

## 歩行者軌跡データを用いた仮想都市群集シミュレーション

板倉 豊和† 石田 亨†

本稿では歩行者の詳細な軌跡データを用い、3次元仮想都市における地点間の遷移と歩行者・環境とのインタラクションの両方を実現する群集シミュレーションモデルの構築法を提案する。我々は始めに都市空間の歩行者の歩行行動をモデル化した。次に軌跡データを解析し地点間の遷移確率が過去の経由地点に依存すること、そして2次元の軌跡データを一旦3次元仮想都市で再現することで歩行者・都市環境とのインタラクションが抽出できることを解析結果として得た。それらの解析結果を基に、歩行行動モデルを具体化し、階層型のシミュレーションモデルを構築した。最後にシミュレーションモデルを実装し、地点間の確率遷移、歩行者・環境とのインタラクションが現実の群集を再現していることを確認した。

## Crowd Simulation in Virtual Cities by Tracking Pedestrians

Toyokazu ITAKURA† Toru ISHIDA†

In this paper, we propose a modeling method for a crowd simulation model in 3D virtual cities, which realizes the transition among spots and the interaction among walkers and environments, with accurate pedestrians' tracking data. We first modeled pedestrians in an urban area, and we analyzed the tracking data. As the results of the analysis, we got the knowledge that the transition probabilities have a dependence on some spots which a pedestrian passed by, and that the interaction was able to be got by reproducing the 2D tracking data to the 3D virtual city. Based on the results of the analysis, we made the model concrete and constructed the hierarchical simulation model. Finally, we implemented the simulation model, and confirmed that the crowds in the urban area could be reproduced by the transition probabilities and the interactions.

### 1 はじめに

近年、私達が普段生活している都市空間をコンピュータ上に「デジタルシティ」として再現する活動が多く行われている[1][2]。デジタルシティは、都市空間そのものをコンピュータ上に2次元の地図、または3次元のリアルな仮想空間などとして表現される。デジタルシティでは、現実の都市空間の情報は人々が享受しやすい形で仮想都市空間上に置かれ、市民はデジタルシティを通じて様々な有益な情報を得、活動を行うことができる[3]。

現実空間のコンピュータ上での表現方法のひとつとして、リアルな3次元の仮想都市が考えられる。この

†京都大学情報学研究科社会情報学専攻  
Department of Social Informatics, Graduate School of Informatics, Kyoto University

3次元仮想都市の中では、コンピュータに制御されているキャラクタ(エージェント)と、市民がユーザとして操作しているキャラクタ(アバター)とが混在し、様々なインタラクションを行いながら活動する。

リアルな3次元仮想都市として表現されるデジタルシティの一番の特徴は、ユーザがアバターを通じて参加するということである。デジタルシティに参加しているユーザがその仮想都市にどのくらい現実感を感じるかどうかは、都市空間自体の再現性の高さとは別に、その都市空間内で活動している他の歩行者、群集の歩行行動の再現性の高さが重要な要因となる。いくらリアルな都市空間が再現されていても、群集の歩行の様子が現実離れしていると、ユーザは現実感を感じることができない。

仮想的な都市空間の中に複数の歩行者(群集)を再

現する（シミュレートする）場合、歩行者が従うべき規則、シミュレーションモデルが必要となる。3次元仮想都市での群集シミュレーションでは、既存のシミュレーション研究の大きな2つの目的、「地点間の遷移を基礎とした群集アニメーション生成」[5]と「物理的・社会的なルールを基礎とした、歩行者・環境とのインタラクション」[7]を同時に実現するようなシミュレーションモデルが必要となる。本稿では、このようなシミュレーションモデルを、現実の都市空間を歩行する歩行者の詳細な歩行軌跡を記録した軌跡データを用いて実現することを目指す。

本稿ではまず2章で本研究で用いる軌跡データの収集について、そしてその軌跡データの解析について述べる。続く第3章では、2章での解析結果を踏まえ、軌跡データの利用を前提にしてシミュレーションモデルを設計する。第4章では設計したシミュレーションモデルを実装してシミュレーション結果を評価し、第5章では本稿のまとめを行う。

