

1-3 CAを用いた歩行シミュレーションモデルの構築

Construction of pedestrian simulation model by CA

近田康夫*

廣瀬 智士**

城戸隆良***

Yasuo CHIKATA

Satoshi HIROSE

Takayoshi KIDO

【抄録】 歩行者が多く集まる地下道などの施設においては、災害時の対策をたてるために歩行者の振舞いを推論することが必要であるが、心理学的な要素を含むため人間の歩行行動を数学的に記述するのは難しい。本研究では、セルラ・オートマトンを使用した歩行者シミュレーションモデルの構成を試みた。特徴は、まず、既存の単独迷路歩行実験結果に基づいて単独歩行モデルを作成し、それを群集歩行モデルへと発展させた点にある。オートマトンの属性を実験結果を再現するための最小限度に留めることで、比較的単純なモデルで群集歩行を再現(既存のシミュレーション結果を再現)できることが示せた。

【Abstract】 It is necessary to infer the behavior of pedestrians, to prevent the problem occurrence in a congestion and an emergency. However, the walk action of the human is difficult to describe with a numerical formula, because there is a psychological factor. In this study, the simulation model of the pedestrian that used Cellular Automaton was constructed. And, the modeling of individual walk action is based on an experiment result. As a result, it was shown that the fundamental walk can be simulated with a simple rule.

【キーワード】 歩行者シミュレーション, セルラ・オートマトン

【Keywords】 pedestrian simulation, cellular automaton

1. はじめに

近年、構造物は安全性、経済性、施工性ととも、使いやすさ、環境との調和などの点にも重点がおかれるようになった。歩行者によって利用される構造物ならば、歩行行動が快適かつ安全な空間を有する必要があり、特に不特定多数の人が利用する場合には混雑時や非常時に問題が生じないようにしなければならない。

1995年の阪神大震災以降、緊急時の避難行動については特に注目が集まっており、構造物の耐震性、免震性、耐火性などに加え、災害時の避難計画などを構造物の防災性と関連づけて総合的に検討すべきであるということが強く認識されるようになった。この防災対策や計画を立案するうえで、災害時の人間

の行動を予測しておくことは極めて重要なことである。しかし、設計段階で人の動きを実際に検証することは不可能であり、また災害時の避難行動などは実際に検証するには危険を伴う。そこで、人間の歩行行動をシミュレーションする試みがなされている。例えば、個別要素法を用いたシミュレーション手法の提案¹⁾、火災時の延焼を考慮したシミュレーション(堀内ら²⁾、防災要員と避難者間の情報伝達を考慮した避難行動シミュレーション³⁾、そして、人間の主体性を考慮したシミュレーションモデルの開発⁴⁾等をあげることができる。これらの研究を通して、避難時行動の詳細な再現を行う努力がなされている。

一方、セルラオートマトン(CA:cellular automaton, 以下CA)を用いた例もある⁵⁾。CAを用い、歩行者個人個人に歩行のための規則を適用させ、その

* 連絡先 〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20 金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻 助教授 工博
TEL.076(234)4634 e-mail:chikata@t.kanazawa-u.ac.jp

** 西松建設株式会社

*** 金沢大学工学部 技術専門職員 博(工)

相互作用として群衆歩行行動のシミュレーションモデルを構築する。これは群衆を群衆としてではなく歩行者の集合としてとらえる方法であり、より現実に沿ったシミュレーションモデルが構築できる。また歩行の軌跡等、歩行者の行動をヴィジュアルに理解することが可能となる。詳細な行動(ルール)の記述を行わず、最小限のルールを与えて、CAの自己組織化、創発能力を利用することが期待できるのである。

本研究でもCAを用いるが、既存のCAを用いたシミュレーションと異なる点は、一人の人間の迷路脱出実験の結果に基づいて単独歩行CAモデルをまず構築し、そこに最小限の付加的な行動ルールを追加することで群集モデルを構築していることである。構築した群集モデルの妥当性は他の既存のシミュレーション結果との比較により行っている。これにより、複雑な群集としてのルールを記述しなくても既存の群集モデルに相当するシミュレーションが可能かどうかを検証できる。

なお、本研究では歩行シミュレーターをJavaで開発することにより、マルチプラットフォームでの実行を可能としている。

2. セラオートマトン

外部からの介入なしで組織が自然に形成されることを自己組織化(self-organization)と呼ぶ。自己組織化現象の最も大きな特徴は、誰かの指示や意図によって組織が形成されるのではなく、全体の系を形成する各要素がまとわりと相互の関わり合い(局所的な相互作用)を積み重ねていくうちに、組織が自然に形成されるという点である。

セラオートマトン(以下CA)はこのような局所的な相互作用の原理に基づく計算手法である。その特徴は、簡単なセル間の局所的相互作用から複雑な現象を再現できることである。

CAは同一にプログラムされ、他と相互作用するオートマトン(automata)を細胞状(cellular)に配列させたものであり、この配列させたオートマトンのことをセル(cell:細胞)と呼ぶ。この配列は通常、1次元の線状、2次元の格子状、あるいは3次元のかたまりという形態をとる。

CAは本質的には次にあげる三つの要素を有する。

状態(state) :

実現可能な値の有限な数の集合に属する値をとる変数であり、その応用に依存した解釈が与えられるセルの性質。

近傍(neighborhood) :

注目しているセルの周辺のセルの集合。

遷移規則(transition rules) :

あるセルの現在の状態とその近傍の状態をもとにそのセルの状態を変化させるための規則。

CAは空間、時間、および状態が離散的な活動的システムである。規則的な空間格子状のセルは、有限な状態の一つを有し、以前の時間ステップにおける状態と近傍の状態、ならびに局所的ルール(遷移規則)によってその状態を変化させる。すべてのセルは同期して変化するため、全体は離散的な時間刻みで変化する。

本研究の目的は群集歩行シミュレーションモデルの構築にある。群衆の流れは、定量化が困難であり典型的な複雑系に分類される。しかし、個人個人は何らかの規則を持って行動しており、その相互作用が群衆としての流れを形成しているものと推測される。よって、簡単なセル間の局所的相互作用から複雑な現象を再現できるCAは、群衆歩行をシミュレーションする方法として適しているものと考えられる。

