

2010年度 卒業論文

混雑した駅ホームでの
群集の動きを考慮したシミュレーション

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト
学籍番号 M0107288
高橋 享平

2010年度 卒業論文概要

論文題目

混雑した駅ホームでの
群集の動きを考慮したシミュレーション

メディア学部

学籍番号：M0107288

氏名

高橋 享平

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

群集シミュレーション、駅ホーム、混雑、
ネットワークモデル、ポテンシャルモデル、ベクトル場、待ち行列

近年、ゲームなどといったインタラクティブなコンピュータコンテンツにおいて、人が入り乱れる様子や、動物が群れになりながら行動する様子などといった、多くの人や動物などが集まり、まとまりながら動く様子、群集行動を再現したものがある。特に実際の都心における雑踏などといった日常生活における群集行動を再現した作品も多く見られるようになった。これら群集の動きを再現するにあたり、効率よく群集の動きを制御する研究が多く行われてきた。しかし、駅ホームなどといった、電車の出入りなどにより、旅客の動きが変化する様子を再現したものは少ない。その理由として、既存研究のほとんどは駅構内全体に対しての導線計画を行うためのものであり、駅ホームといった細かい箇所で見られる特徴的な動きに対しては考慮していないためである。

そこで本研究では駅ホームで旅客がとる動きをリアルにシミュレートする手法を提案した。本手法では旅客の動きを再現するにあたり、駅ホームにおける旅客の群集行動を分析し、旅客を乗客と降客に分類分けした。旅客の分類ごとに動きの制御を変化させることで、全体的に駅ホームで旅客が動く様子を再現した。旅客の動きには、ネットワークモデルとポテンシャルモデルを用いて、他の旅客との接触を回避しながら目的地に向かって移動する様子を再現した。また、電車の乗降口付近での降客優先行動や再乗車行動といった駅ホーム特有の動きは非貫通制約を用いて表現した。提案した手法はゲームといったインタラクティブなコンテンツへの応用を可能にするために、リアルタイムなシミュレーションを行うものである。最後に提案した手法に基づいてプログラムを作成し、プログラムのシミュレーション結果を検証することで本手法によって実際の駅ホームにおける旅客の群集の動きが現実と同様であることを確認した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	論文の構成	3
第2章	駅ホームと旅客行動の分析	4
2.1	駅ホームの形状および旅客の混み具合	4
2.2	駅ホームで旅客がとる行動	6
第3章	提案手法	9
3.1	旅客モデルの基本動作	9
3.1.1	人体円	10
3.1.2	目的地と移動経路	11
3.1.3	モデルの認識判定	13
3.1.4	移動ベクトルの決定	15
3.2	待ち行動	17
3.3	降客優先行動と再乗車行動	18
第4章	検証と考察	21
4.1	検証結果	21
4.2	考察	25
第5章	まとめ	26
	謝辞	27
	参考文献	28

目 次

2.1	単式ホーム型	5
2.2	相対式ホーム型	5
2.3	島式ホーム型	6
2.4	電車を待つ様子	7
2.5	電車に乗る様子	8
2.6	再乗車行動の様子	8
3.1	人体円	10
3.2	駅ホームのネットワーク	11
3.3	経路に沿った動き	12
3.4	移動経路から外れた場合の移動	12
3.5	他の旅客モデルの認識判定	14
3.6	認識判定領域内にいる対向者の判定	15
3.7	ポテンシャルモデル	16
3.8	待ち行列の先頭がない	18
3.9	待ち行列に加わる	18
3.10	重なるの図	19
3.11	再乗車客の行動の様子	20
4.1	島式ホームを移動する旅客の様子	22
4.2	待ち行列を作る前	23
4.3	待ち行列を作る様子	23
4.4	電車到着時の待ち行列	24
4.5	降客を優先的に移動させる様子	24
4.6	電車到着時の待ち行列	25
4.7	待ち行列に加わる再乗車客	25

