を持つVR装置 fire cube と仮想都市シミュレータ FreeWalk/Q を接続することによってアバター操作者に火災時の煙による影響を与えて、より現実に近い参加型マルチエージェント火災避難シミュレーションを可能にするシミュレータを開発した。

FreeWalk はネットワークを通しての複数アバターの参加が可能となっている。現在、消防研究所内にあるデスクトップ端末3台と fire cube がつながっており、4人のアバターとエージェントによるシミュレーションを行う環境が整っている。fire cube 内で操作されるアバターには避難者役を、端末で操作されるアバターには煙によって行動に影響が起らない、例えば消防士のような救助者役を行ってもらって避難訓練シミュレーションを行うということも考えられるし、端末側にも別の避難者役を置いて煙から受ける影響による行動の違いを fire cube 内

の体験者と端末操作の体験者の行動の違いを比較することから分析するといったことも考えられる。今後は外部のネットワークの端末も一緒にシミュレーションを行うことを考えており、インターネットを介して fire cube 内の避難者、端末の避難者、救助者、そしてエージェント群が一つの仮想空間内に集まって火災避難訓練シミュレーションを行うといったことが可能となる。

プロジェクトの価格が低下してきているのに伴い VR 装置が比較的安価に作成できる条件が揃いつつあり、近い将来各地に fire cube のような VR 装置が設置され、一般市民が容易に体験できる環境が整いつつある。将来的にこのようなシステムが多くできればそれらのシステムをつなぐことで多人数の避難者が同時に VR 装置を用いて参加型マルチエージェント避難シミュレーションを体験することができるようになる。インターネットを介してシミュレーションを行う様子のイメージ図を図 6.1 に示す。

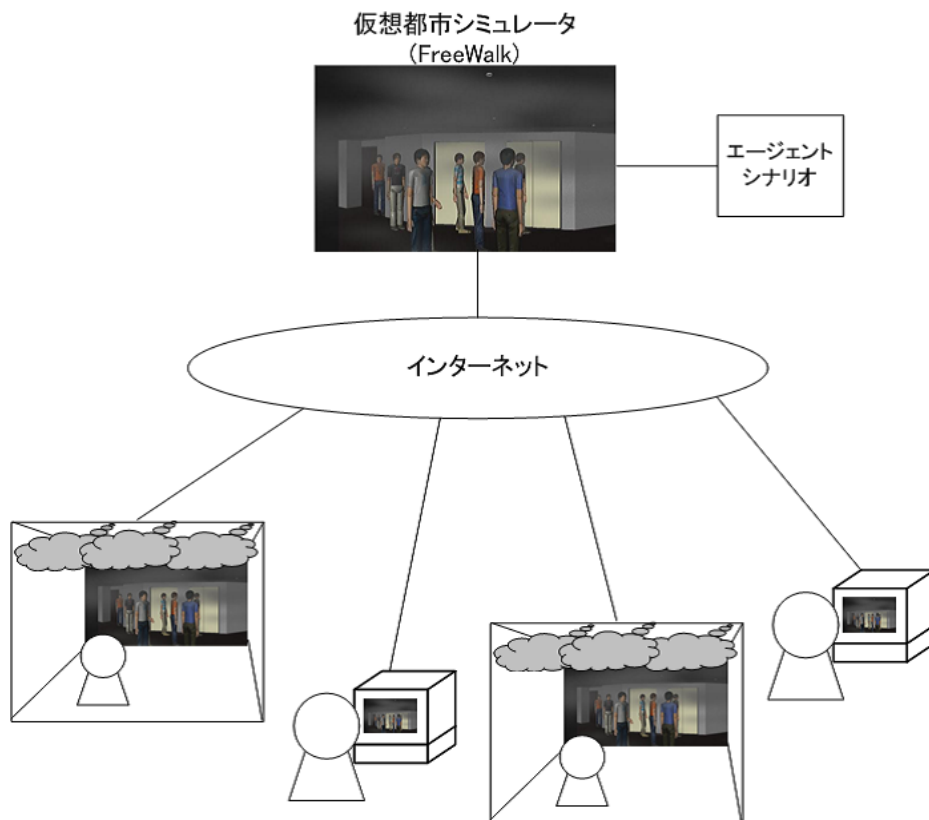


図 6.1: ネットワークを介した参加型マルチエージェントシミュレーション

複数の fire cube の様な VR 装置を用いることで、1 台では端末を用いて環境変

化による行動への影響の有る者と無い者との間のインタラクションしかシミュレートできなかったものを，環境変化による影響を受けた行動を行う避難者同士のインタラクションを再現することができるようになり，避難時の群集行動への環境変化の影響をシミュレートすることが可能となる．それにより，環境変化が避難者の行動の変化がお互いにどういった影響を及ぼしあうのか，また環境変化による影響も考慮したより効果的な誘導法の確立といった研究を実際に人間に体験してもらうことで根拠あるものにしていくことができると考えている．

また，仮想都市シミュレータ FreeWalk は一般の PC にインストールが可能となっている為，市民の方々が fire cube の中で火災避難訓練シミュレーションを行った後に，CD-R 等の形で持ち帰り，自宅のパソコンで fire cube での行動のログをもう一度体験することで避難訓練を一時的なものだけではなく，より理解を深め，身に付けるための事後学習に活用するといったことも可能である．