3. 歩行者とその空間のモデル化

(1) 空間のモデル化

シミュレーションモデルを構築するにあたり対象とする空間をモデル化する必要がある。本研究では2次元CAモデルを採用し、空間格子としてもっとも代表的である図-1のような空間格子をとるものとした。このメッシュ構造で分割されたそれぞれの要素をセルと呼ぶ。

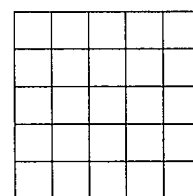


図-1 採用する空間格子



図-2 セルの寸法を50cmとした時の人体楕円配置
(a) 前向き (b) 斜め向き

(2) 歩行者のモデル化

シミュレーションにCAを採用するのであるから、セルのとりうる状態の1つとして、「歩行者」を設定する。つまり、図-1で示したメッシュ構造の1つのセルに1人の人間が存在できるような空間モデルとする。それは、1つのセルに人間1人が存在できるとし、そこからセルの一边の寸法を定めることになる。

人体の平面図は人体楕円と呼ばれる楕円で表され⁶⁾、その寸法は45cm×60cm(縦×横)である。

仮にセルの一边を50cmとし、人体楕円を配置した様子を図-2に示す。

矢印の向きは人の向いている方向を示す。人体楕円は45cm×60cmなので、50cm×50cmのセルには納まりきらない。しかし人体楕円は歩行者が物を持ちたり、他の人との接触を避けたり、また身体を揺らしたりなどするための余裕を考えたものであり、実際の寸法よりも大きい寸法である。

正常歩行時の身体の揺れは左右に4cmである⁶⁾。身体の揺れを考慮しなければ $60 - 4 \times 2 = 52\text{cm}$ であり、それでも左右に1cmずつはみ出るわけではあるが、その程度の値ならば隣の人と接触したとしても、人が存在できない範囲ではない。よってセルの一边の寸法は50cmでモデル化するものとする。

(3) セルのとりうる状態

セルのとりうる状態としては以下のものがあげられる。

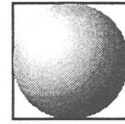
- (a) 歩行者
- (b) 障害物
- (c) 歩行可能空間

(b)は、壁や柱などの歩行者が移動できない空間である。また(c)は、何も無い空間や、扉、階段等の歩行者が移動できる空間である。ただし、本研究では平面空間だけを想定しているので、セルの状態として階段等は実際にはあり得ない。図-3にセルがとりうる状態を示す。

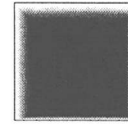
(4) シミュレーションの原則

モデル化と予測の原則は、多数の、感度の鋭くない、一団となったインプットが、より信頼性のある結果を生み出すということである。判定し難い多くの要因がある場合、システム全体の動きは不安定なものとなり、結果も信頼性のおけないものになって

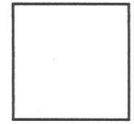
しまう。



(a) 歩行者



(b) 障害物



(c) 歩行可能空間

図-3 セルがとりうる状態

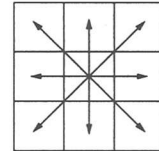


図-4 移動可能セル

歩行者のトリップは非常に変数が多いので、全てを考慮した場合はシステムの変動が大きく不安定なものとなる。

そのために本研究では、シミュレーション結果をより信頼性のおけるものにするために、できるだけ単純な、換言すると最少量の規則によりモデル化している。以下に本研究における歩行シミュレーションの原則を示す。

空間 - 閉ざされた平面空間

たとえば地下空間や、部屋といったような空間を想定し、かつ階段等で上下に移動することはない。

歩行者の目的 - 空間からの脱出

すべての歩行者の目的は、現在いる空間からの脱出で統一する。

歩行者 - 個人的特徴はない

性別の差や個人の心理的要因の違い等は考慮せず、すべての歩行者は同一のルールによって動く。

歩行者の移動 - 隣接する8つのセル

時間ステップが1進むごとに、歩行者は隣接する8つのセルから1つを選択して移動する。しかし、場合によっては現在地に留まることも可能である。歩行者の移動可能なセルを図-4に示す。

4. 単独歩行シミュレーション

(1) 概要

CAの特徴の1つは「簡単なセル間の局所的相互作用から複雑な現象を再現できる」ことである。セルの状態の1つが歩行者であるならば、求めうる「複

雑な現象」とは群衆歩行行動のことである。ここでは群衆歩行シミュレーションモデルを構築するために必要となる、セル間の局所的相互作用、つまりCAにおける近傍と遷移規則を定めるために単独歩行シミュレーションモデルを構築する。つまり全体の系を構築している各要素である一人一人の歩行者が、どのようにして歩行行動を行うかを検証する。この歩行行動をどのように決定するかという規則のことを、以下「歩行ルール」という言葉で表すことにする。

近傍は基本的には注目するセルと隣接しているものである。しかし歩行行動をシミュレーションする場合には、たとえば、障害物の確認等の近傍以外の離れたセルとの情報交換も必要となる。そういった意味で本研究では、近傍にとらわれないCAモデルを構築することになる。

横山らは図-5に示される迷路を用いて緊急時の人間行動に関する被験者実験を行った。40人の被験者の迷路内での行動を検討し、それを3つのパターンに分類した。そのうちの1つを図-6に示す。横山らはこれを、同じ場所を何度も往復するなどの無駄な動きが全くなく、体系的な探索行動によって脱出したパターンと分類している。本章ではこの行動パターンを再現することを目標とし、主に経路選択に重点をおいてその再現性を検証する。

(2) 時間のモデル化

ここで、時間ステップの1ステップを何秒でモデル化するか、ということについて検討する。歩行者がセルの中心から近傍セルの中心へと移動するものとする、セルの配列に平行に移動する場合は1ステップで0.5mの移動となり、斜めに移動する場合は約0.71m移動することになる。

仮に1ステップを0.5秒でモデル化すると、1秒(2ステップ)での平均移動距離は1.21mとなる。これは平均歩行速度79.5m/分⁶⁾(=1.33m/秒)より若干遅いが、自由歩行速度の最低限である45m/分⁶⁾(=0.75m/秒)は上回っており、自由歩行速度の範囲内に含まれる。以上より、単独歩行シミュレーションモデルにおいては、1ステップを0.5秒でモデル化する。

