

修士論文

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

指導教員 石田 亨 教授

京都大学情報学研究科  
修士課程社会情報学専攻

板倉 豊和

平成 17 年 2 月 9 日

# 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

## 内容梗概

私達は都市空間の中で歩行しながら生活している。「都市空間」という言葉は、街全体からビルの1室まで、用いられる状況により様々な空間を表す。本研究での「都市空間」は、建物の1～数フロア、歩行者数にして数人～数百人規模の空間である。歩行者は都市空間の空間的な構造に従いつつ、他の歩行者と様々なインタラクションを行いながら歩行している。

過去、様々な目的で仮想都市空間でのシミュレーションが行われてきた。比較的広範囲な都市空間を想定したシミュレーションの場合、歩行者間・歩行者と環境とのインタラクションのような局所的なインタラクションをシミュレーションに再現することは非常に難しい。アバターが参加する群集シミュレーションを考えた場合、広範囲な都市空間においても詳細なインタラクションが行えるようなシミュレーションモデルが必要となる。しかし、都市空間内の数地点を移動するという広範囲を扱うモデルと、歩行者・環境とのインタラクションという局所的なモデルを同時に扱うことは既存の研究では考慮されていなかった。

本研究ではこの問題を解決するため、広範囲な都市空間における歩行者の詳細な軌跡データからのモデル構築を行う。詳細な軌跡データとして、地下鉄京都駅に設置された天井カメラの映像から抽出した歩行者の軌跡データを用いた。まず、都市空間における歩行者の歩行行動をモデル化し、そのモデルに従って軌跡データの解析を行った。最初に都市空間全体を考えたときの地点間の群集の遷移を、次に歩行者・環境とのインタラクションを解析した。解析によって得られた知見は以下の通りである。

- ・ 都市空間の中で歩行者が経由する地点間の遷移確率は、過去に経由した数地点に依存し、N重マルコフモデルで表現することができる
- ・ 地点間の詳細な経路の選択確率も、過去に経由した数地点に依存する
- ・ 2次元の軌跡データを3次元仮想空間に再現することにより、周囲の歩行者とのインタラクションをインタラクションを実行する確率として、また環境とのインタラクションを簡単なルールで抽出することができる

この知見を基に、上記の歩行者の歩行行動モデルを実装が可能な段階にまで具体化し、シミュレーションモデルを軌跡データを用いることを前提にして設計した。軌跡データによるシミュレーションモデルは、上記知見を基に以下のI~IVの4階層として設計される。

- I. 地点間の確率遷移
- II. 地点間の詳細な確率的経路選択
- III. 周囲の状況に応じた経路選択
- IV. 歩行者・環境とのインタラクション

I,II では確率的な遷移を基にした地点間の歩行者の移動を、III,IV ではある時点での周囲の歩行者・都市環境に応じた歩行者のインタラクションが実現される。

そして、この具体化されたI~IV段階のシミュレーションモデルを実装し、その評価を行った。評価は地下鉄京都駅の映像から取り出した群集の軌跡データとの比較で行った。そしてその結果、通常の地下鉄京都駅の業務時間帯でココースの歩行者が再現できることを確認した。

本研究は、広範囲の都市空間における詳細な歩行者の軌跡データを解析し、得られた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を構築した。構築したシミュレーションモデルはユーザがアバターを通じて参加することを前提とした、3次元仮想都市における群集シミュレーションのシミュレーションモデルとなっている。本研究の貢献は以下のとおりである。

#### 軌跡データを用いたシミュレーションモデル構築

広範囲の都市空間での地点間の遷移と、狭い範囲での詳細なインタラクションを中心としたシミュレーションを同時に実現することは困難であった。本研究では、広範囲かつ詳細な歩行者の軌跡データを用い、その両方を含むシミュレーションモデルの構築法を実現した。

#### 軌跡データを3次元仮想都市に再現することによるインタラクション解析

2次元の軌跡データを一旦3次元仮想都市に再現することで、歩行者の視界を得ることが可能になる。この特性を用いて、歩行者のインタラクションを、現実により近い状況で解析することができる。

# **Crowd Simulation in Virtual Cities by Tracking Pedestrians**

Toyokazu ITAKURA

## **Abstract**

We're walking and living in urban space. The term "urban space" has a lot of meanings from a whole city to a room in a building. In this research, "urban space" means a few floors in the building, where hundreds of pedestrians are walking. Pedestrians are walking along the spatial structure of the city and having various interactions with others.

A lot of simulations in virtual cities were done for each purpose so far. In case of simulations focusing on relatively large urban area, it is difficult to simulate pedestrians' local interactions with others or environments. In the simulation including avatars controlled by users, a simulation model which can deal with exact interactions even in large urban area is needed. But, conventional models did not focus on both the walkers' movements from one spot to another in a city and their local interactions.

To solve this problem, we tried to construct the simulation model with accurate tracking data in large urban area. As the accurate tracking data, we used pedestrians' tracking data extracted from the images of the ceiling cameras in Kyoto Station of Kyoto City Subway Line. We built a model of a pedestrian walking in a city. According to the model, the tracking data was analyzed. We analyzed transfer probabilities between spots and interactions among pedestrians and environments. The knowledge we found in analyzing was listed below.

- The transition probabilities between spots in the urban area depend on the several spots in which pedestrians passed in the past. And they are represented as N-th Markov Model.

- The probabilistic choices of detailed routes between spots are also depend on the several spots in which pedestrians passed in the past.

- We reproduced 2D tracking data on 3D virtual city. By reproducing the data, interactions with surrounding walkers are got as the probabilities to

execute the interactions, and interactions with surrounding environments are got as the simple rules.

Based on the knowledge, we shaped the pedestrian model to the detailed model enabled to be implemented. The detailed simulation model by accurate pedestrians' tracking data is constructed with 4 stages below.

- I. transfer probabilities between spots
- II. probabilistic choices of routes between spots
- III. choices of routes according to surrounding
- IV. interactions with other pedestrians and environments

In I and II, pedestrians transitions based on the probabilities stages are realized. And in III and IV, their interactions according to surrounding walkers and environments are also realized.

After the implementation of the model, we evaluated the model. As a result of the evaluation with comparing to another data from the image of the camera, we confirmed that the model reproduced the crowd during the business hours.

In this research, we analyzed the pedestrians' accurate tracking data in the large urban area, and constructed the simulation model based on results of analyzing the data. The simulation model is the model used for 3D virtual city in which users participate to control avatars. The contributions in this research are listed below.

- Construction of simulation model with pedestrians' tracking data

It was difficult to realize the simulation focusing on both the transference between spots in a large urban area and the local interactions with other walkers and environments. In this thesis, we use the accurate tracking data in large area, and the simulation model which can cover both the transference between spots and the local interactions is realized.

- Analyzing interactions by reproducing tracking data on 3D virtual city

To reproduce 2D tracking data on 3D virtual city, it becomes possible to get a pedestrian's view. With this characteristic, pedestrians' interactions can be analyzed in more actual situation.

# 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

## 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
<b>第2章 研究背景</b>	<b>4</b>
2.1 都市空間におけるシミュレーションとその目的	4
2.1.1 狭い範囲でのシミュレーション	4
2.1.2 広い範囲でのシミュレーション	7
2.2 アバターが参加するシミュレーション	9
2.2.1 アバターが参加するシミュレーションの特徴	9
2.2.2 アバターが参加するシミュレーションの重要性	11
2.3 群集シミュレーション実現の問題点	11
2.4 研究の目的と研究の流れ	12
<b>第3章 軌跡データによる歩行者の歩行解析</b>	<b>14</b>
3.1 詳細な軌跡データを用いるシミュレーションモデル	14
3.2 軌跡データの収集	14
3.3 都市空間を歩行する歩行者のモデル化	16
3.4 都市空間全体での歩行解析	18
3.4.1 地点間の遷移解析	18
3.4.2 地点間の詳細な経路解析	23
3.5 インタラクションを中心とした歩行解析	26
3.5.1 2次元軌跡データの3次元仮想都市への再現	26
3.5.2 他歩行者とのインタラクション解析	28
3.5.3 環境とのインタラクション解析	30
3.6 軌跡データの解析結果	32
<b>第4章 群集シミュレーションモデルの設計</b>	<b>33</b>
4.1 軌跡データを用いたモデルの具体化	33
4.1.1 地点間確率遷移	34
4.1.2 地点間の詳細な確率的経路選択	36
4.1.3 周囲の状況に応じた経路選択	38

4.1.4 歩行者・環境とのインタラクション .....	39
4.2 シミュレーションモデルの具体的な動作 .....	41
<b>第5章 シミュレーションモデルの実装と評価</b> .....	<b>42</b>
5.1 シミュレーションモデルの実装 .....	42
5.2 シミュレーションの実行と評価 .....	43
5.2.1 電車が到着する合間の時間帯 .....	43
5.2.2 電車が到着した直後の時間帯 .....	44
<b>第6章 結論</b> .....	<b>47</b>
<b>謝辞</b> .....	<b>50</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>50</b>

# 第1章 序論

私達は普段、「都市空間」と呼ばれる空間で生活している。生活している中で、私達は都市空間の中のほかの市民と、または都市空間の中に存在する様々な情報とインタラクションを行いながら活動している。近年、この現実の都市空間そのものを、また都市空間の中の情報をコンピュータ上に「デジタル・シティ」として再構築する研究が行われている[1][2]。独立行政法人科学技術振興機構（JST）のプロジェクトである「デジタルシティのユニバーサルデザイン」プロジェクトでは、日本の古都である京都市を2次元の地図・3次元の仮想空間インタフェースを通じて再現した[3]。そのインタフェース上に蓄積されたウェブ上のデータやリアルタイムで得られるデータが再現され、そのインタフェース上で市民やエージェントがインタラクションを行う。デジタルシティを通じ、市民は普段生活している現実の都市空間では得られない生活・観光情報を得、また現実空間では体験し難い避難訓練などを体験することができる。本研究もこのプロジェクトの一環として行われたものである。

都市空間というと数10キロメートル四方に及ぶ街全体から、駅などの公共施設、そして部屋などの狭い空間までその言葉が用いられる状況によって様々な考え方がある。「デジタルシティのユニバーサルデザイン」プロジェクトにおいても、デジタルシティのインタフェースとして再現されたのは京都市全体の2次元の地図にはじまり、市内最大の繁華街の通りを詳細に再現した3次元の仮想都市、または3次元の仮想的な小部屋など、様々な規模・表現方法を持つ都市空間が用いられた。

本研究での都市空間とは、主に駅などの公共施設・デパートなどの建造物・商店街など、階段・通路・扉・エレベータなど、建築物内の構造を持つ空間を考える。その都市空間の中では、多数の市民が歩行者として歩行している。それら、都市空間の中で歩行している複数の歩行者を本研究内では「群集」と呼ぶ。そして、コンピュータ上にその都市空間を再現するインタフェースとして、現実の都市空間を忠実に再現した3次元仮想都市、その中で活動する市民（歩行者）も3次元で再現されたリアルなキャラクタを用いる。

都市空間を群集が歩行する際、その都市空間の特徴に応じて歩行者は様々な選択を行いながら歩行している。通過する経路の選択、通るべき扉の選択などを意識して、または無意識のうちに行っている。これらは、明らかに歩行者が

歩行している都市空間の特徴に依存している。例えば、複数の扉がある場合、そのどれを通るか、または別の道があるのならば通らないのか、またその扉が通行可能なのかということも確認して歩行しなくてはならない。また、依存するのは都市空間の特徴だけではなく、他の歩行者にも依存している。

扉の数・通行の可否などによって各歩行者の歩行経路は変わり、それに応じて群集の歩行の流れも変化してくる。歩行者の数が多数であり群集が密集していればそこに危険な状態も生まれてくる。また、ある施設の特定の通路にだけ歩行者が固まって歩行しづらい状況が生まれれば、施設の利用者から不満が生まれることも考えられる。このように、都市空間それぞれに対する歩行者の歩行の仕方、それらの歩行者が形成する群集の流れは、空間設計上、安全確保上非常に重要である。

このように都市空間での群集の歩行の様子を知ることは非常に重要であるが、建築物の建設時や改装時に実際に歩行者を集めて、どんな空間構造が最もスムーズに群集を制御できるかどうかを調べたり、どのくらいまで歩行者が空間内に入ることができるのか、を調べることは非常に難しい。また都市空間内で群集事故が起こった時にその原因を調べる場合、被験者として現実の歩行者を集めて事故を再現することは安全上の問題から非常に難しい。

このような現実で再現が難しい未知の状況を再現したい場合、仮想的な都市空間をコンピュータ上に構築し、その上で仮想的な歩行者を動かして空間構造を検証したり、事故の原因を調べるなどのシミュレーションが多く行われている。建築や都市計画、アニメーションなどの分野で、過去に数多くの群集シミュレーションの研究が行われている。言うまでも無く、シミュレーションはより現実の現象を忠実に再現するものが優れている。群集シミュレーションを行う際最も重要となるのが、歩行者が従うべきシミュレーションモデルである。コンピュータ上の仮想歩行者は、それぞれのシミュレーションで定められたモデルに従い次の一步を決定し歩行する。このモデルによって歩行者が、更には歩行者の集団である群集全体の歩行行動が現実に近いものになるかが決まってくる。

これまでに研究されてきた多くのシミュレーションにおいては、ユーザはその中に参加することはあまりなかった。それゆえ、建築や都市計画の分野で行われてきたシミュレーションの多くが、歩行者を2次元または3次元のパーティクル（粒子）で表現している。またアニメーションの分野では、都市空間内

を歩行する群集を生成することが目的であるため、歩行者間のインタラクションはあまり考慮されなかった。しかし、市民がユーザとして参加するデジタルシティとして忠実に再現される必要がある群集シミュレーションにおいては、ユーザが群集を構成する歩行者の一人として他の歩行者とインタラクションを行うため、インタラクションをも考慮したシミュレーションモデルが必要となる。

ユーザが歩行者の一人となってシミュレーション内に参加する場合、ユーザは自分の分身となる歩行者（アバター）を操作する。ユーザはカーソルキーやマウス等でアバターを操作しながら、アバターの見ている景色をモニタを通じて見ることで次に行う行動を判断する。つまり、アバターの見る景色、アバターの受ける他歩行者からのインタラクションがそのまま利用者の感じる現実感の高さとなって現れる。よって、ユーザのシミュレーションへの没入感を高くするためには、より現実感の高い3次元仮想都市空間を用いることと、より現実の歩行者の歩行行動を反映したシミュレーションモデルを用いることが重要になる。