## 2 軌跡データの解析

### 2.1 研究のプロセス

下図1は本研究の研究プロセスである。

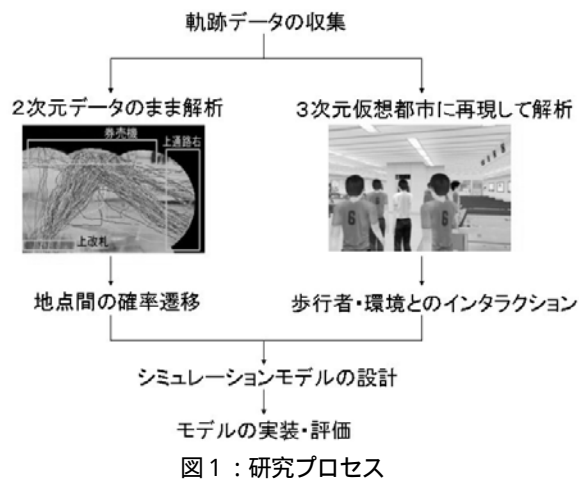


図1：研究プロセス

まず始めに、研究で用いる軌跡データを、地下鉄京都駅に設置されている天井カメラの映像から抽出した。得られた軌跡データは2次元の時系列データであるが、その軌跡データを2次元のまま解析することで歩行者の都市空間内の地点間遷移について、また2次元軌跡データを3次元仮想都市空間に再現して解析することで歩行者や環境とのインタラクションについての解析結果を得た。そしてそれらの解析結果を基に、軌跡デ

ータを用いたシミュレーションモデルの設計を行い、最後に実際にモデルを実装し評価を行った。

### 2.1 軌跡データの収集

本研究で用いる歩行者の軌跡データは、京都市営地下鉄京都駅のコンコース階とプラットフォーム階の天井に設置された特殊なカメラの映像から抽出されたものである[4]。図2は、設置されたカメラとコンコース階でのカメラ12機の配置図（がカメラ位置）である。

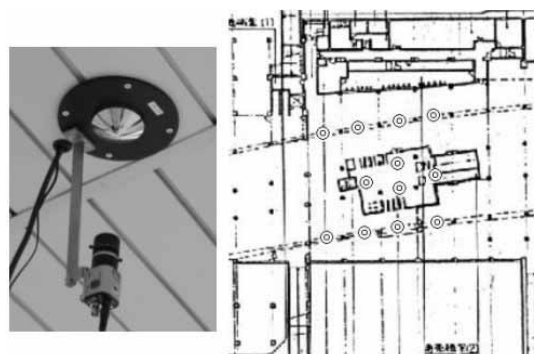


図2：カメラとコンコース階のカメラ配置図

カメラで撮影された映像において、歩行者一人一人の足元をマウスでドラッグすることにより比較的広範囲で、かつ詳細な歩行者の軌跡データを抽出した。抽出した軌跡データは、午前7時～午前8時の時間帯のもので、コンコース階約1,700人分である。

```
ID: 120
...
1333 (1432.28 , 3146.32)
1367 (1426.41 , 3146.32)
1400 (1410.30 , 3154.03)
...
```

軌跡データは、上の例のように、歩行者IDと、1フレーム＝約33msごとの座標(x座標、y座標)を持つ時系列データである。

### 2.2 都市空間を歩行する歩行者のモデル化

都市空間を歩行する歩行者は、何らかの目的を持っている。駅で「電車に乗る」という目的を持つ場合には、まず券売機で乗車券を買い、改札を通り、プラットフォームに向かう。このように目的を持って歩行している歩行者は、都市空間内の数地点を目的地として設定し、その数地点を経由しながら最終目的地まで歩行する。歩行中には他歩行者もしくは都市環境とのインタラクションを行っている。本研究では都市空間を歩