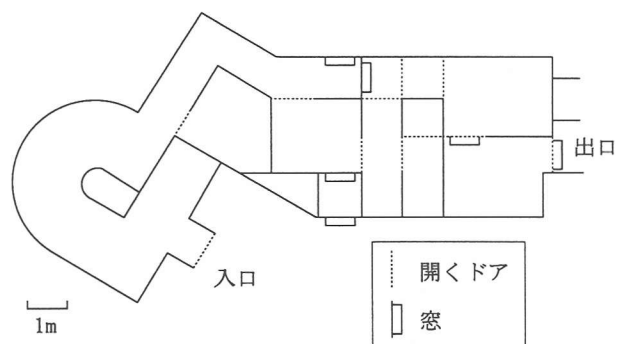


図-5 迷路の平面図⁷⁾

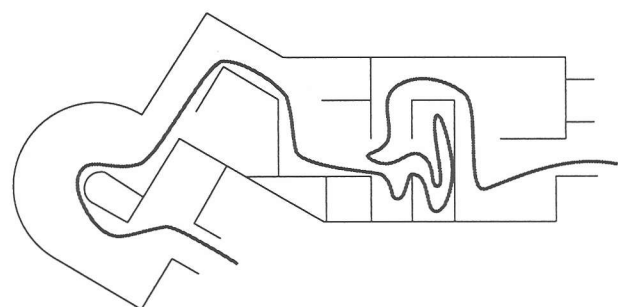


図-6 目標とする行動パターン⁷⁾

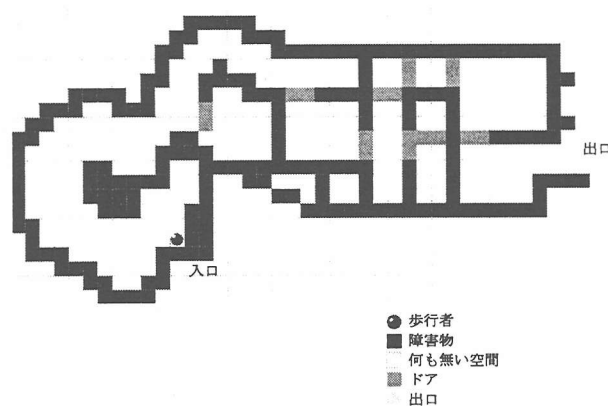


図-7 シミュレーション開始時

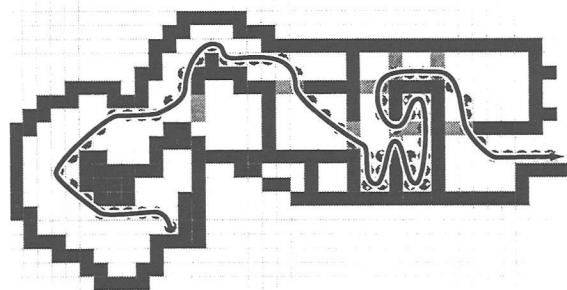


図-8 シミュレーション結果

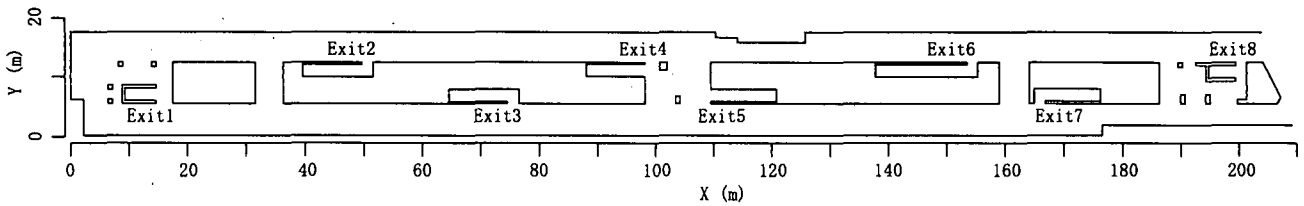


図-9 地下街平面モデル¹⁾



図-10 本研究における空間のモデル化

(3) シミュレーション結果

シミュレーション開始時の様子を図-7に示す。歩行者が入口から出てしまうのを防ぐために、入口は障害物で塞いである。また、セルが正方形であるために、空間のモデル化の段階で実際の迷路と比較して多少のずれが生じている。

シミュレーションの結果を図-8に示す。分かりやすくするために歩行者の歩いた軌跡を表示しているが、歩行者が通った跡は何もない空間である。

これは目標とするパターン(図-6)と比較すると、多少滑らかさにかけるものの、選択した経路は同じである。よって、このシミュレーションによって単独歩行が良く再現できていることがわかる。

この時の歩行ルールの代表的なものを以下に示す。

- 障害物を越えて進むことはできない。
- 視野内から目的地を設定
- 目的地が決定すれば、目的地に近づくように移動
- 目的地に到着したら新たに目的地を設定
- 目的地が出口でなければ出口を探索

他にも、照明の影響やドアの存在についても考慮してある。

障害物の回避に関しては建部らの一連の研究^{8),9)}が参考になった。

なお、このシミュレーションに要した時間(計算だけでなく、ファイル入出力や描画に要する時間も含めた時間)は以下のシステムで4486ms(msミリ秒)であった。

表-1 開発環境

OS	Windows NT Workstation 4.0
CPU	Intel Pentium III 400
Memory	196M Byte
Java コンパイラ	Java 2 SDK, Standard Edition, v 1.2
Java 実行環境	AppAccelerator 1.2.010(Inprise JBuilder 3に装備されているジャストインタイム(JIT)コンパイラ。コンパイラではあるが、いわゆる開発用統合環境であるので、実行環境に分類しておく。)クラスライブラリはSwingを主として、JDK1.2.2で提供されているものを使用している。

5. 群集歩行シミュレーション

(1) 概要

ここでの目的は第4章で構築した単独歩行シミュレーションモデルを発展させて、群集歩行シミュレーションモデルを構築することにある。それにあたり、清野ら¹⁾の地下街における避難行動解析を参考に解析対象を設定する。

清野らは図-9でモデル化された地下空間に575人の避難者を通路上にランダムに配置させ、個別要素法を用いたシミュレーションによってその避難行動を解析した。地震等の被災直後に、放送や現場での指示等に従って全避難者が一斉に適切な経路を選択して避難し始める状況を想定し、全避難者が最も近