シミュレーションモデルを構築するにあたり、その基礎となるデータが必要となる。過去に行われた歩行者の歩行時の心理的・社会的な考察[4]を基にすることも考えられる。それらの歩行時のルールとして適用させることでモデルを構築している。また、歩行者に磁気を帯びさせ、目的地にそれとは反対の磁気を帯びさせることによって歩行者を目的地に向かわせる、物理的なモデルもある[7]。そのモデルでは歩行者同士、または歩行者と障害物の衝突や回避も物理的な力の作用によって実現されている。

ある都市空間において特徴のある歩行行動を行う群集をシミュレートするためには、その都市空間を歩行する群集の歩行行動をシミュレーションモデルに反映する必要がある。歩行者はその歩行空間で各自の目的を持ち、目的地に向かって歩行している。ある都市空間を考えたとき、歩行している群集の通過する場所にはある傾向がある。たとえば駅構内だと、券売機へ向かった歩行者は多くの場合そのまま改札口へ向かう。また、電車を降りてプラットフォームから改札階へ上がってきた歩行者はそのまま通路に向かって駅を出る。このような都市空間に固有な群集の歩行行動の傾向をシミュレーションモデルに反映させるためには、その都市空間における実際の歩行者の歩行行動を詳しく調べる必要がある。

本研究でモデル構築の元になるのは、現実の都市空間を歩行している歩行者の軌跡データである。歩行者が歩行した座標値の連続という軌跡データを用いるためには、都市空間内に歩行者を正確に追跡するセンサが必要である。昨今、駅や商店街、各種ビル内など至る所にビデオカメラが設置されている。その目的の多くは監視目的であるが、これらのビデオカメラに加え、RFID などのタグが将来的に携帯電話などに装備されることを考えると、様々な場所で詳細な歩行者の軌跡データが取得できることが将来的に期待できる。本稿では、「デジタルシティのユニバーサルデザイン」プロジェクトの一環として設置された、地下鉄京都駅の天井の特殊なカメラ[5]から得られる映像内の歩行者をマウスでドラッグすることにより詳細な軌跡データを抽出した。この軌跡データを用いることで、軌跡を抽出した都市空間に特有な群集シミュレーションを行うことができると思う。

## 第2章 研究背景

### 2.1 都市空間におけるシミュレーションとその目的

現実の都市空間での群集行動を再現することは非常に有用である。実際、これまでにも建築・都市設計・アニメーションの分野ではシミュレーションを用いた群集の再現がコンピュータ上の仮想都市空間の上に行われてきた。それぞれのシミュレーションにおいて、その目的に応じて用いられる「都市空間」や「歩行者」の捉え方が異なり、適用するシミュレーションモデルが異なる。以下では過去に行われてきたシミュレーションをその目的や「都市空間」の捉え方を観点に考察する。

#### 2.1.1 狭い範囲でのシミュレーション

図 2-1 は、Dirk Helbing ら[6]の行った、群集がパニックに陥った場合を想定したシミュレーションの模式図である。仮想空間は2次元の簡単な部屋や通路で構成されており、歩行者は2次元のパーティクル(粒子)で表されている。



図 2-1 : パニック時の部屋からの脱出シミュレーション

このシミュレーションでは、群集がある部屋から 1 つの出口に殺到した時などのパニック時に歩行者にかかる圧力や脱出のし難さなどをシミュレートすることを目的としている。歩行者の歩行行動は、自分の持つ力が他人にそのままかかるという、単純な物理的なモデルで表現されている。パニック時には他歩行者とのインタラクションを含む歩行行動は物理モデルのような単純なモデルで表現されるという仮定の下、このような単純な 2 次元のモデルが使用されている。

岡崎・松下[7]は、建築物の設計支援やその建築物内での群集の歩行特性を調べるため、建築物の 1 フロアを都市空間として捉え、2 次元上で再現した。その中で歩行する歩行者をパーティクルとして表現し、各パーティクルや障害物に正の電荷を与えることによって個々の衝突回避行動などを実現した。このモデルは磁気モデルと呼ばれている。下図は、磁気モデルにおける基本的な衝突回避の仕組みである。歩行者 A と歩行者 B が近づいた時、A は B から  $repulsiveVec$  で表される力を受け、自分の進行方向  $moveVec$  を  $alignVec$  へと修正する。磁気モデルにおいては、歩行者の目的地に負の電荷が設定されており、正の電荷を持つ歩行者は目的地に引きつけられるように歩行する。

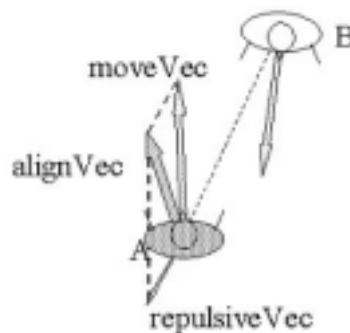


図 2-2 : 磁気モデルにおける衝突回避

さらに、山久世・高柳・渡辺ら[8]は、建築物の1フロア程度を3次元仮想都市空間として再現し、歩行者を3次元のパーティクルとして表現した。山久世らのモデルでは、群集全体としては流体としての特徴を持って歩行者の流れを作り出し、個々の衝突回避等についてはパーティクルとして物理的な力により衝突回避を行う。高柳・渡辺[9]はこのシミュレーションモデルを用い、2000年に明石で起こった歩道橋事故の様子を再現し、歩道橋の構造的な問題、歩行者が密集した場合の危険性について示唆した。

Reynolds[10][11]は歩行者の集団が「群れ」として歩行できるようにする、Boids と呼ばれるフロッキングモデルを考案した。フロッキングモデルにおいては、歩行者は自分の周りに neighborhood という領域を考える。neighborhood 領域に他のキャラクタが入ると、separation (反発：他歩行者からの斥力)、cohesion (結合：領域内の他歩行者の重心位置への引力)、alignment (調節：領域内の歩行者と進行方向・スピードを合わせる) という3つの物理的なルールにより、各歩行者は群集の一員としての性質を保つことができる(図2-3)。

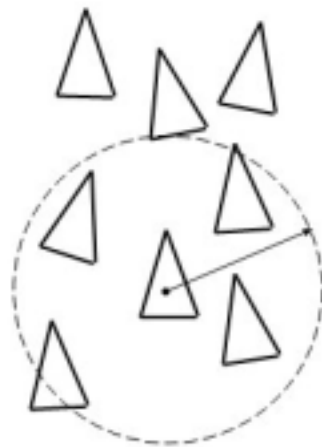


図2-3：フロッキングモデル

Osaragi ら[12]は、歩行者が他の歩行者とインタラクションを行う際に、P-stress と D-stress という2つの精神的なパラメータを設け、歩行者間の距離によって変化するこの2つのパラメータによって複数の歩行者のすれ違い、同じ方向への追従を実現している。

これまでに紹介した例では、1つの部屋や建築物の1フロアを都市空間としてシミュレーションが行われた。しかもこれらの都市空間は非常に簡略な構造

である。これらのシミュレーションの特徴は、都市空間内で歩行者は経路の選択等を行わず、主に物理的な計算にしたがって他歩行者とのインタラクションを行うということである。局所的な回避行動や進行方向調節、速度調節が重要になってくるため、シミュレーションモデルの目的は計算サイクル毎に歩行者がとる次の一步を計算することにある。また、コンピュータ上に再現される仮想都市空間は2次元、または非常に簡単な3次元形状がほとんどである。これは、比較的狭い範囲において衝突回避等の歩行者同士のインタラクションを行うシミュレーションを行うためには、現実の建築物を忠実に再現した詳細な3次元の仮想建築物や、人間の形をした仮想歩行者は必要ないと考えられているからである。

### 2.1.2 広い範囲でのシミュレーション

街全体、または数ブロックに及ぶ広範囲を「都市空間」とみなし、そこでシミュレーションを行う場合、建物の1フロア程度の範囲だけをカバーしたシミュレーションとは適用すべきモデルが異なる。狭い範囲、そして2次元や3次元の非常に簡素に表現された都市空間であれば、歩行者にはあらかじめ目的地が定められている。そして歩行者はあらかじめ定められた目的地に従い、そこへ向かう途中で他の歩行者と前述のようなシミュレーションモデルに従い衝突回避などのインタラクションを行って次の一步を決定しながら歩行している。しかし、街全体などの広い範囲を歩行する場合、局所的な歩行者同士の衝突などはあまり考慮されない。以下では、都市計画、アニメーションの分野での、街全体や数ブロックの広い範囲を都市空間とみなしてシミュレーションを行った例をいくつか挙げる。

Stylianou ら[14]は、3次元の街の数ブロックの範囲内で、道や交差点それぞれを1つの単位とし、その中で群集を再現した。道や交差点を現実のつながりと同じようにグラフとして捉え、道や交差点をノードとし、単位時間の間に、あるノードを離れる歩行者数を計算することによってノードからノードへの移動を実現する(下図2-4)。ある地点をノードとすると、地点間の遷移は図右のようなグラフで表される。

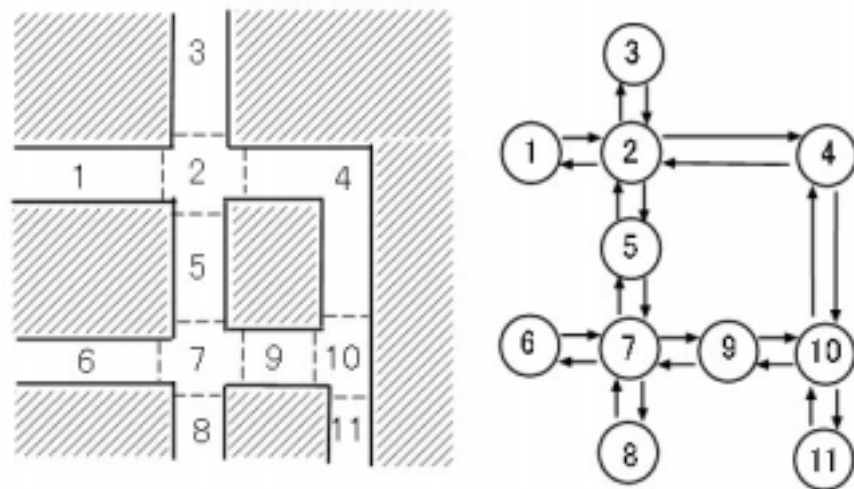


図 2-4：地点（ノード）間を結ぶグラフ

シミュレーションの目的は 3 次元の仮想都市空間の中に群集を再現することであり、歩行者同士の局所的なインタラクションは考慮されていない。

広範囲な仮想都市でのシミュレーションで用いられることが多いのが、このようにある地点・範囲をノードとし、その間を歩行者が移動することにより群集のシミュレーションを行うモデルである。地点（ノード）間を結ぶエッジに確率を付与することで、地点間の遷移確率を定めることができ、その遷移確率にしたがって歩行者は地点間を移動する。このように遷移確率を利用して地点間の移動を行うモデルを、ネットワークモデルという。

Musse ら[13]は、数人の歩行者をグループとして考え、さらにグループが集まって群集ができると考えた。グループは目的地を与えられ、歩行者はいずれかのグループに属し、所属するグループの持つ目的地に向かって歩行する。このシミュレーションモデルにおいても、重視されているのはアニメーションとしての群集の再現であり、局所的な歩行者同士の衝突回避等のインタラクションは再現されていない。

これら、街全体などの比較的広い範囲を都市空間と捉えて行われるシミュレーションの特徴は、歩行者同士の局所的なインタラクションはあまり重要視されていないことである。アニメーションとしての群集を歩行させることが目的であるため、シミュレーションモデルの主な部分は、歩行者の次の目的地を決定させるという点に集約されている。歩行者の次の目的地を決定させるための代表的なモデルは、ある地点からある地点へ遷移する確率を定め、その確率に

従って歩行者を歩行させる、確率モデル（ネットワークモデル）である。

## 2.2 アバターが参加するシミュレーション

### 2.2.1 アバターが参加するシミュレーションの特徴

ユーザが操作するアバターが他の歩行者と一緒に仮想都市空間に参加するシミュレーションでは、より現実に近いシミュレーションを行うことが要求される。なぜなら、ユーザはアバターの視点を通じてシミュレーションに参加するため、そのアバターから見えるものが現実感の乏しいものであればあるほどユーザの操作するアバターの動作が現実のものに近づかないからである。そのため、最低限でもアバターの参加するシミュレーションにおいては、現実の都市空間を忠実に再現した3次元の仮想都市空間を用いる必要がある（下図 2-5）。この仮想空間においては、都市の空間構造・外観は現実のものをそのまま反映し、その中で活動する歩行者もただのパーティクルではなく人の形状をしている。このような仮想空間内では、アバターを操作するユーザの没入感がより高まると考えられる。



図 2-5：現実感の高い3次元仮想都市空間

また、シミュレーションにアバターが参加することを前提にすると、他の歩行者と局所的なインタラクションを行う必要がある。例えば、現実の都市空間で我々が歩行しているとき、互いに正面からぶつかりそうになると意識して、または無意識のうちに衝突を回避する。このような現実で実際に行われるようなインタラクションが他歩行者と行えれば、アバターを操作するユーザはより

高い現実感を得ることができる。このように、アバターが参加するシミュレーションを行うには、歩行者間で局所的なインタラクションが再現できる必要がある。

本研究で都市空間として想定しているのは駅やデパートなどの建築物の数フロアである。例えば、駅においては、コンコースのあるフロア、またはプラットフォームのフロア等が考えられる。これらの都市空間を、現実感の高い3次元仮想都市としてコンピュータ上に再現するという事は、現実の都市空間の持つ複雑な空間構造もそのまま再現されているということである。2.1.1節で示されたシミュレーションでは、2次元の仮想都市空間、または簡略化された3次元の仮想都市空間が用いられていた。そのような簡単な仮想都市空間におけるシミュレーションにおいては、歩行者は特に目的地を選択して自ら歩行経路を設定しながら歩行することはない。しかし本研究で用いる3次元仮想都市空間においては、歩行者は複雑な都市空間構造の中で行動する必要があるため、自ら空間構造に応じた、そして他の歩行者の状況に応じた歩行経路の選択を行いながら歩行する必要がある。

