

# 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

## Development of a Para-Experience Multiagent Simulator for a Building Fire

谷塚 俊輔<sup>\*1</sup> 中西 英之<sup>\*1</sup> 石田 亨<sup>\*1</sup> 阿部 伸之<sup>\*2</sup> 山田 常圭<sup>\*2</sup>  
 Shunsuke Taniduka Hideyuki Nakanishi Toru Ishida Nobuyuki Abe Tokiyoshi Yamada

<sup>\*1</sup> 京都大学情報学研究科社会情報学専攻  
 Department of Social Informatics, Kyoto University

<sup>\*2</sup> 独立行政法人消防研究所  
 National Research Institute of Fire and Disaster

A simulation of a fire drill in virtual space is very useful and we should make the simulation more real one. In a fire, smoke influences actions of evacuation people. We developed a para-experience multiagent simulator of fire drills in virtual space. With this simulator, we can simulate the crowd interaction of evacuation people. In this paper, we propose a mapping method from virtual space to real space.

### 1. はじめに

炎や煙を用いた火災避難訓練は一般的に安全性、経済性、時間などの制約が存在し、現実に行くことが困難である。その為、仮想空間において火災避難訓練シミュレーション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。

これまでに 3D 仮想空間の中で火災状況を体験可能なシステムが開発されてきた[Bukowski 1997]。火災状況の視覚化を科学的にリアルタイムで行い、ユーザが直感的に状況を認知することが可能である。しかし、火災状況における群集避難において、他者の行動を認知することが避難行動に影響を与えることから、群集インタラクションを再現するシステムが求められる。

群集を再現するシステムとして、エージェントと呼ばれる計算機上で制御されているキャラクターを用いたマルチエージェントシミュレータが開発されてきた[Nakanishi2004][Branislav 2001]。これらのシステムではユーザが群集の一人としてシミュレーションに参加することを可能としている。しかし、仮想空間上の群集にユーザが参加する場合、ユーザに対して仮想空間への高い没入感が求められる。

高い没入感を可能にするシステムとして、仮想空間での衝撃をハプティックコントロールにより実空間と連動させるものがある[Robert 2004]。身体への衝撃を実空間と連動させ、ユーザにより高い没入感を与え、ユーザが群集の一人として自然に参加することが可能となる。

我々は火災避難シミュレーションに実空間との連動を適用するにあたり、ハプティックコントロールとは異なり、空間を重ねるといったアプローチを取った。衝撃を与えるシステムの場合はユーザに装置を付けることで可能となる。しかし、火災状況では煙や温度等の空間の状況がユーザの行動に対して影響を与える為、このようなアプローチが必要となる。

このアプローチに対して Virtual Reality(以下, VR)装置を用いる。VR 装置を用いた参加型のマルチエージェントシミュレータを擬似体験型マルチエージェントシミュレータと呼ぶ。これにより群集インタラクションを再現したユーザ主観での火災避難シミュレーションが可能となる。

擬似体験型マルチエージェントシミュレータを開発する際には以下の様な課題が存在する。

)仮想空間と現実空間の時間的同期

画面上だけではなく、煙や水などの物理的なものを用いる VR デバイスを制御する場合、求める量が現実空間上に発生するまでには遅延が生じる。その為、仮想空間における状況をそのまま現実空間の体験者に再現しては、時間のずれが発生する。その為、アバターが存在する空間を予測することが必要となる。

)シナリオとデバイス制御データ間のマッピング

仮想空間における煙の描画においては、数値計算やデータベースに基づいた煙の高さ等のデータが用意されその定量的な値に基づいて描画が行われる。しかし、多様なエージェントのシナリオが必要とされるマルチエージェントシミュレーションにおいて、エージェントの認知は定性的に行われるべきである。定量的に行うことを考えた場合、例えば「煙の高さが 1.5m の場合」という認知が存在するとする。この認知はエージェントの身長などによって意味が異なる。その為、「煙を吸い込む」というイベントの観測に対してエージェント毎に異なった記述が必要となり、多様なエージェントシナリオが必要な場合に非常に大きなコストが必要となる。しかし、定性的に「煙の高さが顔の高さの場合」といった記述を行えば、エージェント側に処理を任せられる為、シナリオ記述のコストが軽減される。よって、定量的な煙データとシナリオ間での対応を求めることが必要になる。