い出口に向かって避難を開始するものと仮定している。また、その際地下空間内部の変化や、火災・煙などの要因の影響は考慮していない。そのシミュレーション結果の一例では、約80秒でほとんどの者が避難に成功した。

一方、本研究でのCAによるシミュレーションでは、各個体は出口を知らされていない。自分で出口を見つけるという行動(ルール)が組込まれる。

(2) 空間のモデル化

シミュレーションを実行するにあたり、図-9の空間を図-10のようにモデル化した。また、本研究では平面空間しか対象としていないために、地下空間から出るための階段の入り口を出口に設定した。

(3) 歩行ルール

群集歩行における歩行ルールは、単独歩行シミュレーションの歩行ルールに、対人回避行動を組み込み、解析対象とする空間モデルに合わせて若干のアレンジを加えたものである。ただし、動物の群れのシミュレーションのように、先行する個体や周りの個体の行動を監視して自分の行動を決定するといった、“群集としてのモデル化”は特別には行っていない。CAを用いる理由は、そのようなルールを与えなくても結果として群集として行動する自己組織化あるいはルールの創発が行われる点にある。

a) 視野と視野角

歩行者は自ら歩行目的地を設定し、その目的地に近づくように動く。そして目的地に到着した後、新たに次の目的地を設定する。その目的地は、視野の範囲内から設定する。つまり本研究のシミュレーションモデルでは、歩行者に視野を導入している。これは歩行者の現在地と進行方向から、擬似的に視野を計算するということである。図-11に示すように、複数の線を歩行者から障害物にぶつかるまで伸ばし、その線の長さの和を擬似的な視野とする。また進行方向を0°とし、左右にそれぞれ1°ごとに線を伸ばすこととする。

この歩行者から障害物まで伸ばされる線のことを以下「視野線」という言葉で表すことにする。視野角を α 、正面すなわち0°の時の視野線の長さをC、右側に i° の時の視野線の長さを $R(i)$ 、左側に i° の時の視野線の長さを $L(i)$ とすると、視野Vは次式で表

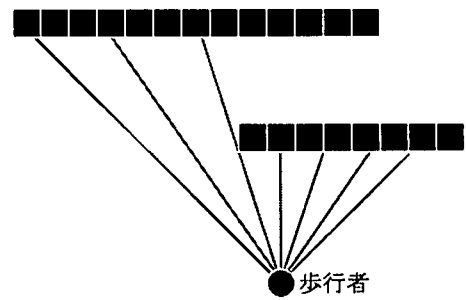


図-11 擬似的な視野の計算

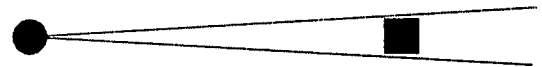


図-12 視野線の中に障害物が存在する場合

される。

$$V = C + \sum_{i=1}^{\frac{\alpha}{2}} R(i) + \sum_{i=1}^{\frac{\alpha}{2}} L(i) \dots\dots\dots (1)$$

以下、特に注意書きのない場合は視野という言葉は、この方法で計算される擬似的な視野を指すものとする。しかし、この方法で視野を計算するとき、次に示す2つの点が問題となる。

1. 障害物がなければ視野線は ∞ まで伸びる。
2. 1°ずつ視野線を伸ばすので、視野線の中に障害物が存在する可能性がある。

1に関しては、本研究では閉ざされた空間しか対象にしていないので起こりえない。

2の場合のイメージを図-12に示す。

ただし、分かりやすくするために2本の視野線の間角度は1°を表してはいない。このような場合が生じるのは、隣り合う2本の視野線がセル一辺(セルは正方形)の長さよりも離れているときである。セルと障害物との距離を r とし、セル一辺の長さを1とすると r は次式で示される。

$$r > 360 / (2 \times \pi) = 57.30 \dots\dots\dots (2)$$

つまり障害物と歩行者が約57セル以上離れており、かつその間に他の障害物が存在していない場合に、視野線の中に障害物が存在する可能性があることになる。本研究ではセルの一辺は0.5mでモデル化しており、57セルは28.5mとなる。このような問題を回避するために視野線の最大長さは57セルとする(単独歩行シミュレーション時には空間モデルの形状からこのような問題は起こり得ないので、視野線の最大

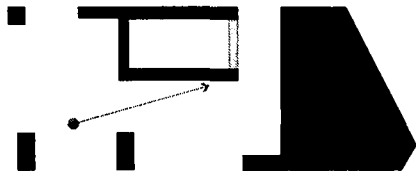


図-13 近くにある出口を視認できない例 (Exit8)

長さは設定していなかった). ただし, 視野線を伸ばす角度を小さくすることによって, 視野線の最大長さを大きくすることは可能である.

快適に見ることのできる視野角は 60° から 70° 程度⁶⁾ であるとされている. ここでは, 変数である視野角は, 周囲を見回すということを考慮して 180° で設定した. 視野角を 180° で設定することにより, 行き止まりで引き返してこない限りは, 一度通った経路に戻ることはなくなる. また視野に入る地点を目的地としているので, 障害物回避行動も自ずからこの歩行ルールに含まれることとなる.

ただし最初の1回, つまりシミュレーション開始時のみ視野角を 360° で設定し, 周囲の全てを見回し自ら進行方向を決めるようにする.

この視野角の設定は, 単独歩行シミュレーション時に導入したものをそのまま使用している.

b) 標識の設置

歩行者の目的は空間からの脱出であり, それは出口を探すことと同じことである. つまり, 視野に出口が存在するならば目的地を出口とすればよい. しかし想定している空間モデルにおいては, 歩行者の近くに出口が存在していたとしても出口を視認できない場合が生じる. その例を図-13に示す(図-9も参照されたい). グレイで塗りつぶされている領域が出口を表し, グレイの円が歩行者を表している. このように視野線が障害物に遮られるために, 近くに存在する出口を認識することができない. 現実の場合にこのような事態が生じたとしても, 出口の存在を知り得るのは, 出口の付近に出口が存在することを示す標識が存在するからである. 以上より, 出口の前に, 出口を示す標識を設置することとする. た

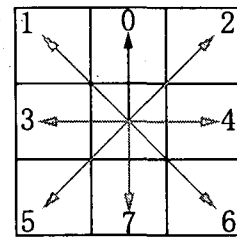


図-14 回避方向

だし, 標識は高い位置に設置され, 構造的な障害物以外のもの, すなわち群集によって視認が妨げられることはないものとする.

c) 対人回避行動

歩行者の対人回避行動は, 回避距離内に他人が存在した時に相手の行動を予測したうえで行われる. しかし, 本研究ではシミュレーションの単純化のために, 次に移動しようとしているセルに他人が存在している時に回避行動を行うものとした.