これまでに述べてきた既存のシミュレーションモデルの目的とその特徴そして対象とする都市空間、そして本研究でシミュレーションの対象として考える、アバターの参加するシミュレーションについて分類する。シミュレーションモデルの分類法として、歩行者・グループ・群集という階層、歩行者に与えられている知能の高さ、参加歩行者の人数など様々な観点からの分類法がある。本研究では、シミュレーションが行われる都市空間、そしてシミュレーションモデルの目的などの観点に立って分類したのが下の表である。

	広範囲のシミュレーション	狭い範囲のシミュレーション	アバターが参加するシミュレーション
対象とする都市空間	街全体、数ブロック、数フロア	簡単な構造の部屋、通路	数フロア
仮想都市空間	2次元、3次元	2次元、簡単な3次元	現実に忠実な3次元
シミュレーションモデルの目的	地点間の遷移(次の目的地の決定)	歩行者間のインタラクション(次の一步の生成)	地点間の遷移(次の目的地の決定) 歩行者・環境とのインタラクション (次の一步の生成)

### 2.2.2 アバターが参加するシミュレーションの重要性

ユーザがアバターを操作してシミュレーションに参加できれば、現実の街をデジタルシティとして再現するにあたって、様々な方面に有益である。例えば、駅やデパートなどの仮想都市空間における群集が再現できた時、ユーザはアバターを操作してシミュレーションに参加することができる。この時、非常に混雑している状態の群集の中へアバターが入ることで、ユーザは現地に行くことなく混雑の状態を体感できる。そのように参加することで、建物の中でどのあたりが危険なのか、またある地点から目的地までどれくらいの時間がかかるのか、など、様々なことが検証できると考えられる。また現実感の高いデジタルシティが構築できれば、ショッピングや観光など、経済面でも大きな利用価値があると考えられる。

### 2.3 群集シミュレーション実現の問題点

本節では、これまで述べてきた研究背景を踏まえ、本研究の目指す仮想都市群集シミュレーション実現の問題点について述べる。問題点は以下のとおりである。

問題点：

比較的広範囲な都市空間を想定したシミュレーションの場合、歩行者間・歩行者と環境とのインタラクションのような局所的なインタラクションをシミュレーションに再現することは非常に難しい。その逆で、局所的なインタラクションを再現することを目的としたシミュレーションモデルで、広範囲な群集の移動を現実の都市空間に忠実に再現することも難しい。アバターを参加させるシミュレーションにおいては、広範囲の都市空間内において局所的なインタラクションを行うモデルが必要となる。しかし、都市空間内の数地点を移動するという広範囲を扱うシミュレーションモデルと、歩行者・環境とのインタラクションという局所的なシミュレーションモデルを同時に扱うことは既存のモデルでは考慮されていない。

ユーザがアバターを操作してシミュレーションに参加するにあたっては、現実を忠実に再現した3次元仮想都市空間が必要である。また、その中で活動す

る歩行者もパチンコ玉のようなパーティクル（粒子）ではなく、現実感の高い3次元の人間モデルを用いる。アバターが参加するということは、本研究で行うべきシミュレーションは出来るだけ忠実に現実の都市空間を再現したものでなければならない。3次元の仮想都市空間を用いることで、シミュレーション内で、アバターは現実の歩行者が見ているような多様な都市情報、例えば道案内や信号などを見ることができる。

## 2.4 研究の目的と研究の流れ

すでに述べたとおり、本研究の目指す群集のシミュレーションはアバターが参加するシミュレーションである。市民が参加することに意義があるデジタルシティとしては、ユーザの操作するアバターが違和感なく参加できる仮想都市群集シミュレーションは必要不可欠である。デジタルシティは比較的広い都市空間が必要である。それに加え、ユーザが参加するため、局所的な歩行者や環境とのインタラクションが重要となる。このような群集シミュレーションを行うシミュレーションモデルではこれらの目的を同時に扱う必要があるため、「アバターが参加できるシミュレーションを目指し、3次元仮想都市における群集シミュレーションモデルの構築法を提案する」ことが本研究の目的である。

群集シミュレーションは現実の都市空間の歩行者をできるだけ忠実に仮想都市に再現することを目的に行われる。その中でも、ユーザが参加する群集シミュレーションでは、歩行者間のインタラクションを忠実に再現することがシミュレーションの重要な目的となる。また、シミュレーションモデルを実際に構築するためには、モデルの基となるデータが必要となる。本研究ではこの基となるデータとして、現実の歩行者を撮影した映像から抽出した2次元の軌跡データを用いる。現実空間（3次元）では、歩行者は周囲の情報を元に他歩行者や環境とインタラクションを行っているが、このような本来3次元の情報を用いて行われるインタラクションが行えるようなモデルをどのように2次元の軌跡データから構築するか、ということが本研究の具体的な問題であると言える。

この問題を解決し、研究の目的を達成するため、本研究では以下のような研究のプロセスをとった。まず、シミュレーションモデルの基となるデータとして、広範囲かつ詳細な歩行者の軌跡データを用いることを考えた。既存のモデルにおいて、広範囲なモデルでは詳細な軌跡データは得られておらず、またイ

インタラクションを解析した既存のモデルでは、その範囲は狭い範囲にとどまっていたからである。次に、このような広範囲かつ詳細という条件を満たす軌跡データを収集した。これは、デジタルシティプロジェクトの一環で地下鉄京都駅に設置されているカメラの映像から軌跡データを抽出した。次に、都市空間を歩行する歩行者のモデル化を考えた。本研究でシミュレーションを行うのは現実を忠実に再現した3次元仮想都市空間であるため、このモデル化にあたっては、私達が普段歩行時に行っている判断をモデルにそのまま反映することができる考えた。このモデル化に従い、まず都市空間全体、広範囲で見た場合の群集の歩行解析を行った。そして続いて狭い範囲での歩行者・環境とのインタラクションを解析した。

これらの解析により得られた知見を基に、詳細な軌跡データをベースにした3次元仮想都市における群集シミュレーションモデルの設計を行った。設計に際しては、軌跡データによる歩行解析を基に、先にモデル化した歩行者の歩行行動を4段階の階層構造にし、実際にコンピュータ上に実装できる段階にまで具体化した。最後に、実際に軌跡データを用いてモデルを実装し、その評価を行った。

以上をまとめると、本研究の研究プロセスの概要は以下のように表される。

- ・ アバターが参加する群集シミュレーションモデル構築の問題点の抽出
- ・ 広範囲かつ詳細な軌跡データの利用
- ・ 都市空間の歩行者の歩行行動のモデル化
- ・ 都市空間全体の群集の歩行解析
- ・ 歩行者・環境とのインタラクション解析  
(解析結果)
- ・ 解析結果を基にした、モデルの具体的な設計
- ・ モデルの実装と評価

次章以降、この研究の流れに沿って本稿を進めていく。

## 第3章 軌跡データによる歩行者の歩行解析

### 3.1 詳細な軌跡データを用いるシミュレーション

前章で述べた既存のシミュレーションにおいて、シミュレーションモデルの構築に用いられるデータは、そのシミュレーションの目的に応じたものになっている。アニメーションなどの分野で行われている広範囲の都市空間を対象にしたシミュレーションにおいては、シミュレーションの目的は大域的に見た場合の群集の生成であるため、地点間を移動する歩行者の数程度のデータが用いられ、詳細な軌跡データは必要とされない。また、狭い範囲の都市空間を対象に物理・建築の分野で行われるシミュレーションでは、歩行者・都市環境との間のインタラクションが重要であるため、詳細な軌跡データが必要となる。

本研究の対象とするシミュレーションは、ユーザのアバターを介した参加を想定したシミュレーションである。このシミュレーションでは、広範囲の都市空間における群集の移動はもちろん、狭い範囲での歩行者・都市環境との間のインタラクションも非常に重要になる。このような目的を持ち、さらに現実の歩行者のデータでシミュレーションモデルの構築を試みた研究は過去にない。それは、広範囲をカバーし、かつインタラクションの解析が行えるほどの詳細な軌跡データが得られなかったからである。しかし、本研究では、「デジタルシティのユニバーサルデザイン」プロジェクトの中で設置された特殊なカメラにより、詳細な軌跡データを広範囲で得ることができた。このような広範囲でかつ詳細な歩行者の軌跡データを解析し、シミュレーションモデルを構築するための知見を得ることでモデルの構築を目指す。

### 3.2 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、地下鉄京都駅の天井に設置されたカメラの映像から抽出されたものである。この天井カメラは「デジタルシティのユニバーサルデザイン」プロジェクトの一環として、京都市交通局の協力を得て設置されたものである。カメラは、地下鉄京都駅の中央1改札のあるコンコース階に12台、プラットホーム階に16台設置されている。この天井カメラにより、下図 3-1 で表されるような映像が得られる。この映像の特徴は、得ら

れた映像を幾何的に処理した後、歩行者の足元の座標を追跡すると、その座標は実際に歩行者が都市空間を歩行していた座標そのものになっている点である。普通の定点カメラでは、カメラ位置から遠くにうつる歩行者の足元の位置がゆがんでしまうため、現実の歩行者が歩行していた座標をそのまま正確に再現することは不可能である。

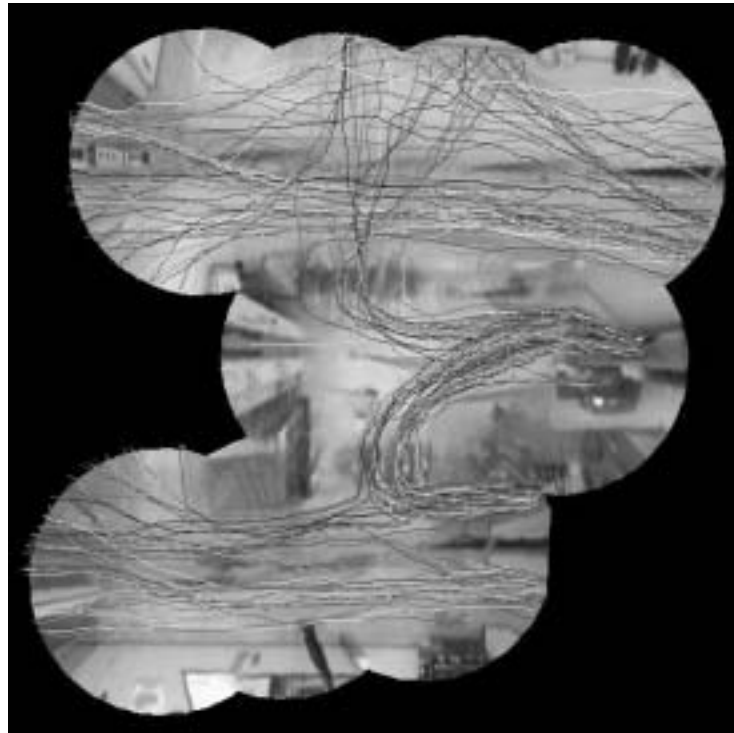


図 3-1：天井カメラの映像（地下鉄京都駅コンコース階）と抽出された軌跡データ

この映像において、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、平日の午前7時～午前8時の時間帯のもので、コンコース階で歩行者約1,700人分である。平日のこの時間帯の駅の利用者は、通勤に利用している歩行者と観光などで利用している歩行者が混在している。休日では通勤客は少なく、また平日でも昼の時間帯でもまた通勤客が少ないため、平日のこの時間帯を選択した。また、普段の平日・休日ではなく、年末年始や大きなイベントがある際の非常に混雑している利用状態の映像も得られていたが、最も一般的な駅の利用状態での歩行者の軌跡データを用いて一般的な駅の群集を再現す

ることが第一ステップとして重要であると判断したのが、この時間帯を選択した理由である。

収集した軌跡データは、歩行者一人一人に ID がふられており、映像の 1 フレーム = 33ms 毎の時刻と、その時刻での歩行者の存在する座標 (x 座標、y 座標) が下のように出力されているような 2 次元の時系列データとなっている。

．．．  
1333 1432.28 3146.32  
1367 1426.41 3146.32  
1400 1426.41 3146.32  
1433 1420.54 3146.32  
1467 1420.54 3146.32  
．．．

軌跡データは、図 3-1 のように時刻を無視して座標をプロットすることで、都市空間の中で歩行者がどの場所を通ることが多いのかということがわかる。また、時刻毎にその時刻に都市空間に存在していた歩行者の座標をプロットしていくことで、歩行者がどのような状況でその歩行経路を選択したか、ということがわかる。このように、この軌跡データを用いることで都市空間を歩行する歩行者の歩行の様子を様々な方面から解析することができる。

### 3.3 都市空間を歩行する歩行者のモデル化

これから考える「都市空間」とは、先に述べたように、駅やデパートのビルなどの建築物の 1 フロア、または数フロアの広さを考える。また、本研究でシミュレーションの対象とする仮想都市空間は、デジタルシティとして市民が参加できる、現実の都市空間を忠実に再現している 3 次元仮想都市空間である。つまり、都市空間を歩行する歩行者をモデル化するにあたっては、私達が普段現実の都市空間で行っている歩行時の判断等がそのままモデル化できる、と考えられる。これは、2 次元の狭い部屋でパーティクルを対象とするシミュレーションとの大きな違いである。

都市空間を歩行する歩行者は、何らかの目的を持って歩行している。駅ならば「電車に乗る」という目的を持ち、さらに「電車に乗る」という目的がある

場合には、まず券売機で乗車券を買い、改札を通り、プラットホームに向かわなくてはならない。このように、何らかの目的を持って都市空間を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。

歩行者は都市空間の歩行中、他歩行者もしくは環境とのインタラクションを意識的に、または無意識的に行っている。例えば、他歩行者が正面から歩いてきていた場合、当然衝突を回避するために「避ける」という行動をとることになる。またどうしても回避できないときには歩行を停止する。これらは歩行者間のインタラクションだが、当然歩行者が環境との間で行うインタラクションもある。人間のアクションに対して何らかのリアクションを起こす機械とのインタラクション、例えば券売機で乗車券を購入することは立派なインタラクションである。人間に対してリアクションを返さなくても、可視的对象物はすべてインタラクティブだという広い捉え方をする立場に立つと、掲示板を立ち止まって読むこともインタラクションと考えることができる。本研究ではこの広い立場をとることにする。つまり、都市空間を歩行する歩行者は周囲の歩行者だけでなく、周囲に見える機械やポスター、信号など目に見える対象物すべてとインタラクションを行い得るということである。