本稿ではまず、VR 装置を用いた仮想空間を現実空間上へのマッピングについて考察する。次にマルチエージェントシミュレータと VR 装置についての説明を行う。そして、マルチエージェントシミュレーションによる VR 装置の制御方法について述べる。

### 2. VR 装置を用いた仮想空間の現実空間上への空間マッピング

避難時において環境変化が行動に対して与える影響には明示的ものと感覚的なものがある。壁が崩れて避難経路が無くなり、経路を変更させるものを明示的な影響、自分の周囲に煙が充満してくるとその場にいることを避けようとするものを感覚的な影響と呼ぶことにする。明示的な影響は視覚情報によって与えることができる。しかし、感覚的な影響は人間の嗅覚や触覚、温度感覚など全身の感覚を用いて受け取る。その為、感覚的な影響を与えるものと与えられるものは同一空間上に存在する必要がある。

連絡先: 谷塚俊輔, 京都大学情報学研究科社会情報学専攻,  
 〒606-0801 京都市左京区吉田本町 工学部 10 号館,  
 Tel:075-753-4820, taniduka@lab7.kuis.kyoto-u.ac.jp

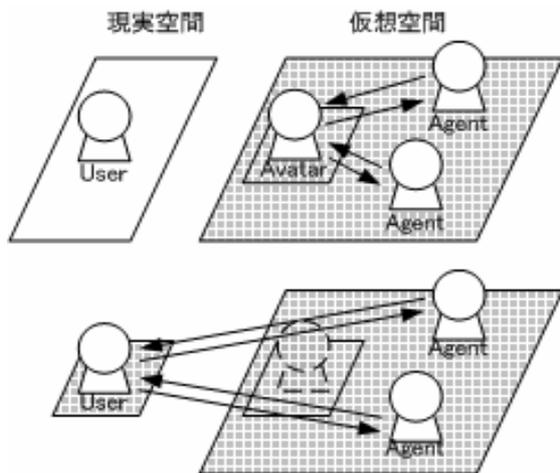


図 1. 現実空間へのマッピングの概念図

火災時において避難者に感覚的な影響を強く与えるものとして煙が考えられる[北後 1985]. 建物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。また煙の中に一定時間以上滞在することによる体調悪化から自力での避難が困難となり、他者に助けを求める、または求められる等のインタラクションが生まれる可能性がある。このことから火災避難シミュレーションを行うにあたり、煙による明示的影響、感覚的影響の再現が必要となる。

そこで、仮想空間を現実空間にマッピングすることが考えられる。現実空間を仮想空間の一部に置き換えることを可能にすれば、感覚的影響を与えることができる。図 1 に現実空間へのマッピングの概念図を示す。ユーザと仮想空間上でユーザが操作するアバター間には空間の隔たりが明示的に存在する為、エージェントとアバターとの間には自然なインタラクションが行えても、アバターの操作を行うユーザには反映されない。仮想空間を現実空間上にマッピングすることにより、ユーザが仮想空間上の環境からの影響を受けることが可能となり、エージェントとの自然なインタラクションが可能となる。

次章ではこのマッピングを可能にする疑似体験型マルチエージェントシミュレータについて述べる。

### 3. 疑似体験型マルチエージェントシミュレータの構成

疑似体験型マルチエージェントシミュレータにおいては以下の要求が満たされる必要がある。

#### ・避難者間のインタラクション

火災避難時においては避難をしている人もいれば、救助を行っている人もおり、様々な役割を担う人々が混在する。これらの人々はそれぞれ完全に独立に避難するのではなく、「声のする方向を向く」、「他の避難者の逃げる方向に付いて行く」、「他者の指差す方向を見る」等のインタラクションが人々の間には存在し、このインタラクションが避難の行動に大きく影響を与える。

この要求を満たす為に VR 装置をマルチエージェントシミュレータに適用し、避難状況における仮想空間上の領域を現実空間へマッピング可能にする疑似体験型マルチエージェントシミュレータが求められる。

疑似体験型マルチエージェントシミュレータ開発にあたり、以下に示す既存の参加型マルチエージェントシミュレータと火災疑似体験装置を用いた。

#### 3.1 参加型マルチエージェントシミュレータ

参加型マルチエージェントシミュレータに FreeWalk[Nakanishi 2004]がある。FreeWalk は仮想空間、エージェントを VRML で記述して、その仮想空間内においてエージェントが行動し、エージェント間で様々なインタラクションを行うことが可能となる仮想都市シミュレータである。この仮想空間内には人間がアバターとして参加でき、一つの仮想空間内にエージェントとアバターが混在し、お互いに様々なインタラクションをとり、行動することで群集行動や避難のシミュレーションを行うことが可能である。また、FreeWalk はマルチエージェント、マルチアバターに対応しており、多数の端末を用いることで複数の参加者がインターネットを介し、一つの仮想空間でシミュレーションに参加することを実現している。