行する歩行者の歩行行動を下図3のようにモデル化した。

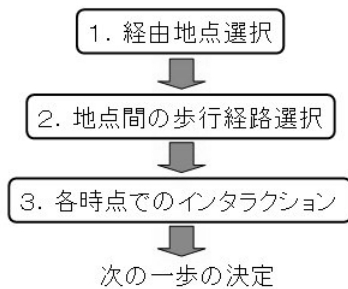


図3：歩行者の歩行行動のモデル化

次節以降、この1～3のモデル化に従い、実際に軌跡データを用いて各段階の群集の歩行行動を解析していく。

## 2.3 都市空間全体での歩行解析

### 2.3.1 地点間の遷移解析

図3でモデル化した歩行行動の「1. 経由地点の選択」について軌跡データの解析を行った。歩行者の経由地点は、軌跡データから得られる。2次元の都市空間をメッシュ状に分割し軌跡データを再プロットすることで、歩行者の滞留が頻繁に起こる地点（歩行者が立ち止まる地点）、歩行者が頻繁に通過する地点などを求めることができる。

図4は地下鉄京都駅コンコース階における天井カメラの映像に歩行者の軌跡をプロットしたものであり、四角で表されているのが出現地点・経由地点として得られた地点である。

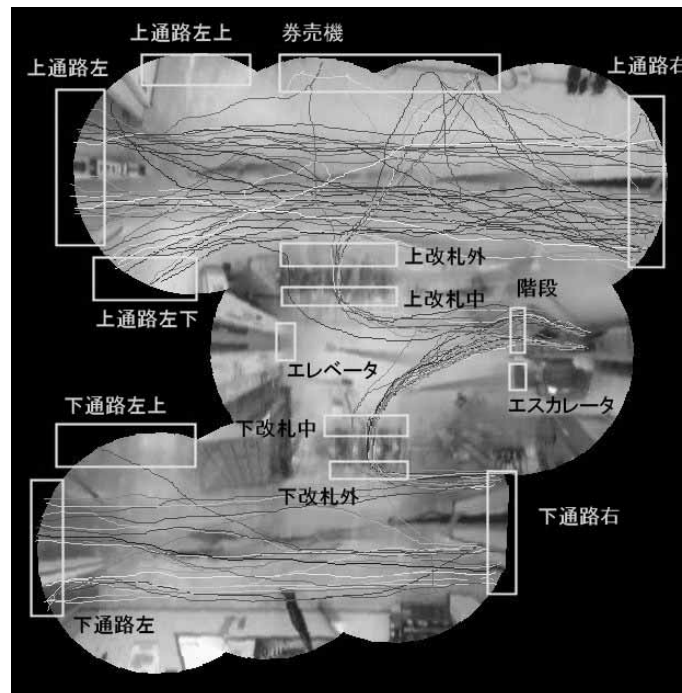


図4：地下鉄コンコース階の歩行者の流れ

歩行者の歩行はこれらの地点間の移動を基本に行われる。歩行者の軌跡を見ると、「上通路右 券売機 上改札外 上改札中 階段」と経由している。歩行者は経由地点を遷移しながら歩行するが、ある地点からある地点へ遷移する確率は、一般的に、過去に経由した  $N$  地点に依存する、つまり「 $N$  重マルコフモデル」で表現されると考えられる。例えば、改札を通過した歩行者を考えると、その前に券売機を経由してきた歩行者の多くは次にプラットフォーム

に進み、プラットフォームから来た歩行者の多くは通路に向かう。このように次の経由地点（通路 or プラットホーム）への遷移確率は現在の地点（改札）だけでなく、過去の地点（券売機 or プラットホーム）に依存する。

今、次に進む地点  $X_t$  が、過去に通過した  $N$  地点に依存する時、地点  $X_t$  に進む確率  $P(X_t | X_{t-1} X_{t-2} \dots X_{t-N})$  は、以下の通りに求められる。

$$P(X_t | X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N}) = \frac{C(X_t X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N})}{C(X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N})}$$

$C(X_t X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N})$  :  $X_t X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N}$  という地点を経由する軌跡データの個数