これらを踏まえ、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3-2のようにモデル化する。

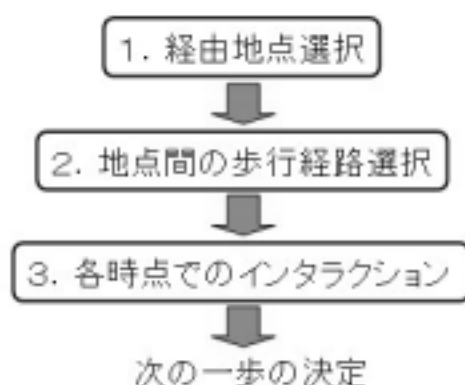


図3-2：歩行者の歩行行動のモデル化

歩行者は1～3を繰り返し、都市空間内を歩行していく。1.は、長期的にその都市空間内で歩行者が経由する地点の選択である。例えば、券売機前に向

かった歩行者は乗車券を買ったと考えられるため、次に向かうべきは改札であるとわかる。このように、都市空間内で歩行者が歩行する上で重要な地点を経由する。2. では、歩行者は1. で決定した地点間の具体的な歩行経路を決定する。いわば中期的な歩行行動である。例えば、券売機から改札に向かう場合でも、その経路は複数考えられる。3. では歩行者の短期的・局所的なインタラクションが行われる。例えば、歩行者同士の衝突回避などもここに含まれる。また、掲示を見るために立ち止まる、という行動も、環境とのインタラクションと考えることができ、この3番に含まれる。

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。解析結果としてなんらかの知見が得られれば、その知見を用いてモデルの各段階を、軌跡データを用いることを前提にして具体化できると考えられる。

## 3.4 都市空間全体での歩行解析

### 3.4.1 地点間の遷移解析

図3-2でモデル化した歩行行動の第1段階にあたる、経由地点の選択について軌跡データの解析を行う。上で述べたように、私達が都市空間で歩行している時、なんらかの目的を持ち、その目的を達成するために必要な数地点を経由しながら歩行している。これは私達の経験であるが、このことを軌跡データから確認する。

地点間の歩行者の移動について解析するためには、まず歩行者が歩行の際に経由する地点を求めなくてはならない。地点の検出にあたっては、NTTコミュニケーション科学研究所(CS研)にて作成された軌跡解析ツールを用いた。この軌跡解析ツールでは、2次元の都市空間をメッシュ状に分割する。軌跡データを分割されたメッシュの上に再プロットすることで、各メッシュの上である軌跡データがどのくらい長く留まっているか、またはいくつの軌跡データが1つのメッシュ上を通過するか、などを解析することができる。つまり、この軌跡解析ツールを用いることで、歩行者の滞留が頻繁に起こる地点(多くの歩行者が一定時間歩行を停止する地点)、歩行者が頻繁に通過する地点(通過する歩行者の密度が高い地点)を求めることができるのである。

この解析ツールを地下鉄京都駅のコンコース階の軌跡データに適用した。歩行者の滞留が多い地点、そして歩行者の通過する人数の多い地点、そして歩行

者が出現する位置として得られたのが下図 3-3 の四角で表された地点である。

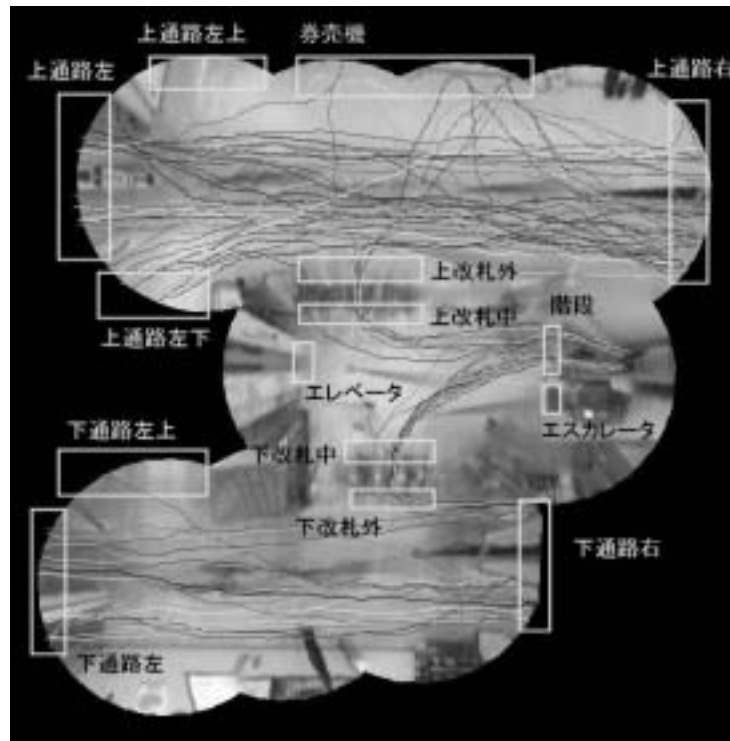


図 3-3：地下鉄コンコース階の歩行者の流れ

改札は歩行者が決まった場所（改札口）を通るため、非常に改札口の密度が高くなり、多くの歩行者がこの地点を通ることがわかる。また、券売機前ではほとんどの歩行者が長い間歩行を停止していた。このように、軌跡データをプロットするだけで、その都市空間（ここでは駅のコンコース階）において歩行者がどの地点を経由して歩行しているのかということを知ることができる。また、今回軌跡データの抽出に用いたコンコース階では、歩行者が出現・消滅する地点、例えば通路端、階段、エレベータなどの地点も観測することができた。

図 3-3 において四角で示されているのが、軌跡をプロットすることにより歩行者の歩行に関して重要な場所となる地点と判断された地点である。都市空間内での歩行者の歩行はこ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」や「階段 下改札中 下改札外 下通路右」などの地点を経由しながら歩行者が歩行していることがわかる。軌跡をプロットするとわかるように、歩行者が経由する地点には明らかにある傾向がある。その傾向は時間帯、もしくは都市空間の状況に依存する。

例えば駅であれば朝の通勤ラッシュ時、毎日通勤に駅を利用しているサラリーマンの歩行者が多ければその多くが定期券を持っていると思われるため、電車に乗るために改札を通る歩行者の中でも、券売機を経由する歩行者は少ない。これは、歩行者が地点間の経路にある傾向が存在していることを表している。また、電車が到着した直後の時間帯においては、改札の外から電車にのるためにプラットフォームに向かう歩行者よりも、電車を降りてプラットフォームから改札外へ出て行く歩行者の数の方が圧倒的に多い。このことは都市空間内のある変化（ここでは電車の到着）によっても歩行者の地点間の経路の傾向に変化があることを示している。

このように、歩行者の地点間の経路に関してはある傾向（確率）が存在するが、この確率は一般的に過去に経路してきた複数の地点（N 地点）に依存する。つまり、地点間の遷移傾向（遷移確率）は N 重マルコフモデルで表現されることができると考えることができる。例えば駅のコンコース階において、プラットフォーム階から階段を上がってきて改札という地点を経由した歩行者は、明らかに過去に経路してきた地点（プラットフォームからの階段）に依存し、再び階段に戻ることはなく通路に移動していく。

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

軌跡データから、 $C(X_t X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N})$  をカウントすることができるため、遷移確率  $P(X_t | X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N})$  を具体的に求めることができる。また、歩行者の地点  $X_t$  への出現確率  $P(X_t)$  も、軌跡データにおいて地点  $X_t$  へ出現した歩行者数をカウントすることで求めることができる。

本稿では、地下鉄京都駅コンコース階で収集した軌跡データにおいて、この遷移確率を解析した。コンコース階における歩行者の経路地点は、CS 研の軌跡解析ツールにおいて、図 3-3 のとおり歩行者が多く通過している場所を抽出した。解析は、抽出された地点を通過する歩行者数をカウントすることで行う。

カウントは全ての可能な経路についてカウントする。つまり、相互に行き来可能な地点 A、B、C があり、全ての軌跡が最長で3つの地点を経由しているとすると、 $C(A)$ 、 $C(B)$ 、 $C(C)$ 、 $C(BA)$ 、 $C(CA)$ 、 $C(AB)$ 、 $C(CB)$ 、 $C(AC)$ 、 $C(BC)$ 、 $C(ABA)$ 、 $C(CBA)$ 、 $C(ACA)$ 、 $C(BCA)$ 、 $C(BAB)$ 、 $C(CAB)$ 、 $C(ACB)$ 、 $C(BCB)$ 、 $C(BAC)$ 、 $C(CAC)$ 、 $C(ABC)$ 、 $C(CBC)$ という全ての経路をとる歩行者数をカウントするということである。 $C(BCA)$ は「A C B」と経由している歩行者の数を表す。

実際にコンコース階の軌跡データに対して行った軌跡データの解析手法を示すため、「上通路右、券売機、上改札外、上改札中、階段、エレベータ」という地点を考えた場合の解析について述べる。解析の目的としては、次に遷移する地点の選択確率が、過去に経由したいいくつかの地点に依存するか調べるために解析を行った。今、上改札中に注目すると、

$$C(\text{上改札中}) = 842$$

$$C(\text{上改札外, 上改札中}) = 520$$

$$C(\text{階段, 上改札中}) = 297$$

$$C(\text{エレベータ, 上改札中}) = 25$$

$$C(\text{上改札中, 上改札外}) = 322$$

$$C(\text{上改札中, 階段}) = 311$$

$$C(\text{上改札中, エスカレータ}) = 176$$

$$C(\text{上改札中, エレベータ}) = 33$$

$$C(\text{階段, 上改札中, 上改札外}) = 298$$

$$C(\text{エレベータ, 上改札中, 上改札外}) = 24$$

となる。この時、上改札中から次の地点への遷移を考える。地点間の遷移が過去の1地点だけに依存すると考えると、明らかにこれはおかしいことがわかる。なぜならば、過去の1地点のみを考えると場合は、「上改札外 上改札中」と経由してきた歩行者の次の地点への遷移確率が、「上改札外」となる確率が  $P(\text{上改札外}|\text{上改札中}) = 520/842 = 0.61$ 、「階段」となる確率が

$P(\text{階段}|\text{上改札中})=297/842=0.35$  となり、歩行者の約 6 割が再び改札の外に出ることになってしまい、実際にはほとんどの歩行者が階段に遷移するという事実と反する。次に過去の 2 地点で考えると、

$$P(\text{階段}|\text{上改札中, 上改札外})=298/322=0.93$$

$$P(\text{エレベータ}|\text{上改札中, 上改札外})=24/322=0.07$$

となり、こちらは現実のデータに即した結果になっている。

次に過去の 3 地点を考えると、

$$C(\text{上改札中, 上改札外, 券売機})=104$$

$$C(\text{上改札中, 上改札外, 上通路右})=149$$

$$C(\text{階段, 上改札中, 上改札外, 券売機})=93$$

$$C(\text{エレベータ, 上改札中, 上改札外, 券売機})=11$$

$$C(\text{階段, 上改札中, 上改札外, 上通路右})=142$$

$$C(\text{エレベータ, 上改札中, 上改札外, 上通路右})=7$$

となる。この時、

$$P(\text{階段}|\text{上改札中, 上改札外, 券売機})=93/104=0.89$$

$$P(\text{エレベータ}|\text{上改札中, 上改札外, 券売機})=11/104=0.11$$

$$P(\text{階段}|\text{上改札中, 上改札外, 上通路右})=142/149=0.95$$

$$P(\text{エレベータ}|\text{上改札中, 上改札外, 上通路右})=7/149=0.05$$

となり、次の経由地点に選択に関して、過去の 3 地点を考慮した場合は、過去の 2 地点を考慮した場合とほぼ同じ確率の傾向が現れていることがわかる。このことから、この場合は次の地点への遷移確率を考える場合には過去の 2 地点に依存するとすれば十分であると考えられる。図 3-3 の他の地点においても軌跡を解析したところ、同じように過去の 3 地点を考慮した場合と過去の 2 地点を考慮した場合は、ほぼ同じ遷移確率の傾向が現れていた。よって、地下鉄

京都駅コンコース階においては、次の地点への遷移確率は過去の2地点に依存する、つまり「2重マルコフモデル」として表されることがわかった。

### 3.4.2 地点間の詳細な経路解析

次に、図3-2でモデル化した歩行行動の第2段階にあたる、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する。図3-3において四角で示されるような経由地点となる各地点間において、その地点間を歩行者が歩行するとき具体的にどの経路を取るか、ということもやはりある傾向が存在する。それは私達の経験から明らかで、真っ直ぐな通路を歩行する場合でも、歩行者のよく通る場所と通らない場所との粗密が存在する。このことは軌跡をプロットすることでも明らかになる。

下図3-4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。

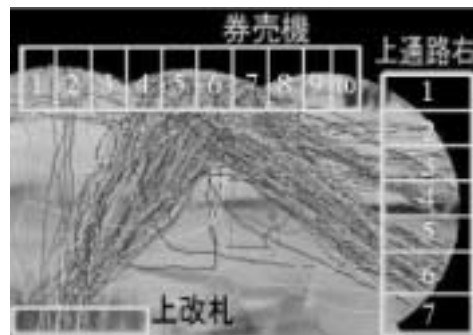


図3-4：各地点の小領域への分割

このように各地点を小領域へ分割すれば、小領域間を歩行する歩行者の傾向（確率）を計算することができる。下図3-5は、地点Aの小領域 $a_2$ に存在する歩行者が、地点Bの各小領域へ向かう場合の、小領域間の経路選択に伴う確率の模式図である。

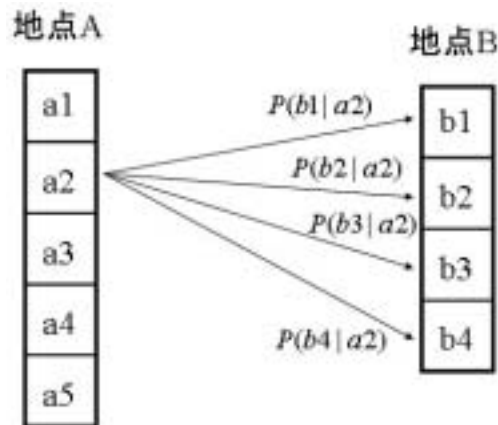


図 3-5：小領域間の遷移確率

一般的に、地点 A の小領域  $a_n$  に存在する歩行者が、地点 B の小領域  $b_m$  へ向かう確率は、軌跡データより、

$$P(b_m | a_n) = \frac{a_n \text{ から } b_m \text{ に向かう歩行者数}}{a_n \text{ に存在する歩行者数}}$$