FreeWalk におけるエージェントの振る舞いは、インタラクション設計言語である Q[Ishida 2002]によってエージェントシナリオとして記述される。Q は各エージェントの行動ルールを状態毎に記述し、現象 A を観測すれば行動 B を、現象 C を観測すれば行動 D を実行するといった様に、状態毎に記述する。

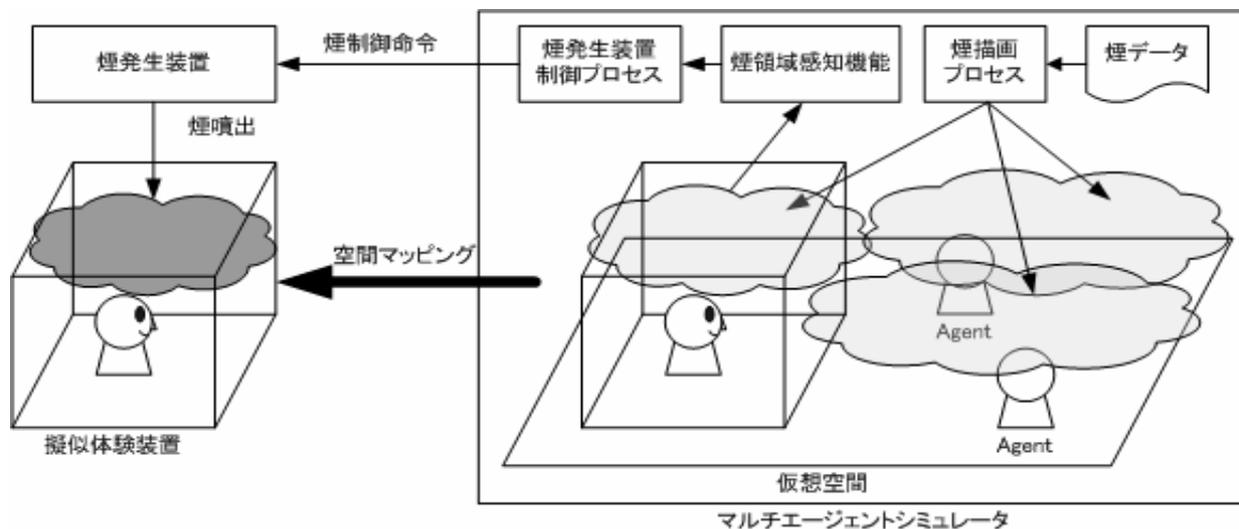


図 2. 疑似体験型マルチエージェントシミュレータシステム構成図

### 3.2 火災擬似体験装置 fire cube

fire cube 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擬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、ヒーターや煙の発生装置等の設備があり、これらを用いることによって全身で火災時の環境を体験できるシステムである。[飯田 2003][山田 2004]。

煙の描画は空間を一定の領域ごとに分割し、火災の発生源、建物のデータなどを入力することでそれぞれの領域における煙を計算する火災数値シミュレーションである二層ゾーンモデル[山田 2000]から計算され、そのデータに基づいた煙をスクリーンに表示すると同時に煙発生装置から実際に煙を噴出させ、温度を上昇させることによって、体験者に実際に火災現場にいるかのような体験を提供する。

### 4. シミュレーションによる擬似体験装置の制御

今回開発したシミュレータでは fire cube の持つデバイスの一つである煙発生装置を用いた。図 2 にマルチエージェントシミュレータと火災擬似体験装置を用いたシミュレータのシステム構成図を示す。アバターが仮想空間において、周囲の煙領域を感知すると煙発生装置の制御プロセスにその領域の煙データを渡す。制御プロセスはそのデータに基づいて煙発生装置に制御命令を行う。煙発生装置は実際の煙をアバター操作者のいる部屋に発生させることで仮想空間上のアバターの周囲の領域を現実空間に再現する。