実際、コンコース階において経路地点間の遷移確率を計算したところ、その確率は過去の2地点に依存し、「2重マルコフモデル」で表されることがわかった。

### 2.3.2 地点間の詳細な経路解析

次に、図3の第2段階にあたる「2.地点間の具体的な経路の選択」について軌跡データを解析した。下図5は上通路右と券売機という地点を、いくつかの小領域に分割した図である。上通路右は7、券売機は10の小領域に分割した。

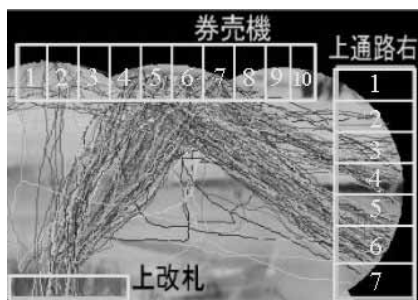


図5：各地点の小領域への分割

この小領域間遷移の確率も、ただ2地点間で決まるものではなく、一般的には過去のN地点に依存すると考えられる。実際にコンコース階にて各小領域の選択確率と過去に経由した地点との関係を求めたところ、過去に経由した2地点に依存することがわかった。例えば、一度駅員のいる改札口に立ち寄った歩行者は、券売機に向かった後、再度駅員のいる改札を通る傾向が見られた。

## 2.4 インタラクシオンを中心とした歩行解析

### 2.4.1 2次元軌跡データの3次元仮想都市への再現

本研究で利用する軌跡データは、2次元平面上のデータである。本研究では、3次元仮想都市空間を用い、2次元の軌跡データを仮想都市内に再現することでインタラクシオン解析を行った。2次元の軌跡データを3次元の仮想空間に再び3次元の仮想歩

行者として再現する利点は、欠落していた情報が再現され、歩行者の視界を得ることができることである。3次元仮想都市に歩行者が再現されることで、より現実に近いインタラクシオン解析を行えるのではないかと考えた。これは本研究の大きな特徴である。3次元仮想都市での歩行者の再現は、仮想都市シミュレーション環境 FreeWalk[8]上に行った。

### 2.4.2 他歩行者とのインタラクシオン解析

図3の「3.各時点のインタラクシオン」、その中でも歩行者とのインタラクシオンについて軌跡データを解析する。一般的に、インタラクシオンは知覚される歩行者の情報をういて行われる。ここで前節で述べた通り、軌跡データを3次元仮想都市空間を歩行する歩行者として再現して解析を行うことで、歩行者の知覚情報をより正確に得ることができる。

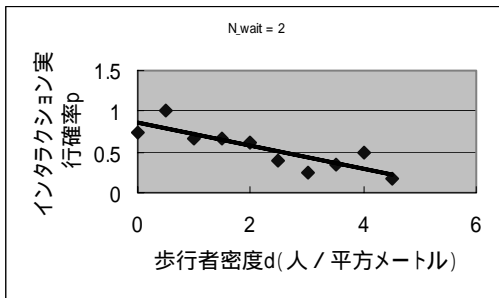


図6：3次元仮想都市に再現された軌跡データの歩行者の持つ視界

図6は、上改札を改札の中から外へ出ようとしている歩行者の視界である。観測により、歩行者がある改札を通過しようとしているときの、

通過予定の改札口に並んでいる歩行者数  $N_{wait}$   
 周囲の歩行者（視界内の歩行者）の密度  $d$   
 他の改札へ移る確率  $p$

を求めた。下のグラフは、 $N_{wait}=2$  のときの密度  $d$  と他の改札へ移る確率  $p$  をプロットしたものである。密度は、0.5ごとに離散化されている。グラフより、密度  $d$  と確率  $p$  は相関係数は0.736となり、 $d$  と  $p$  は相関があることがわかった。この傾向は、直感的には「自分が通過しようとしている改札口に他の歩行者が並んでいたとき、周囲が混雑していなければ他の改札へ移る確率が高くなる」ということである。



このように改札付近の歩行者を解析することで、他の改札に移るといったインタラクションの実行確率  $p$  を、 $p(N_{wait}, d)$  として表すことができた。