によって求めることができる。

このようにして求められる地点間の小領域間の移動経路の傾向（歩行者がある小領域間の経路を選択する確率）に関しても、前節で求めた地点間の遷移確率と同じくただその 2 地点間のみで決まるものではなく、過去に通過してきた複数の地点（N 地点）に影響されると考えられる。つまり、次に進む地点が過去の通過地点に依存する場合、現在の地点  $X_{t-1}$  から次の地点  $X_t$  への小領域間の詳細な移動経路も、

$$X_{t-1} X_{t-2} \cdots X_{t-N}$$

という地点を通過してきた場合と、

$$X_{t-1} Y_{t-2} \cdots Y_{t-N}$$

という異なる地点を通過してきた場合では、それぞれ異なるということである。例えば、図 3-3 において、券売機から上改札外へ向かう歩行者を考える。このとき、「上改札外 券売機 上改札外」という地点を経由してきた歩行者と、「上通路右 券売機 上改札外」という地点を経由してきた歩行者とでは、券売機の小領域と上改札外の小領域間の経路選択の確率は異なっていた。これは、

上改札には駅員のいる改札口があり、駅に不慣れな人は一旦この駅員のいる改札口に寄って質問した後、券売機に向かう傾向があるからだと考えられる。このとき、券売機に向かった不慣れな人は、また駅員のいる改札口に向かう傾向がある。このように、同じ「券売機 上改札外」という地点を経由する歩行者でも、地点間の詳細な経路選択については、その前に経由した地点に依存することがわかった。

本稿では地下鉄京都駅コンコース階の軌跡データで、この地点間の小領域間の詳細な経路選択の確率について解析を行った。ここでは、本稿で行った解析手法について、上の「券売機 上改札外」の場合を例に挙げて示す。基本的には、前項で行った解析と同じように、小領域間を移動している歩行者数をカウントすることにより小領域間の遷移確率を求めることで解析を行った。券売機と上改札外という地点は、図 3-6 のように小領域へ分割した。

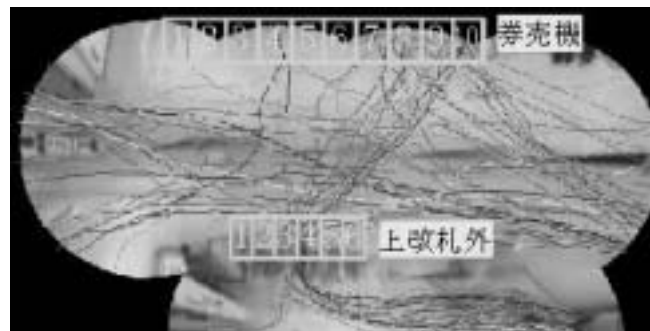


図 3-6：券売機と上改札外の小領域への分割

ここで、券売機の小領域 4 に着目する。まず最初に、過去の 1 地点のみを考慮して考える。つまり券売機から上改札外に遷移しようとしているときに、過去の 1 地点、この場合は券売機のみを考慮するということである。この時、券売機 4 から上改札外の各小領域への遷移の確率は、

	上改札 1	上改札 2	上改札 3	上改札 4	上改札 5	上改札 6
確率	0.12	0.34	0.35	0.19	0.0	0.0

となる。次に、過去に経由してきた 2 地点を考慮した場合について考える。「上通路右 券売機」と経由した時、券売機 4 から上改札外の各小領域への遷移確

率は、

	上改札 1	上改札 2	上改札 3	上改札 4	上改札 5	上改札 6
確率	0.07	0.13	0.57	0.23	0.0	0.0

また、「上改札外 券売機」と経由した時の券売機 4 から上改札外の各小領域への遷移確率は、

	上改札 1	上改札 2	上改札 3	上改札 4	上改札 5	上改札 6
確率	0.34	0.20	0.30	0.16	0.0	0.0

となる。2 地点を考慮した場合と 1 地点のみを考慮した場合を比較すると、小領域間の遷移の確率の傾向が異なるため、少なくとも過去に経由してきた 2 地点に依存することがわかる。次に、過去の 3 地点「上通路左 上改札外 券売機」と経由してきた時に、券売機 4 から上改札外の各小領域への遷移確率は以下ようになる。

	上改札 1	上改札 2	上改札 3	上改札 4	上改札 5	上改札 6
確率	0.30	0.22	0.35	0.13	0.0	0.0

この「上通路左 上改札外 券売機」という過去の 3 地点を考慮した場合と、すでに述べた「上改札外 券売機」という過去の 2 地点を考慮した場合では、小領域間の遷移の傾向がほぼ同じであることがわかる。このことから、この券売機 4 から上改札外の各小領域への遷移の確率は、過去の経由した 2 地点に依存するということがわかった。

他の地点もそれぞれ小領域に分割して同様に解析したところ、この場合と同じように最大で過去の 2 地点を考慮すれば十分であった。よって、地下鉄京都駅のコンコース階においては、小領域間の遷移の確率は「過去に経由した 2 地点に依存する」ということがわかった。

### 3.5 インタラクションを中心とした歩行解析

#### 3.5.1 2次元軌跡データの3次元仮想都市への再現

本研究でシミュレーションモデル構築のために利用するのは、歩行者の 2 次元の軌跡データである。2 次元の軌跡データからだけでは、歩行者がどのよう

に他歩行者、もしくは環境とインタラクションを行っているのかがわからない。そこで、2次元の軌跡データを一旦3次元に戻すことで、より現実に近いインタラクションの解析を行うことを考えた。本研究で想定している都市空間は、現実の都市空間を忠実に再現した3次元仮想都市空間である。これは既存のシミュレーションモデルの研究との本研究の最大の違いである。この仮想都市の中では、階段や改札、通路などの空間的構造はもちろん、地図や経路を示す看板、そして通行止めの標識などもすべて忠実に再現されている。もちろん、もともと歩行者は3次元の現実の都市空間を歩行していた。つまり、カメラに撮影されて2次元の軌跡データに変化している歩行者を、再び3次元の都市空間に戻してやるのである(図3-7)。

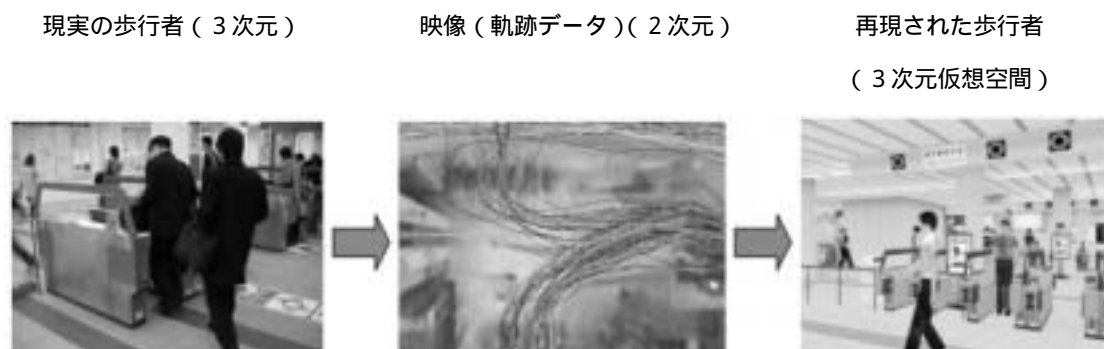


図 3-7：2次元軌跡データから3次元仮想空間への歩行者の再現

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、3次元の現実都市空間を歩行していた歩行者を2次元の軌跡データにすることで欠落していた情報が再現されることである。図3-7でわかるように、3次元仮想空間へ歩行者を再現することで、歩行者一人一人の視界を得ることができる。これが3次元仮想都市空間に歩行者を再現する最大の利点である。このように再現することで、歩行者と他歩行者・都市環境とのインタラクションがどのような状況で行われたかということの詳細に解析することができると思われる。

3次元仮想都市空間での歩行者の再現は、仮想都市シミュレーション環境 FreeWalk[15]上に行う。FreeWalkは「デジタルシティのユニバーサルデザイン」プロジェクトの一環として構築された。FreeWalkでは、仮想現実設計言語である VRML (Virtual Reality Modeling Language) にて記述された3次元幾

何形状を組み合わせることで現実の都市空間の空間構造を詳細に再現している。また、現実の都市空間で撮影された写真をテクスチャとして3次元幾何形状に貼り付けることにより、見た目も可能な限り現実を再現したものになっている。それらの仮想の都市空間の中で歩行する歩行者も VRML にてモデリングされ、現実の歩行者の写真がテクスチャとして歩行者の3次元モデルに貼られ、外観も現実の歩行者に近いものとなっている。これらの3次元コンテンツも上記プロジェクトの一環として JST に帰属するものである。

### 3.5.2 他歩行者とのインタラクション解析

図 3-2 のモデル化の3段階目である、各時点のインタラクション、その中でも歩行者とのインタラクションについて軌跡データを解析する。3.5.1 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することによって解析を試みる。一旦再現することにより、下図 3-8 のように歩行者が経路選択を行う場合のその歩行者の周囲の状況を詳しく知ることができる。



図 3-8：3次元仮想空間に再現された歩行者軌跡データ

図3-8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。このように、3次元仮想空間に軌跡データを再現することによって、現実の歩行者が得ている視界を得ることができ、インタラクションの解析をより精密に行えると考えられる。これは、2次元の軌跡データのままだでは、障害物などがあつた場合、または高低差があつた場合には正しくインタラクション解析が行えないことから明らかである。

本稿では、図 3-8 で示される、コンコース階の改札付近でのインタラクシヨ

ン解析を行った。3次元仮想空間に軌跡データを再現し、歩行者一人一人の視点になって、改札を通過するときの周囲の歩行者の状況を観測した。

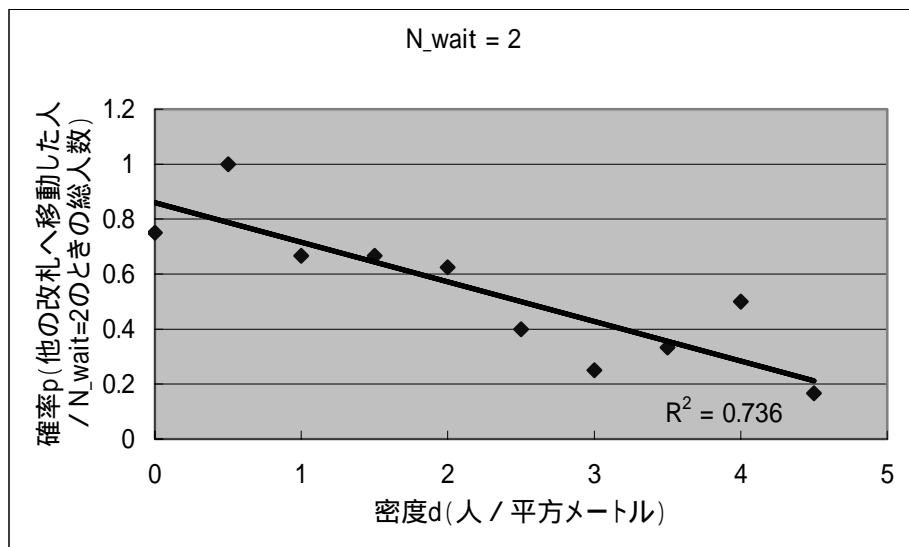
観測により、歩行者がある改札を通過しようとしているときの、

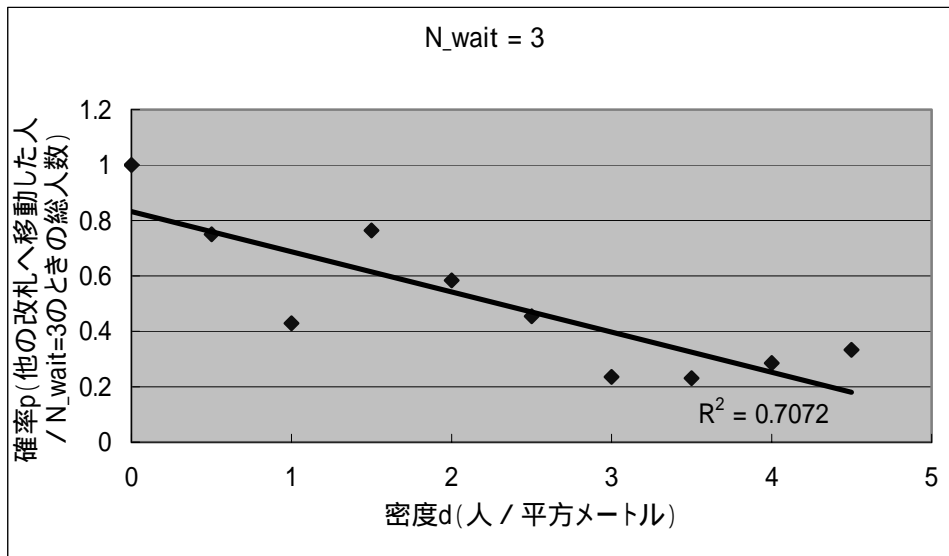
通過予定の改札口に並んでいる歩行者数  $N_{wait}$

周囲の歩行者の密度（単位面積あたりの視界内の歩行者数）  $d$

他の改札へ移る確率  $p$

を求めた。下のグラフは、 $N_{wait}=2$  のときと  $N_{wait}=3$  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。グラフを見ればわかるように、密度  $d$  と確率  $p$  との間にはある傾向があることがわかる。実際、相関係数はそれぞれ 0.736、0.7072 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について、自分の前に改札に並んでいる歩行者の数と、周囲の視界に入る歩行者の数によって、他の改札口へ移ろうとする傾向があることがわかった。つまり、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」という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。

### 3.5.3 環境とのインタラクション解析

3.5.2 では歩行者とのインタラクションの解析を行ったが、本項では環境とのインタラクション解析を考える。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するということは3.5.1項で述べた通りである。下図3-9は2次元平面に軌跡データをプロットしたもののだが、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。