## 第7章 おわりに

本研究では，既存の参加型マルチエージェントシミュレーションを用いた避難訓練を行う際に生じる問題点であるアバター操作者の仮想空間への没入感を高め，エージェントの火災避難状況における行動決定との差異を減らすことを考えた．その為に，実際に煙を発生させる VR 装置と参加型マルチエージェントシミュレータを接続した．このシミュレータを用いることによる参加型マルチエージェント火災避難シミュレーションへの成果を以下の様に考察する．

### 1) 環境が行動に与える影響の実現

環境が行動に与える影響には明示的なものと感覚的なものが存在し，CAVE など視覚による臨場感を与える装置では仮想空間上でシミュレートされる感覚的な環境変化による影響を再現することができなかった．本研究では火災時に発生する煙による感覚的な環境変化による影響が群集の避難行動に大きな影響を与える要因であると考え，エージェントには煙を知覚する機能を，アバターにはアバター操作者に実際に煙を体感させることで実現した．これにより仮想空間と現実空間に同一の感覚的影響を与える要因を再現し，煙による明示的，感覚的両方の影響をアバターの行動にも再現し，避難状況時に近い行動決定を行うことを可能とした．これにより，火災避難時の環境変化がアバターも含めた避難時の群集インタラクションに与える影響をシミュレートすることができる

ようになった。

## 2) シナリオ記述に基づくデバイス制御方法

仮想空間を現実空間に再現する際に問題となる同期や、マルチエージェント避難シミュレーションにおけるアバター操作者には災害状況を忠実に再現することが目的なのではなく、火災避難時の行動決定を再現することが目的となっている為、エージェントの行動に煙が与える影響を記述するのに必要な段階に分けることができる。

本研究では煙体感装置を持つVR装置 fire cube と仮想都市シミュレータ Free-Walk/Q を用いたシミュレータを実装例として開発した。これにより、体験者は嗅覚など、視覚以外の情報からも煙を体感することで仮想空間のエージェントと近い状況での行動決定を行うことができるようになる。それにより、アバターを含めた避難群集インタラクションをシミュレートすることが可能となり、また仮想空間を現実空間に再現する際に必要となるデバイス制御の方針としてエージェントのシナリオ記述に基づくデバイス制御方法を提案した。

本研究において開発されるシミュレータを用いることで、単純に火災避難訓練を行うだけでなく、煙が避難者の行動にどういった影響を与えるのかといった分析を実際に人間に体験してもらうことを行うといったことも可能になる。これまでに指差誘導、吸着誘導といった避難誘導の誘導法や、これらの誘導方法を用いた避難の仮想空間での再現 [13] が行われてきたが、火災時の煙のような環境変化が人々が煙から逃れようとする行動をとる等、避難行動に大きな影響を与える場合にも同様に有効であるのかの分析や、より効率的な誘導法の確立などにも貢献することができると考えている。

## 謝辞

本研究において、熱心なご指導を頂いた石田亨教授に感謝致します。また、日頃よりご助言頂いた中西英之助手、シミュレータ開発にあたり非常にお世話になった独立行政法人消防研究所の山田常圭先生、阿部伸之先生、株式会社フジタの方々に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 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, Vol. 353, pp. 32-37 (1985).
- [2] Okazaki, S. and Matsushita, S.: A STUDY OF SIMULATION MODEL FOR PEDESTRIAN MOVEMENT WITH EVACUATION AND QUEUING, *Proceeding of the International Conference on Engineering for Crowd Safety*, pp. 271-280 (1993).
- [3] Nakanishi, H. and Ishida, T.: FreeWalk/Q: Social Interaction Platform in Virtual Space, *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 97-104 (2004).
- [4] 飯田明彦, 山田常圭, 阿部伸之, 山田茂, 須賀昌昭, 鈴木修: バーチャルリアリティー技術を用いた火災擬似体験システムの開発, 日本建築学会大会(東海) 学術講演梗概集(防火), pp. 101-102 (2003).
- [5] Cruz-Neira, C., J.Sandin, D. and A.DeFanti, T.: Surroundscreen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE, *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1993).
- [6] Hirose, M.: CABIN - A MultiScreen Display for Computer Experiments, *Proceedings of the 1997 International Conference on Virtual Systems and MultiMedia* (1997).
- [7] Roberts, D., Wolff, R., Otto, O., Kranzlmüller, D., Anthes, C. and Steed, A.: Supporting Social Human Communication between Distributed Walk-in Displays, *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 81-88 (2004).
- [8] 石田亨, 福本理人: インタラクション設計言語 Q の提案, 人工知能学会論文誌, Vol. 17 巻 2 号, pp. 166-109 (2002).
- [9] 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).
- [10] 阿部伸之, 山田常圭, 須賀昌昭: 火災擬似体験装置 (fire cube) について, 第

- 37 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 47–50 (2004).
- [11] 山田常圭, 阿部伸之, 飯田明彦, 山田茂, 須賀昌昭, 鈴木修: バーチャルリアリティー技術を用いた火災擬似体験システムの開発 その2 インタラクティブ機能を有する火災擬似体験構成と適用事例, 日本建築学会大会(北海道) 学術講演梗概集(防火), pp. 245–246 (2004).
- [12] 山田茂, 原田和典, 永井久也, 仁井大策, 田中哮義: 二層ゾーン煙流動予測計算プログラム BRI2 の改善, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2000).
- [13] 南一久, 村上陽平, 河添智幸, 石田亨: マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション, *The 16th Annual Conference of Japanese Society for Artificial Intelligence* (2002).

## 付録