注目する歩行者が時間ステップ t の時に図-14の中央のセルにいるとし, 時間ステップ $t+1$ で上図の0のセルに移動したいものとする. ここでセル0に人がいる場合は, セル1~7の順番で空いているセル, すなわち歩行者, 障害物でないセルを探索する. その探索したセルが, 現在地よりも目的地との距離が縮まるのならばそのセルに移動するものとした. 進行方向を急激に変更するとは考えづらいため, 前方(進行方向の向きが正面)から探索するようにしている. ただし, 左側から探索することについては特別な意味はない. また, 時間ステップ $t-1$ においても目的地に近づくように移動しているので後方, すなわちセル5, 6, 7に移動する可能性は小さいはずである.

周囲の多くのセルが他の歩行者や障害物で塞がれている場合, 目的地に近づける場所が存在しないことがある. この場合は回り込みを考慮して, 目的地との距離が一時的に離れるとしても空いているセルに移動するものとした. また, 周囲の全てのセルが歩行者や障害物の場合は, 移動可能な地点が存在しないために現状の位置に留まり, 移動可能な空間ができるのを待つこととした.

d) フローチャート

これまでに述べてきた内容に基づいた(群集内における個体の)歩行ルールのフローチャートを図-15に

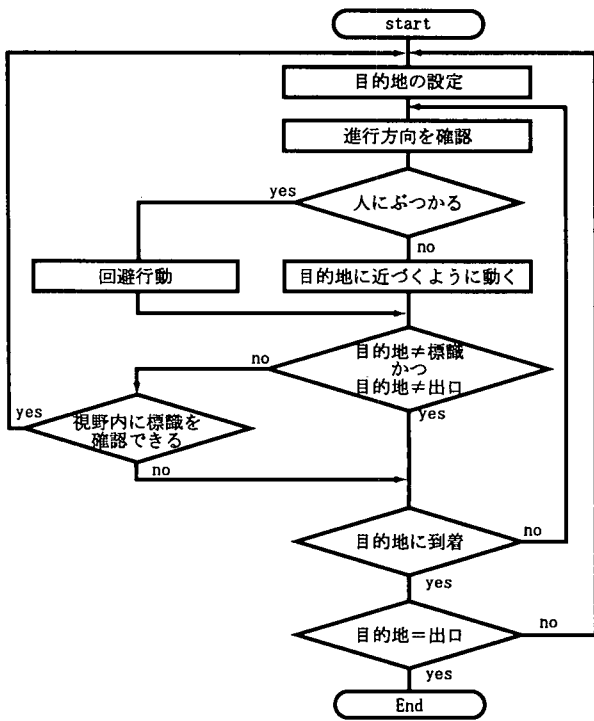


図-15 歩行ルール

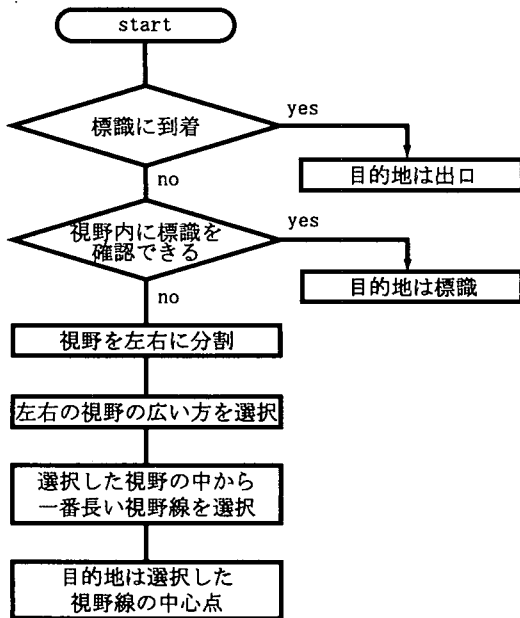


図-16 目的地設定

示す。

また目的地設定のフローチャートを図-16に示す。これは単独歩行シミュレーションの目的地設定の方法を、解析対象とする空間モデルに合わせてアレンジしたものである。標識は出口のすぐ前にあるため、まず標識を目的地とし、標識に到着した時点で出口を探索することとした。

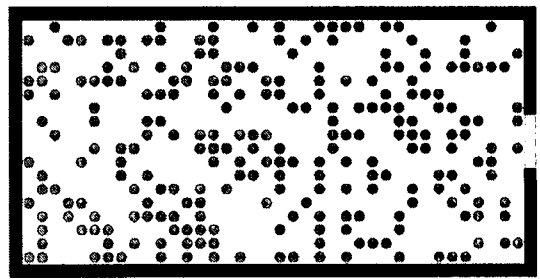


図-17 単純な群集歩行シミュレーション

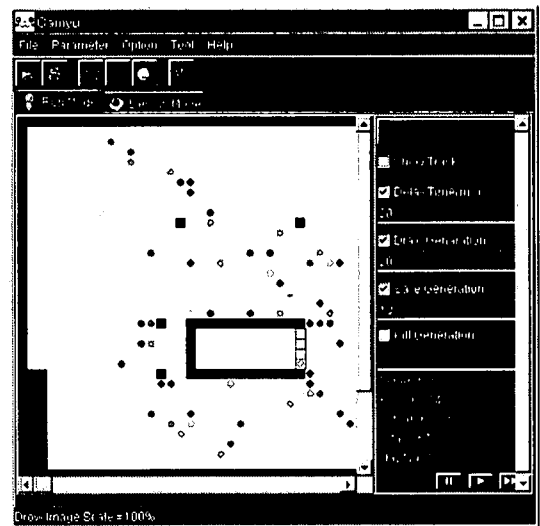


図-18 シミュレーション実行画面

(4) 時間のモデル化

シミュレーションの前に時間のモデル化、すなわち時間ステップの1ステップを何秒でモデル化するかを決めなければならない。群集歩行を対象とする場合、歩行速度の決定要因として最も重要なものは、交通の密度である⁶⁾。そのために、平均歩行速度から時間をモデル化することは適当ではない。