第 1 章

はじめに

1.1 研究の背景と目的

日常生活において電車は人々の交通手段となっている。通勤や通学、旅行の際に電車を利用する人を日常的に目にすることができる。特に日本の都市圏において旅客輸送量は高い水準を誇り、数分ごとに駅に電車が到着するなどといった輸送量向上の処置が取られていることから、電車の利用率が高い様子が見て取れる。

一方、リンデンラボ社が運営しているバーチャルリアリティ「Second Life」[1]や、エレクトロニック・アーツ社の「ザ・シムズシリーズ」[2]などといった現実世界を再現したゲーム作品が数多く存在する。例に挙げたゲーム作品では、ゲーム内のフィールドに日常的な場面として駅を用いている。しかし、このような作品では駅を用いているが、駅ホームを移動する旅客の様子は再現されていない。

現実世界を題材にしているゲーム作品では、駅ホームの旅客の動きの再現は臨場感を出すための重要な要素となる。なぜならば、日常生活で電車は人々にとって一般的な交通手段であり、電車を利用する人は多くいる。電車を利用するにあたり、旅客は駅ホームを移動し、電車が来るのを待ったり、電車を乗り降りしたりする。したがって、現実世界を題材にした作品では、駅ホームにおける旅客の動きの再現は臨場感を出すための重要な要素となる。

駅ホームにおける旅客の動きを再現するにあたり、群集の行動をシミュレートを行う手法として、群集シミュレーションがある。群集シミュレーションとは、仮

想空間や大規模な施設など、群集行動の実測が困難な場面に対して、群集行動を模擬実験することができるシミュレーション手法である [3]。主な用途として、戦国時代における合戦や日常の街における群集の再現や、建物を建築する際、避難経路の想定などに用いる。先行研究として駅構内の旅客の動きをシミュレートしたもの [4][5] や駅構内における群集歩行の研究 [6][7][8] 等がある。しかし、これら駅構内の旅客の動きに関する研究は、駅構内全体に焦点をあてたものあり、駅構内を移動する大局的な旅客の動きの再現はされているが、駅ホームで見られる電車の乗降口において乗客が電車を乗り降りするといった局所的な場面の動きに対して考慮していない。

乗降口にて乗客が電車を乗り降りする動きに関して、松下の研究 [9] や鈴木らの研究 [10]、Pelechano らの研究 [11] 待ち行動をとる群集の動きを再現したものがあり、これらの研究では、電車を待つ乗客が待ち行列を作る様子を再現することはできる。しかし、実際の旅客の中には、朝や夕方時間帯における通勤・帰宅ラッシュといった混雑した状況では、電車の内部にいる客を降ろすために、ドア付近に乗っていた客は一度降りてから再び乗車をするという駅ホーム特有の再乗車行動をとる旅客がいる。このような再乗車を行う旅客は、乗降口に出来ている待ち行列の先頭に加わる動きをとる。松下の研究や鈴木らの研究、Pelechano らの研究で行っている待ち行列を作る群集は、待ち行列に対して行列の後ろから順に待つ人を増やすことはできるが、待ち行列の先頭に人追加させる動きを行うことはできない。そのため再乗車をする旅客の動きは再現できない。

そこで本研究は、混雑した駅ホームに対して旅客が電車を再乗車する動きを再現する手法を提案する。また、旅客が再乗車する動きの再現のみならず、実際に駅ホームで旅客がとる行動の再現として、乗客が乗降口に向かって移動しながら待ち行列を形成する様子や、乗降口にて降客に優先的に道をあける降客優先といった乗客の様子の再現も行った。駅ホームにおいての旅客の動きの再現にあたり、旅客の行動を分類分けし、分類に応じて動きに変化をつけた。表現した旅客 (以下、旅客モデル) が目的地に向かって移動を行う際には、ネットワークモデルとポテン