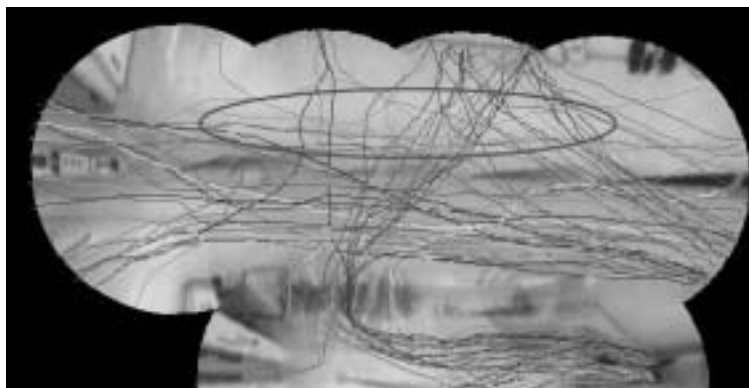


図 3-9：歩行者が頻繁に立ち止まっている地帯

このままでは、なぜこの円の付近に頻繁に歩行者が立ち止まっているのかはわからない。なぜこの円の付近で立ち止まっているかを調べるため、3次元仮想都市に再現した軌跡データにより観測すると、下図 3-10 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。このように、3次元仮想都市に軌跡データを再現して初めてわかる歩行者のインタラクションも存在する。これは決して2次元の軌跡データからだけではわからない。



図 3-10：仮想空間内の券売機上の路線図

一般的に、2次元上にそのまま軌跡データをプロットしたときに特徴のある地点（歩行者の滞留がある地点、歩行者が急に速度を変化させる地点、歩行者

が急に進行方向を変化させる地点など) に関して、3次元上でその歩行者の視点を得ることで、その歩行者が何に対してインタラクションを行っているのを知ることができる。そして、このようにして得られた歩行者と環境の間のインタラクションは、簡単なインタラクション・ルールとして記述される。このインタラクション・ルールは簡単な if-then ルールで記述される。この if-then ルールは「知覚」と「行動」によって「もし～を知覚したら～の行動を行う」の形で、

**if 知覚 then 行動**

のように記述される。例えば上の解析で判明した「路線図 (map) を見たら立ち止まる」というルールは、

**if see\_map then stop**

と表現される。具体的には、“see (見る)”は歩行者の視界に対象物(ここでは map (路線図))が入ることを示している。“stop (停止する)”は歩行を停止することを示している。

### 3.6 軌跡データの解析結果

前節まで、図 3-2 でモデル化した都市空間の歩行者の歩行行動に従って、地下鉄京都駅のココース階の軌跡データを解析した。この解析によって得られた解析結果をまとめると、下表のようになる。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3次元の仮想歩行者として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。

解析方法	解析の目的	解析結果
2次元データのまま	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

## 第4章 群集シミュレーションモデルの設計

### 4.1 軌跡データを用いたモデルの具体化

第3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3-2で示した歩行者の歩行モデルの1～3の段階についてそれぞれの解析結果として一般的な知見を得た。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図3-2の各段階を具体化する。コンピュータ上に実装できるまで具体化することで、そのモデルを実際に実装することでシミュレーションを行うことが可能になる。

本研究で用いる現実空間の歩行者の軌跡データは、時刻と座標のペアの連続で与えられるものとする。それぞれの歩行者の軌跡データは、その歩行者固有のID、ある時間から一定時間毎に記録された座標値から成っている。つまり、軌跡データとは

ID: id1

t1 (x1, y1)

t2 (x2, y2)

t3 (x3, y3)

...

のようなデータであり、このデータを見ればあるIDをもつ歩行者がどの時間にどの座標にいたのかがわかる。

以下では、座標値の連続である歩行者の軌跡データを基にすることを踏まえ、前章で得られた軌跡データの解析結果を基に図3-2のモデルをI～IVの4段階に具体化する。より詳細な内容は続く4.1.1～4.1.4にて述べられている。まず、図3-2の第1段階の「経由地点選択」だが、これは3.4.1での解析結果に従って、N重マルコフモデルによる地点間遷移によって地点の選択を行う(I)。次に、第2段階の「地点間の歩行経路選択」は、主に3.4.2で行われた、地点間の詳細な経路解析の結果に基づく。つまり、地点間の小領域間の遷移の確率も過去に通過した数地点に依存している、という結果に基づいて具体化される

(II)。また、「地点間の歩行経路選択」は、3.5.2 で解析された結果にも依存している。3.5.2 では改札付近の解析結果が得られていたが、周囲に多くの歩行者がいれば他の改札口へ移動する、という結果は、歩行者間のインタラクションだけでなく経路の選択(の変更)という側面も持っているからである(III)。最後に、3.5.2 と 3.5.3 で得られた解析結果を基に第3段階の「各時点でのインタラクション」を具体化する。言うまでもなく、3.5.2 で得られた歩行者間のインタラクション解析と 3.5.3 で得られた環境とのインタラクション解析において得られた結果を用いる(IV)。

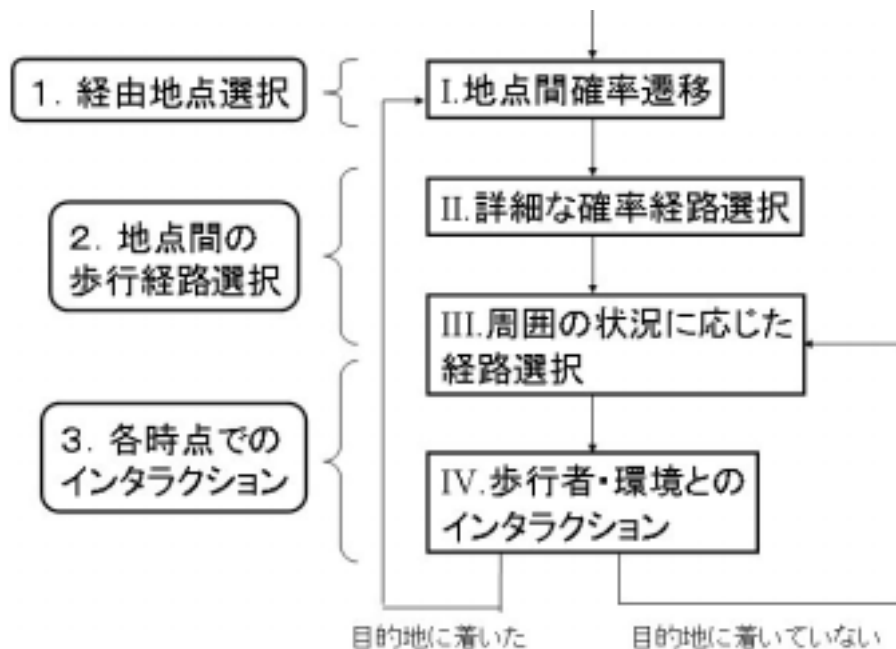


図 4-1 : シミュレーションモデルの具体化

上図 4-1 は、歩行行動のモデル化(図 3-2)を、歩行者の詳細な軌跡データの解析結果により具体化し、上記 I~IV の各段階の適用過程を示した概要図である。以下では、I~IV 各段階の詳細な説明と定義を行う。

これ以降、説明のため、シミュレーションモデル全体を  $M$ 、I~IV のモデルの各段階をそれぞれ  $M_I$ 、 $M_{II}$ 、 $M_{III}$ 、 $M_{IV}$  とする。

#### 4.1.1 地点間確率遷移

今、下図 4-2 のような都市空間に、点線の四角で表される歩行者の経路地点 A~I が得られたとする。地点 A,B,D,H,I は歩行者が出現・消滅する地点である。

そして地点 C,F,G は通路から広い空間への入り口であり、歩行者が多く通過することから密度が高いと判定された地点である。また地点 E には何らかの窓口があり、ここに立ち寄る歩行者は少しの間立ち止まるため、ここでは歩行者の滞留が見られる。

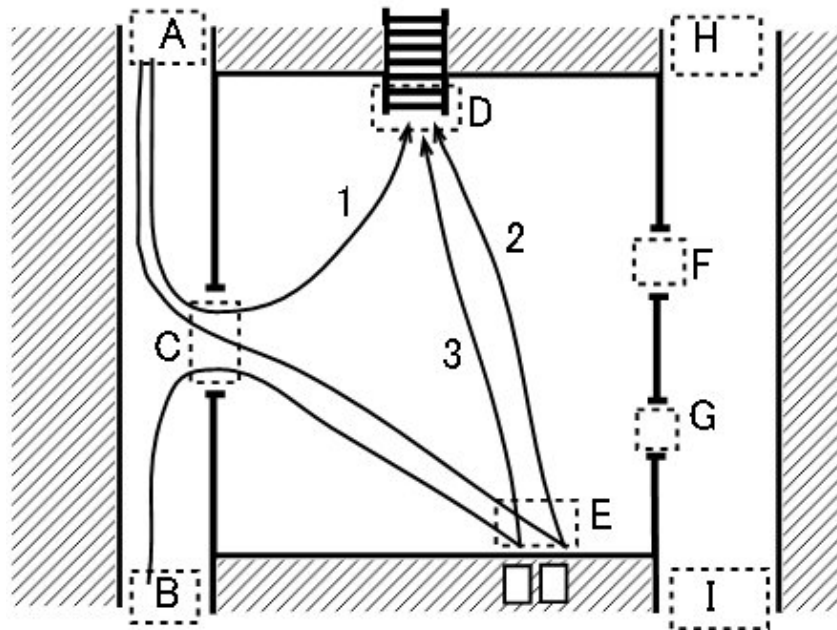


図 4-2：経路地点の模式図

ここで、軌跡 1、2、3 を考える。軌跡 1 は地点 A に出現し、入り口である地点 C を通って階段前である地点 D に向かっている。軌跡 2 は軌跡 1 と同じく地点 C を通り、何かの窓口である地点 E を経由してから地点 D に向かっている。また軌跡 3 は地点 B に出現し、地点 C を通過してさらに地点 E を経由して地点 D に向かう。

このとき、軌跡 2 と 3 とは地点 C から次の経路地点を選択するとき、同じ地点 C から地点 E に向かう場合でも、その遷移確率は異なっている。これは 3.4.1 で解析結果として得られたように、ある地点から次の経路地点に遷移する確率は、過去ののに経由してきた N 地点に依存するからである。

本研究では、都市空間の中の地点をノード、地点間の遷移（経路）を矢印つきエッジとし、各エッジに確率を付与することで確率遷移モデル（ネットワークモデル）として都市空間全体を表現する（下図 4-3）。

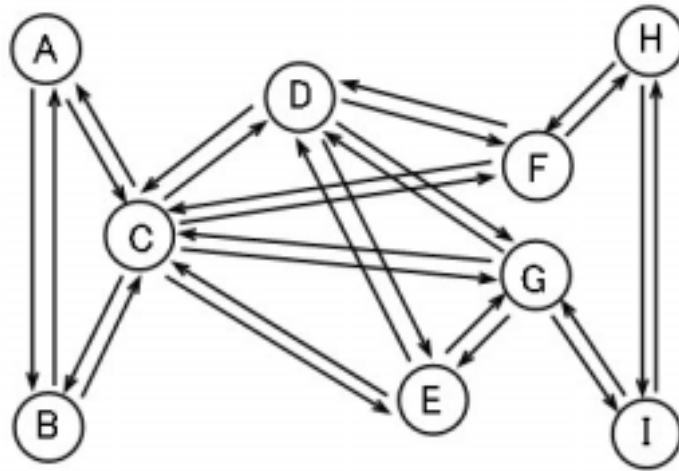


図 4-3：確率遷移モデルとしての都市空間の表現

確率遷移モデルとしては、都市空間の歩行者は過去に経由してきた複数の  $N$  地点に依存する、 $N$  重マルコフモデルに従うと考えられる。この  $N$  重マルコフモデルに従い、歩行者は確率的に次の経由地点を選択しながら都市空間内を歩行する。地下鉄京都駅コンコース階においては、軌跡データ解析により、歩行者は過去の 2 地点に依存する 2 重マルコフモデルに従って歩行していることがわかった。

シミュレーションモデルの中でのこの  $M_t$  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、シミュレーションモデル  $M$  の中での  $M_t$  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  $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-N}$  から次に経由する地点  $X_t$  を求めることであり、

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

と表現することができる。歩行者が最初に出現する地点は  $X_0$  と表す。

#### 4.1.2 地点間の詳細な確率的経路選択

$M_t$  で求められたのは、いわば長期的な目標地点であり、次に経由する地点をおおまかに定めたに過ぎない。実際に歩行者の歩行行動を生成するには、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とはすなわち、現在自分が存在している座標と、目標とする座標とを結ぶベクトル

ルの方向である。現在自分が存在している座標  $pos_{now}(x_{now}, y_{now}, z_{now})$  を、目標とする座標を  $pos_{next}(x_{next}, y_{next}, z_{next})$  とすると、次の一步を踏み出す方向を決定するベクトル  $dir_{next}$  は、

$$dir_{next} = pos_{next}(x_{next}, y_{next}, z_{next}) - pos(x, y, z)$$

により求められる。

シミュレーションモデルの中でのこの段階の目的は、すなわちこの  $dir_{next}$  を求めることである。この  $dir_{next}$  が求められれば、歩行者は  $dir_{next}$  の方向に向かって次の一步を踏み出すことができる。  $M_I$  で求めた次の経由地点  $X_I$  内に目標とする座標  $pos_{next}(x_{next}, y_{next}, z_{next})$  を定めれば、歩行者は次の目的地に向かう次の一步を踏み出すことができる。

各経由地点をメッシュ状にいくつかの小領域に分割すると、ある地点の小領域から次に経由すべき地点の中でどの小領域を選択するかという選択の確率は、過去に通過した  $N$  地点に依存する。実際、軌跡データの解析で知見として得られたように、地下鉄京都駅コンコース階においてはこの確率は過去の2地点に依存することがわかった。このように再現すべき都市空間の軌跡データから、過去の何地点に依存するかを定めることができ、小領域間の遷移の確率を計算しておくことができる。

このようにして、ある地点内の小領域へ向かう確率が計算できる。小領域へ向かう確率が計算できれば、小領域内に一点（例えば小領域の重心座標）をとることにより、歩行者が目標とすべき座標、つまり  $pos_{next}(x_{next}, y_{next}, z_{next})$  を求めることができる。  $pos_{next}(x_{next}, y_{next}, z_{next})$  が求められれば  $dir_{next}$  が求められることになる。