群集モデルのでステップ時間を設定するにあたり、図-17のような単純な空間からの脱出という歩行シミュレーションを行ってみる。グレイの円が歩行者を表している。空間には300人をランダムに配置した。

異なるランダムシーズを用いた10回のシミュレーションで、全歩行者が空間から脱出するのに要した時間ステップの平均は146.1ステップであった。出口は4つのセルからなっており、セルは一辺0.5mでモデル化しているために、出口の幅員は2mとなる。

ほとんどの条件下で67人/m・分の流動が可能である⁶⁾ことから、2mの幅員で毎秒2.23人の流動が可能であることになる。

300人が2mの幅員を通るのに要した時間ステップ

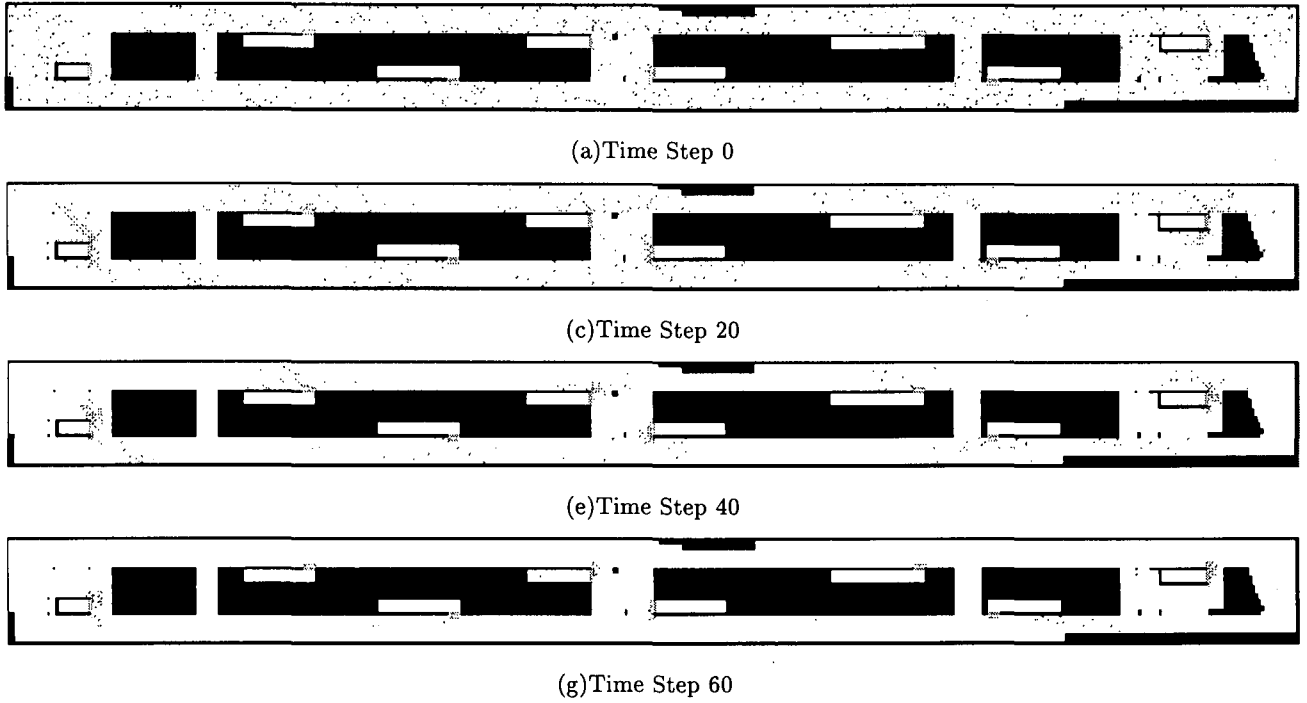


図-19 歩行者の位置

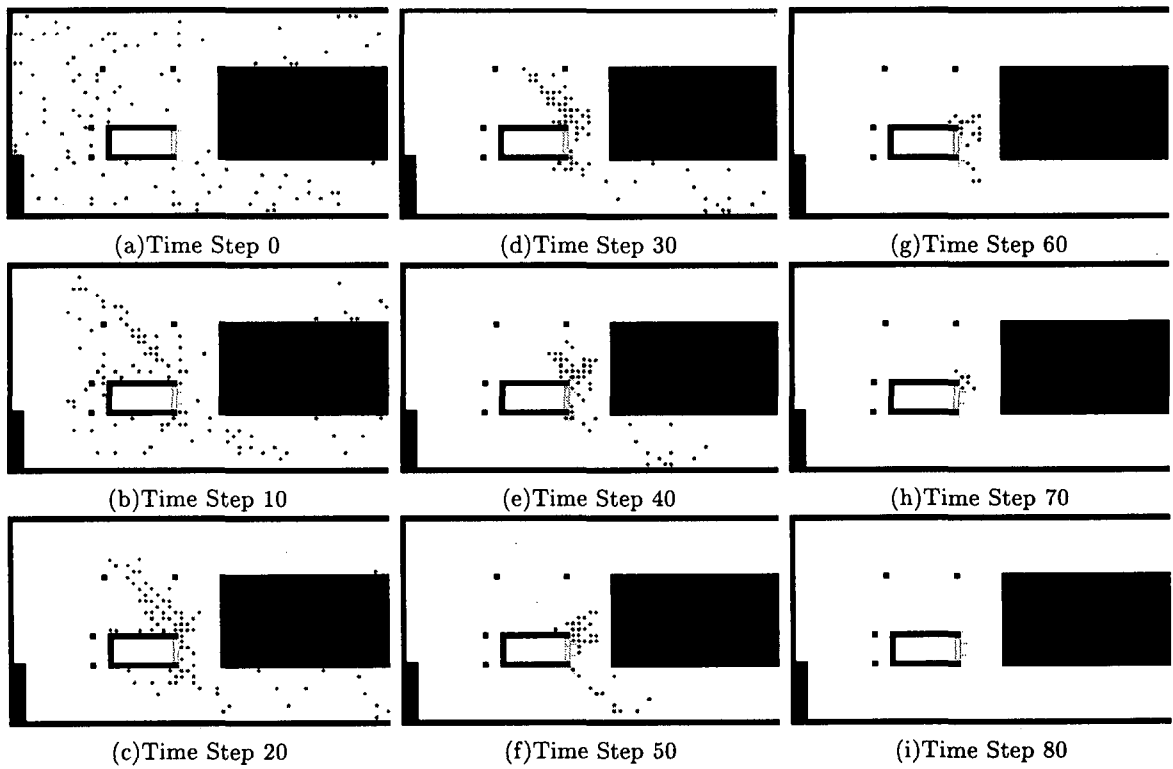


図-20 Exit1 付近

の平均は146.1であるので、 $300/146.1 = 2.05$ より1ステップあたり2.05人の流動が可能であったことになる。よって、2.23よりは若干小さいものの、1ステップを1秒でモデル化することとする。