#### 2.4.3 環境とのインタラクション解析

本項では環境とのインタラクション解析を考える。環境とのインタラクションも一般的に、歩行者の得る都市環境に関する知覚情報により行われる。よって、軌跡データを3次元仮想都市に再現すると、歩行者が何に対してインタラクションを行っているか、ということがはっきりと考えられる。

下図7はコンコース階の軌跡データをプロットしたものだが、円で囲んだ付近で歩行者が頻繁に立ち止まっている様子が観測された。

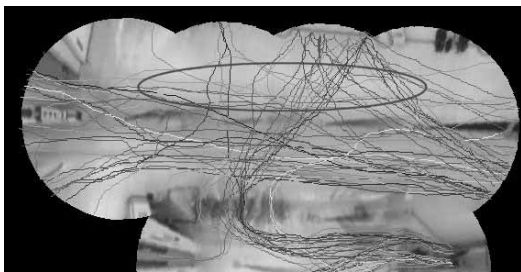


図7：歩行者が頻繁に立ち止まっている地帯

この地帯を3次元仮想都市に再現した軌跡データにより解析すると、下図8のとおり、券売機の上にある路線図・運賃表を見るために立ち止まっていることがわかった。

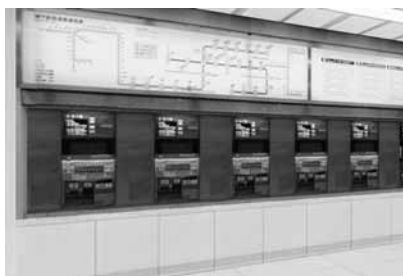


図8：仮想空間内の券売機上の路線図

このインタラクションは、「if 知覚 then 行動」という形で、

**if see map then stop**

のような簡単な if-then ルールとして記述することができる。

#### 2.5 軌跡データの解析結果

地下鉄京都駅コンコース階の軌跡データについて、前節までで得られた解析結果をまとめると、下表1のようになる。2次元の軌跡データをそのまま解析することで都市空間内の地点間の歩行者の遷移確率について、そして2次元軌跡データを一旦3次元の仮想都市空間に再現することで歩行者・環境とのインタラクションについての知見を得た。

表1：軌跡データの解析結果

解析方法	解析の目的	解析結果
2次元データのま	地点間の遷移	2重マルコフに従う地点間遷移
	地点間の詳細な経路選択	過去の2地点に依存する経路選択確率
3次元仮想都市への再現	歩行者とのインタラクション	周囲の歩行者の数・密度とインタラクション実行確率の相関関係
	環境とのインタラクション	インタラクション・ルールの抽出

### 3 シミュレーションモデルの設計

#### 3.1 軌跡データを用いたモデルの具体化

第2章において、比較的広範囲な歩行者の詳細な軌跡データを解析し、図3の各段階について解析結果として知見を得た。本節では、それらの知見を基に、軌跡データを用いることを前提にしてシミュレーションモデルを具体化する。

シミュレーションモデル全体を  $M$ 、軌跡データ解析に基づく各段階をそれぞれ  $M_I$ 、 $M_{II}$ 、 $M_{III}$ 、 $M_{IV}$  とする。以下では、各段階について詳しく述べる。

#### 3.2 地点間確率遷移

シミュレーションの中で歩行者は過去の  $N$  地点に依存する  $N$  重マルコフモデルに従う確率遷移によって次の経由地点を確率的に選択しながら歩行する。コンコース階においては、軌跡データ解析でわかったように、この遷移は2重マルコフモデルで表され

た。

シミュレーションモデルの中での  $M_I$  の役割は、次の経由地点（次の目標地点）を確率的に決定することである。つまり、 $M_I$  の役割としては、次に進むべき地点を  $X_t$  とすると、過去に通過した  $N$  地点  $X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N}$  から  $X_t$  を求めることであり、

$$X_t \leftarrow M_I(X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-N})$$