シミュレーションモデル  $M$  の中で、この  $M_{II}$  の目的は、  $M_I$  で求めた次に経由すべき地点  $X_I$  内の一点定めることである。地点  $X_I$  内の一点  $pos_{next}$  を定めるために、最後に経由した地点  $X_{I-1}$  内の現在の座標  $pos_{now}$  と、これまでに経由した  $N$  個の経由地点  $X_{I-1} X_{I-2} \dots X_{I-N}$  が用いられる。つまり、シミュレーションモデル  $M$  の中で  $M_{II}$  の役割は、  $M_I$  で求めた  $X_I$ 、現在の座標  $pos_{now}$ 、および過去の通過地点  $X_{I-1} X_{I-2} \dots X_{I-N}$  から次の目的地  $X_I$  内の目標座標  $pos_{next}$  を求めることであり、

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

と表すことができる。

#### 4.1.3 周囲の状況に応じた経路選択

$M_I$ において都市空間内の経路地点を、 $M_{II}$ において地点間を実際に歩行するための目標座標を定めることができた。この時点で、各地点を経由しながら歩行することが可能である。既存のシミュレーションモデルで、比較的広範囲の都市空間を対象とするシミュレーションで、群集を主にアニメーションとして再現することを目的にした場合は、この段階で十分である。なぜなら、前述したとおり、これらのシミュレーションでは歩行者のインタラクションはあまり重視されておらず、都市空間内のある地点からある地点までを歩行する群集を再現することだけを目的としていたからである。しかし、本研究の目的は、アバターの参加できるシミュレーションである。そのようなシミュレーションを実現するためには、比較的広範囲の都市空間に加え、歩行者が他の歩行者、または周囲の都市空間の都市環境とのインタラクションを行うことが非常に重要である。

3.5.2 で行ったインタラクション解析において、周囲の歩行者とのインタラクションで確率的に別の経路を選択するという結果が得られた。ただし、軌跡データからインタラクションを解析する場合、2次元の軌跡データを3次元仮想空間上に再現することが重要である。一旦3次元に戻すことで、歩行者本来の視界を得ることができ、より現実に近い形でインタラクションの解析を行うことができる。

このように、 $M_{II}$ で求めた地点間の詳細な経路を、周囲の歩行者・環境によって変更しなければならない場合、適切な経路を選択して、 $M_{II}$ で求めた詳細な経路を変更する。詳細な経路を変更するということは、すなわち地点内の目標座標  $pos_{next}$  を変更しなければならないということである。

周囲の歩行者・都市環境の情報に応じて目標座標  $pos_{next}$  を変化させるとき、当然必要となるのが歩行者が得る周囲の歩行者・都市環境の情報である。歩行者が得る情報はその歩行者の視界に入る情報である。3次元仮想都市空間でのシミュレーションでは、その歩行者の視界に入る情報を基にインタラクションを行う。この視界に入る情報を  $I_{view}$ 、この  $I_{view}$  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化した目標座標を  $pos'_{next}$  とする。シミュレーション

モデル  $M$  の中でこの第 III 段階を  $M_{III}$  とすると、 $M_{III}$  の目的は、現在の目標座標  $pos_{next}$  と現在自分がいる座標  $pos_{now}$ 、そして視界に入る情報  $I_{view}$  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  $pos'_{next}$  を求めることである。つまり、

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

と表現することができる。このとき、次の目標座標  $pos_{next}$  が  $pos'_{next}$  に変化したことにより、次の一步を踏み出す方向  $dir_{next}$  は、 $pos'_{next}$  と現在の座標  $pos_{now}$  より求めることができる。

#### 4.1.4 歩行者・環境とのインタラクション

最も局所的な歩行者のインタラクションは、各時点で歩行者が他の歩行者・環境と行うインタラクションである。 $M_{IV}$  では、そのような最も局所的なインタラクションを規定する。 $M_I$ 、 $M_{II}$ 、 $M_{III}$  で、歩行者が数地点を經由しながら歩行することができるようになった。しかし、地点間の歩行途中で歩行者が歩行者が他歩行者、もしくは都市環境と行うインタラクションも考慮しなくてはならない場合が考えられる。実際、3.5.3 で軌跡データの解析結果として得られたように、ある場所で歩行者が環境とインタラクションを行って立ち止まる、ということも考えられる。3.5.3 では、そのようなインタラクションが2次元の軌跡データを一旦3次元仮想都市上に再現することで解析することができることを示した。

ここでのインタラクションは、 $M_{III}$  でのインタラクションとは違い、 $M_{III}$  で求めた目標となる座標  $pos_{next}$  (もしくは続く  $M_{III}$  で修正した目標座標  $pos'_{next}$ ) を修正する必要のない場面を想定する。例えば、3.5.3 で見られたように、歩行している最中に時刻表を見た歩行者はある一定の確率で(時刻表を見るために)立ち止まると考えられる。これは環境とのインタラクションである。また、ある券売機に向かって歩行しており、その券売機前にすでに他の歩行者がいる場合、その後ろに(順番を待つために)並ばなければならない。これは他歩行者とのインタラクションである。もちろん、これらのインタラクションは3次元仮想空間でのシミュレーションにおいて、歩行者の視界に入る周囲の情報  $I_{view}$  を基に行われるものである。 $M_{III}$  までで、次の一步を踏み出す方向  $dir_{next}$  は  $pos_{next}$  と現在の座標  $pos_{now}$  より求められているが、この  $M_{IV}$  でのインタラクシ

ョンでは、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。

このようなインタラクションを定めるにあたって、やはり  $M_{III}$  におけるインタラクション解析と同じように、2次元の歩行者軌跡データを一旦3次元の仮想都市空間に歩行者を再現することによってインタラクション解析を行う。ここで、インタラクション解析を行う場面の抽出は、2次元の軌跡データをプロットすることで行われる。例えば軌跡データをプロットしていると、歩行者が頻繁に立ち止まる場所がある。この場所は2次元の平面にプロットされた軌跡データを眺めるだけでは歩行者が立ち止まる意味がわからないが、一旦軌跡データを3次元仮想都市空間に再現することでその意味を知ることができる。現実を忠実に再現した3次元仮想都市空間であるため、立ち止まった時に歩行者が見ている情報を詳細に知ることができるためである。歩行者の視界を得ることで2次元の軌跡データのままでわからなかったインタラクションを解析することが可能になるのである。

また、このような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モデルを組み込んでおく。if-then ルールで記述されたインタラクションが行われた後、最後に歩行者は他歩行者・障害物の回避、または回避できない場合は歩行の停止を行う。具体的には、各歩行者のから歩行者に向けて伸ばしたベクトル、そして障害物から歩行者に向けて伸ばしたベクトルなどを合成して歩行者にかかる力を計算し、その力を歩行者の進行方向に進む力と合成し、新たな歩行者の進行方向  $dir'_{next}$  を決定する。

このように、この  $M_{IV}$  においては、 $M_{III}$  までで求められた目標座標  $pos_{next}$  (または修正された  $pos'_{next}$ ) によって定められる次の一步を踏み出す方向  $dir_{next}$  を局地的・一時的なインタラクションに従って修正する。修正された進行方向  $dir'_{next}$  はその局地的・一時的なインタラクションによって一時的に修正されるものであって、 $pos_{next}$  (または修正された  $pos'_{next}$ ) を変更するものではない。

シミュレーションモデル  $M$  の中でこの段階を  $M_{IV}$  とすると、 $M_{IV}$  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る。 $dir'_{next}$  が求められることで、歩行者は具体的に次の一步を踏み出すことができ、歩行を行うことができるのである。

つまり、 $M_{IV}$  は以下のように表すことができる。

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

## 4.2 シミュレーションモデルの具体的な動作

前節において、第3章で行った軌跡データ解析の結果を踏まえ、 $M_I$ 、 $M_{II}$ 、 $M_{III}$ 、 $M_{IV}$  の各段階で、歩行者が出現してから経由地点の遷移を行いながら、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。下図は、図4-1で示されたシミュレーションモデル  $M$  の動作を、具体化するしたものである（図4-4）。

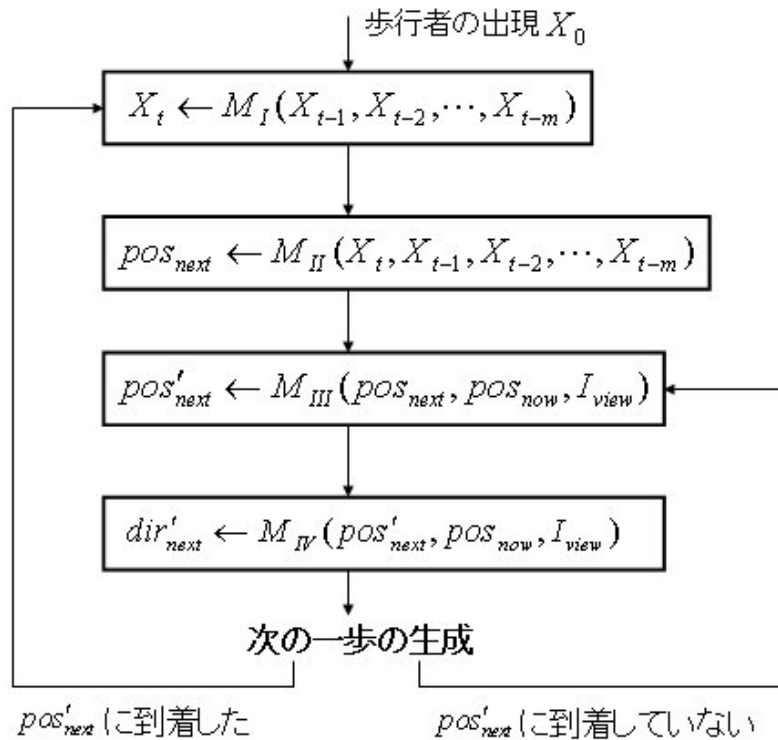


図4-4：シミュレーションモデル  $M$  の具体化

上図で示した計算の流れが、本シミュレーションモデルのアーキテクチャである。まず歩行者は、あらかじめ計算された出現確率で地点  $X_0$  に出現する。ある地点  $X_{t-1}$  に存在する歩行者は、N重マルコフモデルに従った遷移確率に従い、過去の経由地点を踏まえて次の経由地点  $X_t$  を求める。さらに、求めた次の経由

地点と過去の経由地点を用いて、次の経由地点  $X_i$  内における詳細な目標座標  $pos_{next}$  を確率的に定める。次に  $pos_{next}$  を変化させなければならないようなインタラクションが行われる場合、周囲の情報  $I_{view}$  を用いてインタラクションを行い、次の目標座標  $pos_{next}$  を  $pos'_{next}$  へと変化させる。最後に局所的なインタラクションを行って、最終的に次の一步を踏み出す方向  $dir'_{next}$  を決定する。歩行者はこの  $dir'_{next}$  の方向に向かって次の一步を生成して歩行するが、目標としている座標  $pos'_{next}$  へ到達した場合は  $M_i$  に戻り、次の経由地点を決定する。そして最後の地点に到達したら、歩行を停止して歩行者は消滅する。

## 第5章 シミュレーションモデルの実装と評価

### 5.1 シミュレーションモデルの実装

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。実装は仮想都市シミュレーション環境 FreeWalk 上に行う。FreeWalk では、コンピュータによって制御される人間のキャラクタ（エージェント）と、利用者がキーボードを使って自分の分身として操作するキャラクタ（アバター）が相互に、または都市空間と様々なインタラクションを行いながら行動する。この仮想都市空間内を歩行する歩行者は、現実の歩行者と同じ視界を持つ。さらに歩行に際しては、次の一步を踏み出す計算を一步一歩行い、だんだんとペースを速めて加速していく。階段を上ったり衝突判定を行う計算はすべてリアルタイムで行われるため、より現実に近いシミュレーションを行える環境と考えることができる。

モデルの実装には、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。この 300 人分の軌跡データを用いて、まずモデルの  $M_I$ 、 $M_{II}$  を具体的に、つまり地点間の遷移確率および地点間の詳細な経路選択の確率を求める。次は  $M_{III}$ 、 $M_{IV}$  の歩行者・環境とのインタラクションだが、これは今回インタラクション解析時に 3.5.2 と 3.5.3 において得られたインタラクションを実装した。つまり、3.5.2 で得られた、改札における周囲の歩行者密度と他の改札口へ移動する確率との関係、そして 3.5.3 で得られた路線図を見て一定の確率で立ち止まるというインタラクションを実装したのである。路線図を見て立ち止まる確率は、実際に上記の 300 人のうち路線図前で立ち止まった人数を力

ウトすれば求めることができる。また、立ち止まる平均的な時間も求めることができる。このようにして、実際に FreeWalk 上に地下鉄京都駅コンコース階での群集シミュレーションを行うためのシミュレーションモデルを実装した。

## 5.2 シミュレーションの実行と評価

今回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シミュレーションモデルを評価した。今回シミュレーションを実行・評価したのは、地下鉄京都駅の券売機や改札口があるコンコース階である。地下鉄京都駅の業務時間内において、特徴的な 2 つの時間帯がある。ひとつはコンコース階と階段でつながっているプラットフォーム階に電車が到着した時間帯、もうひとつは電車が到着する合間の時間帯である。今回は、この 2 つの時間帯において実装したシミュレーションモデルを評価した。

### 5.2.1 電車が到着する合間の時間帯

電車が到着する合間の時間帯から選んだ 10 分間に出現した歩行者は 243 人であったので、この 243 人を、各出発地点の確率に従って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。

単位時間当たりの歩行者の出現数は、ポアソン分布に従うと仮定する。単位時間内に平均  $\lambda$  人の歩行者が出現する場合 ( $\lambda$ : 平均出現率)、単位時間内に  $r$  人が出現する確率  $P_{appear}(\lambda, r)$  は

$$P_{appear}(\lambda, r) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^r}{r!}$$

で与えられる。単位時間を 1 分とすると、10 分間に 243 人出現させる場合は、平均出現率  $\lambda$  は  $\lambda=24.3$  となる。この数値を上式に代入し、単位時間 1 分内に出現する人数  $r$  を  $r=1, 2, 3, \dots$  について計算し、 $P_{appear}(\lambda, 1)$ ,  $P_{appear}(\lambda, 2)$ ,  $P_{appear}(\lambda, 3)$ , ... を求める。このように得られた確率に従い、シミュレーション内では単位時間ごとに歩行者を出現させる。歩行者の出現位置は、シミュレーションモデルの  $M_i$  で与えられた初期位置への出現確率によって決められる。