シャルモデルを用いて表現し、他の旅客モデルとの接触を回避しながら目的地に向かって移動する様子を再現した。乗降口付近の旅客の動きとしては、電車を待つ様子に待ち行列を用い、降客優先行動や再乗車する動きには非貫通制約を用いて表現した。このように旅客モデルの行動を分類ごとに変えることで、駅ホームで旅客が移動する様子を再現した。

構築した群集シミュレーションモデルをプログラムで実装し、実装結果から、実際の旅客の動きを再現できているかを検証した。検証結果から本研究で用いた手法により、駅ホームにおける旅客の動きを再現出来たことを証明した。

1.2 論文の構成

本論文の構成は、まず第2章にて、駅ホームの状態やホームの形状についての解説および駅ホームで旅客がとる行動の分析を行う。第3章では、本研究で用いる手法について述べる。第4章では、実装した結果の検証と考察を行う。第5章で本研究のまとめと今後の展望を記す。

第 2 章

駅ホームと旅客行動の分析

本章では、駅ホームの群集シミュレーションを行うにあたり、想定する駅ホームの旅客の混み具合やホームの形状、旅客がとる行動について分析を行う。分析を行ったうえで、本研究で想定する状況についても述べる。2.1 節では、旅客の混み具合や駅ホームの形状について述べ、2.2 節では実際の駅ホームで旅客がとる行動の分析および分類を行う。

2.1 駅ホームの形状および旅客の混み具合

駅ホームは複数の形状が存在し、駅が設置される都市の規模によって適切な形状となっている。代表的な形状として単式ホーム型・相対式ホーム型・島式ホーム等がある [12]。これら 3 つの形状の駅ホームの特徴を以下に記す。

- 単式ホーム型

ホームの片面だけが線路に接している形状をあらわし、片面ホームともいう。行き違いを行わないローカル線などの小さな駅などに用いられる形状である。実際の単式ホーム型の駅ホームを図 2.1 に示す。

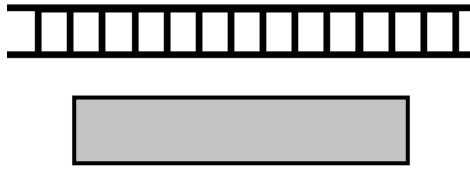


図 2.1: 単式ホーム型

- 相対式ホーム型

単式ホームを2つ向かい合わせにした形状をあらわし、対向式ホームまたは対面式ホームともいう。旅客が両ホームを行き来する際には跨線橋や地下道を利用する。上下線2つの電車の行き違いに対応している形状である。実際の相対式ホーム型の駅ホームを図 2.2 に示す。

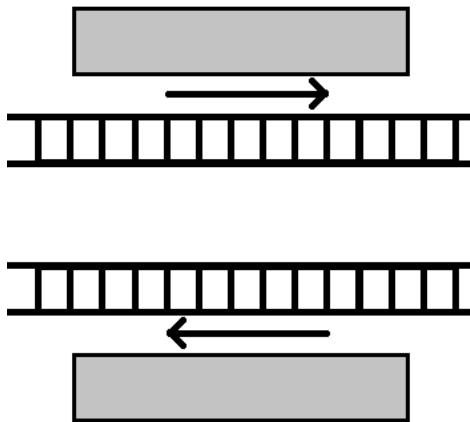


図 2.2: 相対式ホーム型

- 島式ホーム型

ホームの両面を電車の発着に使用する形状を表す。上下線2つの電車の行き違いに1つのホームで対応しているため、反対方向の電車に乗り換えるのが容易である。しかし、両方の電車が同時に到着したときには、両方の電車