と定義することができる。歩行者の出現地点は  $X_0$  で表す。

### 3.3 地点間の詳細な確率的経路選択

各経由地点を小領域に分割すると、ある小領域からの次の目的地点内の小領域選択の確率は、過去に通過した  $N$  地点に依存すると考えられる。軌跡データ解析でわかったとおり、コンコース階においてはこれは過去の 2 地点に依存し、実際に小領域間の確率を計算しておくことができる。

実際に歩行者を歩行させるには、次の一步を踏み出す方向を決定しなくてはならない。次の一步を踏み出す方向（ベクトル） $dir_{next}$  は、

$$\begin{aligned} dir_{next} &= pos_{next} - pos_{now} \\ pos_{next} &: \text{次の目標座標} \\ pos_{now} &: \text{歩行者が現在存在している座標} \end{aligned}$$

と求めることができる。 $M_I$  で求めた次の経由地点  $X_t$  内に目標とする座標  $pos_{next}$  を定めれば、歩行者は次の目的地に向かう次の一步を決定できる。解析結果として得られたように、次の目標座標  $pos_{next}$  は現在の（地点  $X_{t-1}$  内の）座標  $pos_{now}$  と、過去に経由した  $N$  地点に依存すると考えられる。よって  $M_{II}$  の役割は、 $M_I$  で求めた  $X_t$ 、および  $pos_{now}$ 、そして過去の  $N$  個の通過地点  $X_t X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N}$  から次の目標座標  $pos_{next}$  を求めることであり、

$$pos_{next} \leftarrow M_{II}(X_t, pos_{now}, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-N})$$

と定義される。

### 3.4 周囲の状況に応じた経路選択

インタラクション解析により、歩行者の視界に入る情報を  $I_{view}$  を用いて、歩行者とのインタラクションを求めることができることがわかった。 $M_{III}$  では、インタラクションの結果、 $M_{II}$  で求めた目標座標

$pos_{next}$  を変更しなくてはならないようなインタラクションを規定する。例えば、解析によって得られた、周囲の歩行者密度により通過する改札口を変えるインタラクションがこのインタラクションにあたる。 $I_{view}$  を基にした他歩行者・環境とのインタラクションにより変更された目標座標を  $pos'_{next}$  とする。本段階は、視界に入る情報  $I_{view}$  より、インタラクションを行わせて目標座標  $pos_{next}$  の変更が必要な際には変化した目標座標  $pos_{next}$  を求めることを目的としており、

$$pos'_{next} \leftarrow M_{III}(pos_{next}, pos_{now}, I_{view})$$

と定義される。

実際には、軌跡データ解析でわかったように、現在の座標  $I_{view}$  として周囲の歩行者の数・密度をとると、現在目標としている改札口  $pos_{next}$  から他の改札口  $pos'_{next}$  へ移る確率が求められるため、この確率に従って  $pos'_{next}$  へ目標座標を変化させるようなインタラクションを行うことができる。

### 3.5 歩行者・環境とのインタラクション

$M_{IV}$  では、目標座標を変更する必要のないインタラクションを扱う。目標座標自体は  $pos_{next}$ （もしくは  $pos'_{next}$ ）のまま変化はないが、次の一步を踏み出す方向  $dir_{next}$  がインタラクションに従って  $dir'_{next}$  へ修正される。

$M_{IV}$  の目的は、現在の自分の座標  $pos_{now}$  と、目標としている（ $M_{III}$  で修正された）座標である  $pos'_{next}$ 、そして自分の視界で得られる周囲の情報  $I_{view}$  により次の一步を踏み出す方向  $dir_{next}$  を  $dir'_{next}$  へと修正することであり、

$$dir'_{next} \leftarrow M_{IV}(pos'_{next}, pos_{now}, I_{view})$$

と定義される。

解析結果として得られたように、 $I_{view}$  として券売機上の路線図を知覚すれば、インタラクション・ルールに従って歩行を停止することができる。また、解析可能なインタラクションとは別に、常に行われる最も低レベルなインタラクションとして、都市空間内の歩行者や障害物との物理的な衝突を回避するインタラクション[6]もこの段階で実現される。