(5) シミュレーション結果

シミュレーションの基本条件を次に示す。

- 歩行者の目的は空間からの脱出
- 障害物をこえて進むことはできない
- 出口は階段の入り口
- 照明の変化や火災、煙等の環境的要因は考慮しない
- 全ての歩行者は同一の歩行ルールによってセルのとりうる状態を以下に示す。
- 歩行者
- 障害物
- 歩行可能空間
 - 何もない空間
 - 標識
 - 出口

なお、全ての歩行者が空間から脱出した時にシミュレーションを終了する。

シミュレーションによる時間ステップごとの歩行者の位置を図-19に示す。ステップ0の時に575人の歩行者をランダムに配置した。またステップ119で全ての歩行者が空間から脱出した。

図-20にExit1付近の時間ステップごとの歩行者の位置を示す。滞留が発生し、徐々に解消されていく様子がみてとれる。

また、出口の前にある標識を視認できない地点からも脱出に成功しており、本シミュレーションモデルで採用した歩行ルールは有効であったことが示せた。

なお、群集歩行シミュレーションに要した時間(計算だけでなく、ファイル入出力や描画に要する時間も含めた時間)は既に示したシステムで318929ミリ秒、すなわち約5分であった。

空間内に残留している歩行者の数を時間ステップごとに表したものが図-21である。1ステップは1秒でモデル化したので、119秒で全ての歩行者が脱出に成功したことになる。

比較のために、清野らのシミュレーションによる地下街の避難残留者数の経時変化の一例を図22に

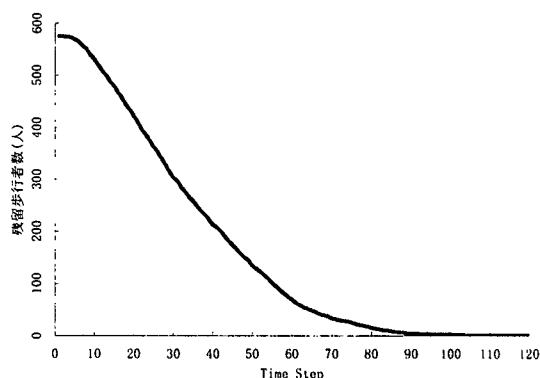


図-21 残留歩行者数の時間ステップ変化

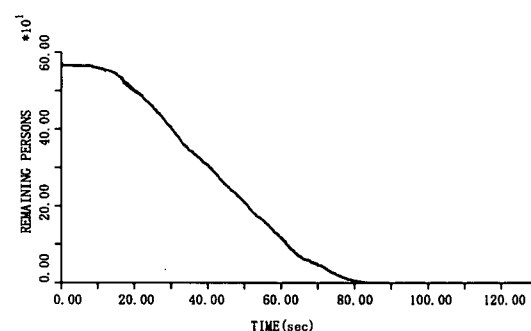


図-22 地下街の避難残留者数の経時変化¹⁾

示す。

最初から出口の場所を知らされている清野らの結果(図22)に比較して、CAでは自分で出口を探すというプロセスを含むにもかかわらずシミュレーション開始直後から急速な残留者数の現象が生じている。しかし、シミュレーションの最終段階では残留者数の減少のスピードは鈍化し、出口付近での滞留の影響が読み取れる。全体的には、両者の傾向は類似している。

Time Step 80では全体の約98%の歩行者が脱出に成功した。参考にした清野らのモデルも約80秒でほとんどの歩行者が脱出に成功しており、本研究のシミュレーションモデルが既存のモデルと同様の結果を出せることが証明できた。

残りの約2%の歩行者の脱出に39ステップも要しているが、これは標識を出口の前にしか設置しなかったためである。つまり、近くに出口があるにもかかわらず標識が視野に入らなかったために、別の離れた地点にある出口を求めて歩行した者がいるということである。

離れた地点に存在する出口を目的地に設定してしまふ歩行者の例を図-23に示す。ただしあくまでイメージ図であって、正確な歩行経路や歩行者の初期

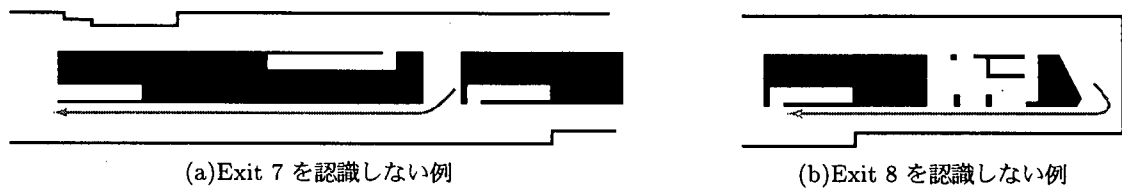


図-23 距離的に近い出口を認識しない例

位置を再現しているわけではない。図-23 (a) のように、歩行者が Exit 6 と Exit 7 の間の通路にいた時、視野角が 180° であるため、その通路から出た時に Exit 7 の標識を認識できない場合がある。また図-23 (b) のように障害物が死角となって、Exit 8 の標識を認識できない場合がある。

しかし、図-23 に示したような地点、すなわち障害物によって標識が視認できない地点から脱出しているということは、本研究における歩行シミュレーションモデルが人間の歩行行動を再現しているといえる。つまり、目的地の目安となるもの(標識)が視野に存在しない場合の目的地設定の手法が有効であったことになる。左右に分割した視野のうち広い方にある一番長い視野線の中心点を歩行行動の目的地とするこの手法は、単独歩行シミュレーションで人間の行動を再現するために考案したものである。この手法によって、通路を歩行したり、障害物を回避できるということが改めて証明されたことになる。