システムを構築するには以下の 2 点が必要となる。

#### 4.1 煙領域感知機能

アバターの周囲の環境を現実空間にマッピングする為に周囲の煙領域を感知する機能が必要となる。この機能により、煙の感知によるインタラクションルールをエージェントシナリオに記述することも可能となる。煙の中における滞在可能時間として温度変化の二乗の積分値が指標となることが知られている[飯田 2003]。そこで、口の高さに煙が存在する場合に煙を吸入すると定義することで、煙の中での滞在可能時間を制約とするエー

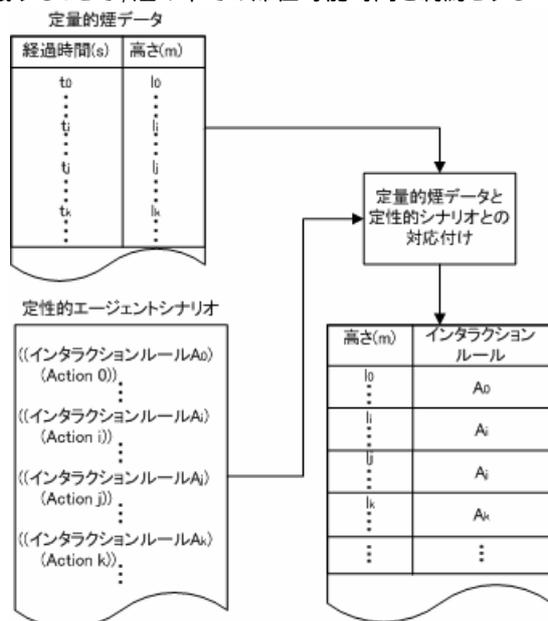


図 3. 定性的シナリオに基づく煙制御の簡略化における処理フロー

エージェントシナリオの記述が可能となる。

### 4.2 仮想空間と現実空間の煙同期制御

煙領域感知機能を用いることでアバターの周囲の煙データを煙制御プロセスに渡すことが可能となる。煙制御プロセスは煙発生装置の制御を行う。仮想空間と現実空間の煙の同期に関しては以下のような課題が存在する。

#### 仮想空間と現実空間の時間的同期

計算だけではなく機械動作が必要となる為、制御命令を出してから実際に煙が噴出されるまでには大きなタイムラグが生じる。また、煙の噴出のみでは煙の高さは降下するだけなので、制御により煙の高さを一定に保つためには煙の噴出と排煙をセットにして行うことが必要となる。その為煙の高さを状態  $i$  にするのに必要な噴出時間を  $A_i$ 、排煙時間を  $B_i$  とすると  $A_i + B_i$  のタイムラグが発生する。そこで、アバターの位置を予測し、予測煙領域の空間マッピングを行う。これにより、仮想空間と現実空間の時間的同期が可能となる。操作者の行動を予測することは非常に困難ではあるが、マルチエージェントシミュレーションにおいては他のエージェントの行動に影響を受けることから予測が可能であると考えられる。現状では避難者の行動に追従性が考えられることから、急な方向転換などが行われないと想定して、アバターの進行方向上に予測を行っている。予測座標が現在座標の煙領域と異なる場合にはアバターの予測煙感知領域の煙データを用いることでタイムラグを減らすことが可能となる。現在座標を  $(x \ y \ z)^T$ 、速度ベクトルを  $(v_x \ v_y \ 0)^T$  とおく。予測時間を  $t$  とすると、予測座標  $(x_f \ y_f \ z_f)^T$  は以下の式で求められる。

$$(x_f \ y_f \ z_f)^T = (x \ y \ z)^T + (v_x \ v_y \ 0)^T \times t$$

煙領域  $i$  を  $(x_{i1} \ y_{i1} \ z_{i1})^T, (x_{i2} \ y_{i2} \ z_{i2})^T$  と定義すると、求められた予測座標が以下の条件を満たす煙領域  $i$  のデータを用いる。

$$\begin{cases} x_{i1} < x_f < x_{i2} \\ y_{i1} < y_f < y_{i2} \\ z_{i1} < z_f < z_{i2} \end{cases}$$

#### シナリオとデバイス制御データ間のマッピング

煙デバイスの制御は仮想空間上における煙の高さを完全に現実空間に実現できることが理想である。しかし、時間的同期と同様に、現在のデバイス性能では非常に困難である。

また、エージェントシナリオは定性的に記述されており、ユーザとエージェントが対等なインタラクションを行うには、ユーザも定性的に煙を感知すると考えられる。そこで、煙の高さをエージェントシナリオの記述に対応させることが必要となる。エージェントシナリオの定性的に記述された煙とのインタラクション部と定量的な煙データとの対応をとり、その対応付けから定性的なシナリオに基づいた制御を行う。それにより現実世界での煙制御の簡略化も行うことが可能となる。