### 3.6 シミュレーションモデルの具体的な動作

第2章で行った軌跡データ解析の結果を踏まえ、各段階で、歩行者が出現してから経由地点の遷移を行いながら、下図8のとおり、次の一步の決定を行うまでを実装できる形にまで具体化した。歩行者は図8で示した計算の流れに従い、次の一步を生成する。

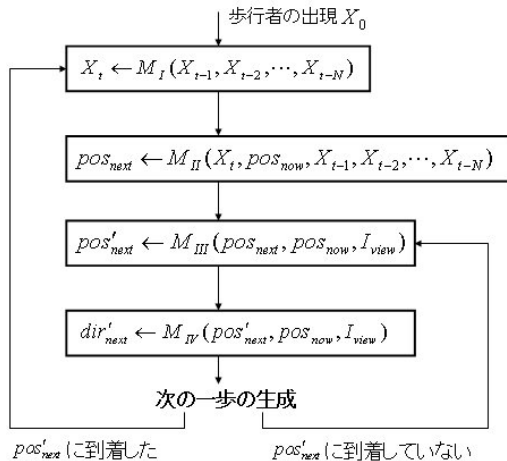


図8：具体化された4階層シミュレーションモデル

## 4 実装と評価

前章で述べたシミュレーションモデルの設計に従い、軌跡データを用いてモデルを実装した。実装はFreeWalk 上に行い、地下鉄京都駅のコンコース階の歩行者300人分の軌跡データを用いた。実装したモデルを評価するにあたり、地下鉄京都駅の歩行者軌跡データから10分間のデータを選び、このデータとシミュレーションによる結果を比較することでモデルを評価した。

まず電車到着直後ではない、歩行者密度が疎な場合のシミュレーションを行い、データと比較した。改札や階段、券売機での平均通過人数(人/分)と平均速度(m/s)とを比較したところ、ほぼ歩行の傾向が再現できていた。歩行者密度が疎で歩行者間でインタラクションはほとんど起こらないため、この結果から、シミュレーションモデルの確率遷移部分の正しさを確認した。

電車が到着した直後は、プラットフォーム階から電車から降りた群集が大量にコンコース階に上ってくるため、非常に混雑しインタラクションが多く発生

する。特に混雑するのは改札付近である。軌跡データより、電車が到着した直後の時間帯10分間についてのデータを抜き出した。この10分間に出現した歩行者は830人であったので、この830人を、各出発地点の確率に従い、ポアソン分布による単位時間出現人数により各出発地点に出現させることによってシミュレーションを行った(図9)。

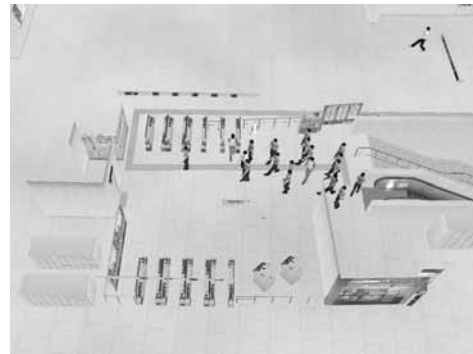


図9：電車到着直後のシミュレーション

下の表2は、電車到着直後の上改札と階段における実際の歩行者の軌跡データとシミュレーション結果の比較である。平均通過人数(人/分)と平均速度(m/s)とを比較した。

表2：シミュレーション実行結果

測定場所	平均通過人数		平均速度	
	データ	結果	データ	結果
上改札1(外 中)	0	0	0.0	0.0
上改札1(中 外)	19	20	1.23	1.15
上改札2(外 中)	0	0	0.0	0.0
上改札2(中 外)	13	16	1.34	1.23
上改札3(外 中)	0	0	0.0	0.0
上改札3(中 外)	7	6	1.33	1.30
上改札4(外 中)	3	4	1.45	1.48
上改札4(中 外)	0	0	0.0	0.0
上改札5(外 中)	2	1	1.02	1.44
上改札5(中 外)	3	1	1.00	1.3
階段(上 下)	7	9	0.76	0.60
階段(下 上)	70	68	0.95	0.80