また図-20 において、滞留が発生し、徐々に解消されていく様子が見てとれるが、これは群集流動を再現しているといえる(この現象自体はモデル化してはいない)。

以上のことから本研究における歩行シミュレーションモデルは人間の歩行行動を再現できるモデルであり、また Time Step 80 で全体の約 98% の歩行者が脱出に成功していることから、既存のシミュレーションモデル(すなわち清野らのモデル)と同様な結果が得られることから、有用な歩行シミュレーションモデルが構築できたものと言える。

6. 結論

(1) まとめ

本研究では CA を用いることにより、歩行シミュレーションモデルの構築を試みた。まず単独歩行シミュレーションモデルを構築し、実際に行われた実験と比較することで群集を形成する要素である歩行

者の特性を検証した。そして、それを発展させることで目的とする群集歩行シミュレーションモデルを構築した。

シミュレーションモデルを構築するにあたり、最初から歩行目的地を導入したわけではなく、様々な試行錯誤の結果、目的地の設定が必須であるという結論に達した。現実の歩行者はなんらかの目的をもって歩行していると考えられ、このことから目的地設定は必須であると考えられる。本研究におけるシミュレーションモデルでは目的地設定のためには視野が必要であるが、これは実際の歩行行動においても視野が大きな影響力をもつことを暗示させる。

また、待ち行列現象(滞留)が再現できた。並んで待つということをも特に歩行ルールに組み込んだわけではないが、待ち行列が形成され解消される様子が再現できたことは特筆に値する。CA の特徴の 1 つである、「簡単なセル間の局所的相互作用から複雑な現象を再現できる」ということが実践されたといえる。

群集歩行シミュレーション時に距離的に離れている出口を選択した歩行者が存在したが、これは近くにある出口の標識を視認できなかったためである。これは、標識を出口の前にしか設置しなかったためであり、障害物によって死角ができる場合は、その障害物の前にも標識を設置すれば改善できたであろう。このことは、現実の空間においても歩行者に分かりやすいように標識を設置しなければならないことを示していると考えられる。

空間モデルが広大なことから障害物を認識しないという問題が生じないように、視野線の最大長さを 57 セルと制限した。しかし、全ての歩行者が脱出しており異常と思える行動をした歩行者も存在しなかった。空間モデルが広大とはいえ、8 つの出口がほぼ均等に配置されていたため 57 セルの長さでも問題がなかったものと考えられるが、結果のみを見れば、歩行者は 57 セル、つまり 28.5m 程度先までの視野を考慮すれば、歩行が可能であることを示しているとも

解釈できる。

またCAを用いたことにより、歩行行動をビジュアルに解析することが可能であり、歩行軌跡を表示することにより、歩行者がどのように移動したかを解析することも可能となる。

本研究における歩行シミュレーションモデルの特徴のひとつに歩行行動をビジュアルに解析できることをあげるならば、シミュレーションに要する時間はコンピュータの前で待ってられる程度の時間である必要があると思われる。つまりシミュレーションに数日かかるようならば、歩行者がどのように移動したかを見ていることはできないのである。本研究のシミュレーションでは、既に述べたように、約5分で結果を得ており、十分耐えうる時間であると考ええる。

以上のことから、本研究で構築したシミュレーションモデルは有効なものであり、また単体が相互に作用し合い全体としての系を形成する群集歩行のシミュレーションに、CAが適していることが示せたと考える。

(2) 今後の課題

本研究では個性や揺らぎといったランダムネスを無視している。しかし、こういったランダムネスを導入しなければ、再現できない現象も存在すると考える。

標識が死角にあったために距離的に離れている出口を選択した歩行者が存在したが、これは標識の設置だけではなく、心理的な要因を付加することで改善できると思われる。つまり、進行方向を周囲の歩行者の進行方向に同調させることで、自分自身には見えない場所に、何かがあるであろうことに気づくことができる。本研究では、このような群集心理までは組み込まなかったが、それでもなお、目的地を既知としたシミュレーション結果をCAで再現できたことは注目に値すると考える。

また歩行ルールにファジィを応用することで、より人間らしさを再現することが可能かもしれない。単純化のために緩衝空間や回避行動の前方回避距離を考慮しなかったが、より歩行行動を忠実に再現するためには考慮すべきことであると考ええる。

本シミュレーションは、処理時間から考えて避難

行動のアウトラインを把握するのに適しており、詳細な行動分析や、構造要素配置の検討には、上で述べたようなより複雑なモデル(CPU時間を多く要する)を用いる、といった使い分けが実用的と考える。

参考文献

- 1) 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃: 個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション, 土木学会論文集 No.591/I-43, pp.365-378, 1998.
- 2) 堀内三郎, 小林正美: 都市防災計画のシステム化に関する研究(II)-防災システムのシミュレーション-, 日本建築学会論文報告集 第258号, pp.123-129, 1975.
- 3) 瀧本浩一, 三浦房紀, 清野純史: 防災要員と避難者の間の情報の伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション, 土木学会論文集 No.537/I-35, pp.257-265, 1996.
- 4) 位寄和久, 池原義郎, 中島高史, 中村良三, 宇土正浩, 渡辺仁史: 人間-空間系の研究 建築計画のためのネットワーク・オートマタモデル, 日本建築学会論文集, 第298号, pp.89-97, 1980.
- 5) 森下信, 山本英, 中野孝昭: セルラオートマトン法による群衆の流れの解析, 第46回応用力学連合講演会講演予稿集, pp.179-180, 1996.
- 6) ジョン・J・フルーイン 著, 長島正充 訳: 歩行者の空間, pp.27-74, 134-138, 鹿島出版会, 1974.
- 7) 横山秀史, 永田茂, 山崎文雄, 海老原学: 迷路実験による緊急時の人間行動特性, 土木学会論文集 No.441/I-18, pp.107-115, 1992.
- 8) 建部謙治, 中島一: 静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動 歩行者の回避行動に関する研究(I), 日本建築学会計画系論文報告集 第418号, pp.51-57, 1990.
- 9) 建部謙治, 辻本誠, 志田弘二: 回避行動開始点の判定と前方回避距離 歩行者の回避行動に関する研究(II), 日本建築学会計画系論文集 第465号, pp.95-104, 1994.