比較したのは、上改札、下改札及び階段における 1 分あたりの平均通過人数と平均通過速度である。下図 5-1 はシミュレーションの様子である。

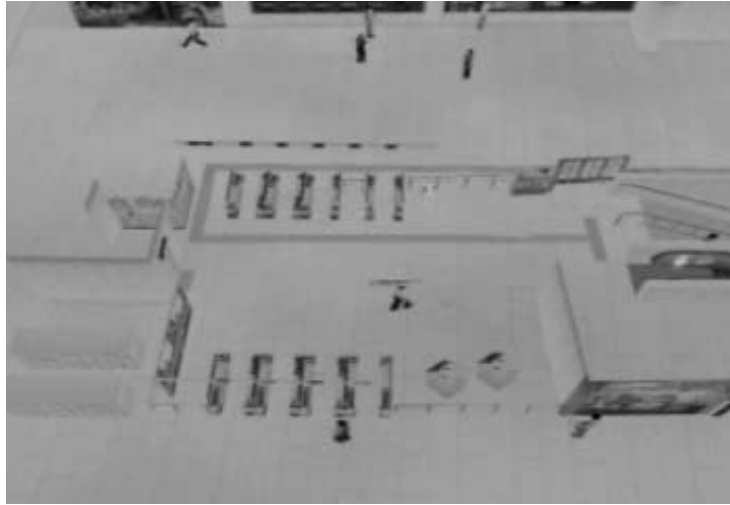


図 5-1：電車が来ていない時間帯のシミュレーション

以下の表はシミュレーションの結果である。

測定場所	平均通過人数（人/分）		平均速度（m/秒）	
	実データ	再現結果	実データ	再現結果
上改札（外 中）	7	8	1.22	1.05
上改札（中 外）	1	2	1.24	1.13
階段（上 下）	12	10	1.52	1.45
階段（下 上）	1	2	1.43	1.52
下改札（外 中）	5	6	1.32	1.19
下改札（中 外）	1	2	1.42	1.32

この電車が到着していない時間帯のシミュレーションでは、歩行者の数が少なく歩行者間のインタラクションが起こることはほとんどなかった。つまりこのシミュレーション結果からは、シミュレーションモデルの地点間の確率遷移の正しさがわかることになる。上表より、平均通過人数と平均速度について、各地点での通過人数と速度の傾向がほぼ再現出来ていることを確認した。

### 5.2.2 電車が到着した直後の時間帯

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、非常に混雑する（図 5-2）。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5-3)。

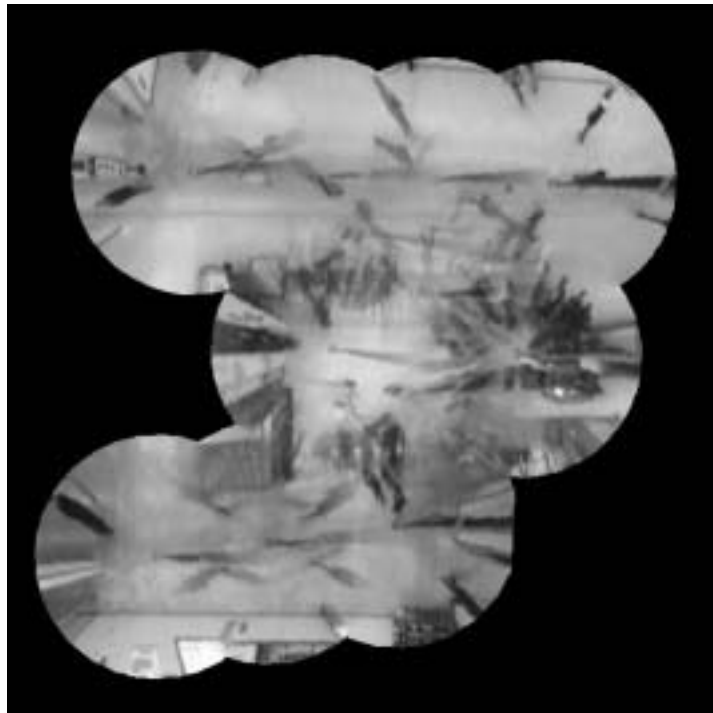


図 5-2 : 電車到着直後の混雑している様子

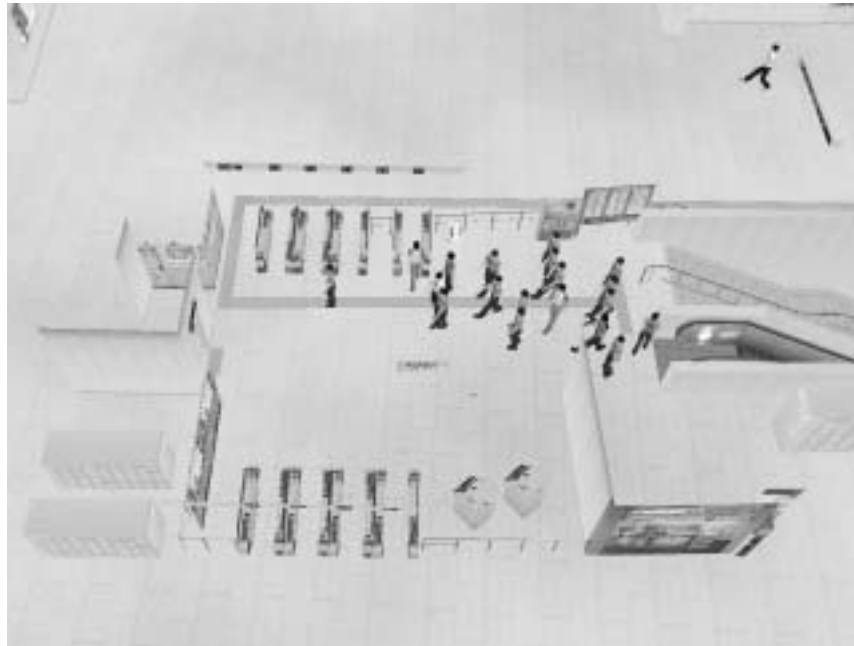


図 5-3：電車到着直後のシミュレーション

下の表は、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。電車到着直後については、改札付近が非常に混雑し、歩行者間・環境とのインタラクションが活発に行われる。インタラクションが非常に重要であるため、改札口ひとつひとつについてその平均通過人数と平均速度とを比較した。

測定場所	平均通過人数（人/分）		平均速度（m/秒）	
	実データ	再現結果	実データ	再現結果
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

下改札 1 (外 中)	0	0	0.0	0.0
下改札 1 (中 外)	15	12	1.36	1.20
下改札 2 (外 中)	2	1	1.40	1.50
下改札 2 (中 外)	10	10	1.34	1.30
下改札 3 (外 中)	0	0	0.0	0.0
下改札 3 (中 外)	3	2	1.43	1.33

このシミュレーションを行う前に、電車到着直後について、実装したシミュレーションモデルからインタラクションに関する部分を除去したモデルを用いてシミュレーションを行った。そのインタラクションを考慮しないシミュレーションでは、上改札 1、2 付近で歩行者が非常に混雑して歩行者が団子状態になってしまい、明らかにコンコース階の群集を再現することはできなかった。

しかし、インタラクションを考慮した本来のシミュレーションモデルを用いたシミュレーションでは、得られた上表の結果からわかるように、通過人数と歩行速度の傾向がほぼ再現できていることがわかる。つまり、実装したシミュレーションモデルに組み込まれたインタラクションが正しく機能していると言える。ただし、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。

## 第6章 結論

本研究は、JST「デジタルシティのユニバーサルデザイン」プロジェクトの一環として行われた。デジタルシティでは、市民が、コンピュータ上に2次元の地図、または2次元、3次元の仮想都市として再現された空間の中で情報収集、コミュニケーション、観光、危機管理など様々な活動を行う。デジタルシティの中でも、本研究は現実の都市空間が忠実に再現された仮想都市をインタフェースとし、市民がアバターを操作することで他の市民・エージェントとインタラクションを行う状況を想定した。そのようなリアルな仮想都市の中でアバターが活動するためには、仮想都市の中で活動するほかの歩行者（群集）も現実に忠実に再現（シミュレート）する必要がある。そのため本研究では、ア

バターの参加する仮想都市における群集シミュレーションを実現するシミュレーションモデルの構築を目指した。アバターの参加を想定した場合、仮想都市空間は比較的広範囲で、かつ現実を忠実に再現した精緻な3次元の仮想都市空間を用いる必要がある。このとき、以下に示す問題点が存在した。

比較的広範囲な都市空間を想定したシミュレーションの場合、歩行者間・歩行者と環境とのインタラクションのような局所的なインタラクションをシミュレーションに再現することは非常に難しい。都市空間内の数地点を移動するという広範囲を扱うシミュレーションモデルと、歩行者・環境とのインタラクションという局所的なシミュレーションモデルを同時に扱うことは既存のモデルでは考慮されていない。

本研究では、この問題に対し、現実の歩行者の詳細な軌跡データを用いることで解決を図った。詳細な軌跡データは地下鉄京都駅の天井に設置されているカメラの映像から抽出した。まず、一般的に都市空間の中を歩行する歩行者のモデルを3段階に分けてモデル化した。そのモデル化に従い、軌跡データを解析したところ、次のような知見を得た。

- ・ 都市空間の中で歩行者が経由する地点間の遷移確率は、過去に経由した数地点に依存し、N重マルコフモデルで表現することができる
- ・ 地点間の詳細な経路の選択確率も、過去に経由した数地点に依存する
- ・ 2次元の軌跡データを3次元仮想空間に再現することにより、周囲の歩行者とのインタラクションをインタラクションを実行する確率として、また環境とのインタラクションを簡単なルールで抽出することができる

これらの知見を基にし、都市空間を歩行する歩行者の3段階のモデル化を、軌跡データを用いることを基に4段階 ( $M_I$ 、 $M_{II}$ 、 $M_{III}$ 、 $M_{IV}$ ) に具体化した。 $M_I$ 、 $M_{II}$  では地点間の遷移を、 $M_{III}$ 、 $M_{IV}$  では歩行者・環境との間のインタラクションを考慮し次の一步を決定する。この具体的に設計されたシミュレーションモデルを軌跡データを用いて実装し、シミュレーションを実行した。そして他の軌跡データとの比較を行うことで評価を行い、歩行者の様子が再現できることを確認した。

本研究では、比較的広範囲な都市空間での歩行者の詳細な軌跡データが得られた際の、3次元仮想都市の群集シミュレーションモデル構築法を提案した。既存のシミュレーションにおいては広範囲かつ詳細な軌跡データが得られることはなかったため、本研究の新規性は、2次元の詳細な軌跡データのみを用いて3次元仮想都市におけるシミュレーションモデルを構築した点にある。詳細な軌跡データを用いることで、より客観的にシミュレーションモデルを構築できると考えられる。都市空間にカメラやセンサなどが多く取り付けられつつある現在、歩行者の軌跡データが収集されることは十分現実的である。ある都市空間で実際に歩行している歩行者の軌跡データを用いることで、その都市空間に特化した、より詳しい群集のシミュレーションを行うことができると考えられる。

本研究のアイデアと貢献は以下の通りである。

#### 軌跡データを用いたシミュレーションモデル構築

既存のシミュレーションモデルには目的別に考えると主に2つの系統に分かれていた。1つは比較的広範囲の都市空間内の群集を再現するものであり、主にアニメーションの分野で行われていた。もう1つは物理・建築の分野で行われ、狭い都市空間において歩行者・環境との間の詳細なインタラクションを再現するものであった。本研究では、現実の都市空間を忠実に再現したデジタルシティ上で市民が活動することを想定し、アバターが参加できるシミュレーションを目指したため、2つのシミュレーションの目的を2つとも実現する必要があった。そこで、本研究では広範囲かつ詳細な歩行者の軌跡データを用いることでこの目的を達成した。

#### 2次元軌跡データを3次元仮想都市空間に再現することによるインタラクションの解析

現実の都市空間を歩行する歩行者は、3次元の都市空間の中で視界に入る周囲の歩行者や都市環境とインタラクションを行っている。しかし、シミュレーションモデルの構築に用いる軌跡データは2次元の座標値の連続に過ぎない。この軌跡データを平面にプロットしただけでは3次元都市空間でインタラクションを行っている現実の歩行者が行っているインタラクションを解析することは不可能である。そこで本研究では、2次元の軌跡データを一旦3次元の仮想

都市空間に歩行者として再現した。現実を忠実に再現した精緻な3次元仮想都市空間を用いるため、仮想空間内に再現された歩行者は、軌跡データとして表現されていた歩行者が現実空間で得ていた視覚情報を正確に得ることができる。この特徴を用いれば、軌跡データから詳細なインタラクションを解析することが可能になる。

## 謝辞

本研究を行う機会と環境を与えて下さり、熱心にご指導していただいた石田亨教授に深謝いたします。そして日頃より有益なご助言をくださる中西英之助手をはじめ、石田研究室・デジタルシティ研究センターの皆様にご心より感謝いたします。

## 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] Adam Kendon : **Conducting interaction: patterns of behavior in focused encounters, Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 1990.**
- [5] 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.**
- [6] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek : **Simulating Dynamical Features of Escape Panic. Nature Vol. 407, pp. 487-490, 2000.**
- [7] 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.

[8]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.

[9]高柳英明, 渡辺仁史: 事故に学ぶ-明石花火大会で起きた歩道橋事故- 日経アーキテクチャー, 2001 8-20 (No.699) 号

[10] Craig W. Reynolds : Steering Behaviors For Autonomous Characters, Conference Proceedings of the 1999 Game Developers Conference, pp.763-782, 1999.

[11]Craig W. Reynolds : Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, Computer Graphics 21(4) (SIGGRAPH 87 Conference Proceedings) pp. 25-34, 1987.

[12] Toshihiro Osaragi : Modeling of Pedestrian Behavior and Its Applications to Spatial Evaluation, AAMAS'04.

[13] 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.

[14]Soteris Stylianou, Marios M. Fyrillas, and Yiorgos Chrysanthou : Scalable Pedestrian Simulation for Virtual Cities, VRST'04, November 10-12, 2004, Hong Kong

[15] 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.