避難エージェントのシナリオは防災の専門家等に依頼することを仮定している為、シナリオにおける煙とのインタラクションの記述は正しいと仮定できる。これにより煙の高さの制御を定性的なエージェントシナリオに基づいて行うことができる。

図 3 に煙データの高さと煙とのインタラクションルールの対応をとる際の処理フローを示す。煙の高さが  $l_i$  から  $l_j$  の間にはインタラクションルール  $A_i$  が発火するという様にマッピングを行う。

実装例として、FreeWalk/Q と fire cube を用いて擬似体験型マルチエージェントシミュレータを実装した。



図4. fire cube 内における FreeWalk を用いた避難シミュレーション(独立行政法人消防研究所)

FreeWalk/Q で作り出される仮想空間上でのアバターの煙感知領域の煙データと避難者エージェントのシナリオ記述との対応を求め、それに基づき煙制御を行った。

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った煙噴出前、後の写真を図4に示す。

## 5. おわりに

本研究では VR 装置をマルチエージェントシミュレーションに適用し、避難環境における明示的、感覚的影響をユーザに対して再現することを可能にした。これにより群集インタラクションを再現した火災避難シミュレーションが可能となった。

本研究における課題は以下の通りであった。

①仮想空間と現実空間の時間的同期

仮想空間をユーザのいる現実空間にマッピングする際にデバイス性能によるタイムラグを失くすことが求められる。ハード面では煙発生装置や排煙装置の高性能化、ソフト面では群集における人間の避難行動などからの避難行動の予測により減少させることが可能となる。

②シナリオとデバイス制御データ間のマッピング

仮想空間における煙の描画においては、計算に基づく煙の高さ等のデータを定量的に扱う。しかし、エージェントシナリオでは煙に対するインタラクションを定性的に扱う。その為、両者の対応をとることが求められる。それにより、デバイス制御の簡略化も同時に行うことが可能となる。

本シミュレータにより、これまでは困難であった火災避難時におけるエージェントシナリオの精練をユーザとの自然なインタラクションから可能にする。これにより、火災避難時におけるより効果的な誘導法の確立等も可能となる。

また、今回開発した疑似体験型マルチエージェントシミュレータでは FreeWalk/Q を用いていることから、インターネットを介して複数の参加者が同一仮想空間に集まることが可能となっている。プロジェクトの価格が低くなってきているのに伴い fire cube のようなシステムが比較的安価に作成できる条件が揃いつつある。その為、このようなシステムが各地に設置され、地理的に離

れた市民同士が容易に避難訓練シミュレーションを同時に体験できる環境が整い、大規模な火災避難シミュレーションを行うことが可能となる。

## 謝辞

今回のシミュレータ開発にあたり非常にお世話になった株式会社フジタの方々に深く感謝致します。

## 参考文献

- [Bukowski 1997] Richard Bukowski, and Carlo Sequin: The Firewalk System: Fire Modeling in Interactive Virtual Environments, the Second International Conference on Fire Research and Engineering, 1997.
- [Branislav 2001] Branislav Ulicny, Daniel Thalmann: Crowd simulation for interactive virtual environments and VR training systems, Proc. Eurographics Workshop on Animation and Simulation, 2001.
- [Nakanishi 2004] Hideyuki Nakanishi, Toru Ishida: FreeWalk/Q: Social Interaction Platform in Virtual Space, ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp.97-104, 2004.
- [Robert 2004] Robert W. Lindeman, Robert Page, Yasuyuki Yanagida and John L. Sibert: Towards Full-Body Haptic Feedback: The Design and Deployment of a Spatialized Vibrotactile Feedback System, Proceedings of the ACM VRST (Virtual Reality Software Technology) 2004, pp.146-149, Hong Kong, November 2004.
- [北後 1985] 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第 353 号, pp.32-37, 1985.
- [Ishida 2002] Ishida, T. Q: A Scenario Description Language for Interactive Agents, IEEE Computer, 35(11), pp.54-59, 2002.
- [飯田 2003] 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: パ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.
- [山田 2004] 山田常圭, 阿部伸之, 飯田明彦, 山田茂, 須賀昌昭, 鈴木修: パーチャルリアリティー技術を用いた火災疑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疑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.
- [山田 2000] 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.