このシミュレーション実行前に行った、改札選択に関するインタラクションを考慮しない場合のシミュレーションでは、1つの改札口に歩行者が集中してしまい、各改札口の平均通過人数が再現できなかった。このことを踏まえて表2を見ると、モデルに組み込んだインタラクションが正しく機能し、歩行者

が改札を通過する傾向はほぼ再現できていることがわかる。ここで表2において上改札5は自動改札ではなく駅員のいる改札だが、ここでは歩行者は一度立ち止まることが多いため、現実のデータでは歩行速度が他の改札と比べて遅くなっている。シミュレーションモデルのインタラクションのルールにはこの改札についてのルールを入れていないため、実データよりも速度が速くなっていると考えられる。

## 5 おわりに

本稿では、3次元仮想都市での群集シミュレーションに必要なシミュレーションモデルを、歩行者の軌跡データを用いて構築することを目指した。構築にあたり軌跡データの解析を、2次元データのまま行うことで地点間の確率遷移に関する知見を、そして軌跡データを3次元仮想都市に再現して解析することでインタラクションに関する知見を得た(表1)。

そしてこれらの知見を基に、地点間の遷移を行い、歩行者・環境とのインタラクションも行う、群集シミュレーションモデルを具体化した。そして最後に具体化されたモデルを実装し、評価を行って地下鉄京都駅コンコース階の歩行者の歩行の傾向が再現できていることを確認した。将来的にさらに広範囲において詳細な軌跡データが得られれば、より具体的な歩行者・環境とのインタラクションが解析でき、デジタルシティとしての群集シミュレーションの有用性はさらに高まると考えられる。本研究のアイデア・貢献は以下の通りである。

- ・ 軌跡データを用いた群集シミュレーションモデル構築  
詳細な軌跡データを解析し、都市空間内の地点間確率遷移、歩行者・環境とのインタラクションを行う群集シミュレーションモデルを構築した
- ・ 3次元仮想都市でのインタラクション解析  
2次元の軌跡データを3次元仮想都市空間に再現することで、現実の歩行者に近い状況で他歩行者や環境とのインタラクション解析を行った

## 謝辞

本研究を行う環境を与えていただいた JST「デジタルシティのユニバーサルデザイン」プロジェクトに関わる皆様、そして京都市交通局のご協力に深謝いたします。

## 参考文献

- [1] Toru Ishida, Katherine Isbister Eds : Digital Cities: Experiences, Technologies and Future Perspectives. Lecture Notes in Computer Science, 1765, Springer-Verlag, 2000.
- [2] Makoto Tanabe, Peter van den Besselaar, Toru Ishida Eds : Digital Cities II: Computational and Sociological Approaches, Lecture Notes in Computer Science, 2362, Springer-Verlag, 2002.
- [3] Toru Ishida : Digital City Kyoto: Social Information Infrastructure for Everyday Life. Communications of the ACM (CACM), Vol. 45, No. 7, pp. 76-81, 2002.
- [4] 小泉智史, 中西英之, 石黒浩, 石田亨 : 視覚センサネットワークを用いた避難シミュレータとその実験構想, 第17回人工知能学会全国大会, Jun. 2003.
- [5] Soraia Raupp Musse, Daniel Thalmann: Hierarchical Model for Real Time Simulation of Virtual Human Crowds: IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, VOL.7, NO.2, APRIL-JUNE 2001.
- [6] 岡崎甚幸, 松下聡 : 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 - その1 磁気モデルの応用による歩行モデル -, 日本建築学論文報告集 No.283, pp.111-117, 1979.9.
- [7] 山久瀬健, 高柳英明, 長沢夏子, 中村良三, 渡辺仁史 : パーティクルオブジェクトを用いた3次元群集流動シミュレータの構築, 日本建築学会大会学術講演梗概集 E-1 分冊, p.861, 1998.
- [8] Hideyuki Nakanishi and Toru Ishida : FreeWalk/Q: Social Interaction Platform in Virtual Space. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST2004), pp. 97-104, 2004.