から降客が出てくるため、混雑が起こりやすい。実際の相対式ホーム型の駅ホームを図2.3に示す。

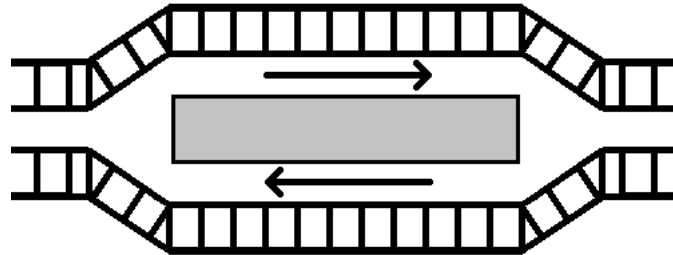


図 2.3: 島式ホーム型

実際の駅ホームでは時間帯に応じて、旅客の混み具合が変化する。特に朝や夕方における通勤・帰宅ラッシュ時には電車を利用する旅客が大量に増え、混雑した状況になる。このような混雑した状況では、再乗車を行う降客の様子も増加する。特に島式ホーム型のホームでは混雑の度合いが大きくなる。そのため本研究では、再乗車が頻繁に起きる状況として、混雑の起こりやすい島式ホーム型のホームを想定し、旅客の多い混雑した状況を想定した。

2.2 駅ホームで旅客がとる行動

実際に駅ホームの旅客がとる行動を再現するにあたり、旅客がとる行動の分類を行った。旅客の動きは国や地域によって異なるが、本研究では旅客が多く混雑した状況を想定するため、旅客輸送量の多い日本の都市圏における駅ホームを対象とした。日本の都市圏における駅ホームでは、スムーズに電車の乗り降りを行えるように各旅客は規則的な動きをする。本研究では、各旅客が規則的な動きを行うと想定し、旅客がとる行動の分類を行った。

旅客は大きく分けて電車に乗る乗客と電車から降りる降客の2通り存在し、それぞれの動きは異なる。特に乗客は乗降口に近づくと電車を待つために特徴的な

動きをとる。また、旅客がとる行動は電車到着の有無によっても変化する。本研究では旅客がとる行動を以下のように分類した。

- 乗客の動き

- 出入り口である階段から乗降口に向かう行動
- 乗降口で電車を待つ行動
- 電車に乗る行動

- 降客の動き

- 乗降口から出入り口である階段に向かう行動
- 他の降客を降ろすための再乗車行動

旅客の分類に基づき、本研究では乗客と降客は以下のような動きをとるものとした。まず、乗客は乗降口に向かって移動する。乗降口に近づいた際、電車が来ていなければ電車を待つためにその場にとどまる。乗客は電車を待つ際、効率よく乗車を行うために待ち行列を形成する。もし他の乗客がいない場合は、電車に最も近い位置に並び、他の乗客がいる場合にはすでに形成されている待ち行列の一番後ろに並ぶ。電車到着の際、待ち行列を形成している乗客はすべての降客が降りるのを待つ。その時、乗客は降客が電車から降りる妨げにならないように、優先的に道をあける動きをとる。降客がいなくなったら、乗客の待ち行列は先頭にいる乗客から順番に乗車を行う。図 2.4 は電車を待つ乗客を表し、図 2.5 は電車に乗車する様子を表す。

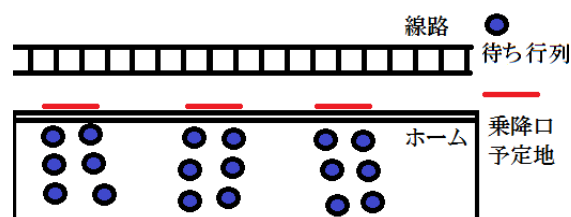


図 2.4: 電車を待つ様子

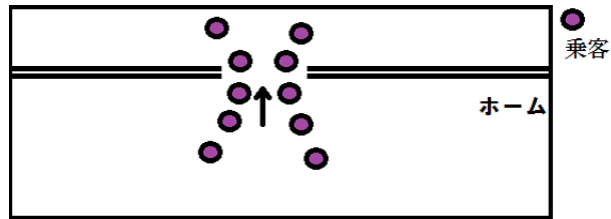


図 2.5: 電車に乗る様子

次に降客の動きに関して、降客は電車到着時に電車から降り、出入り口である階段に向かって移動する。その際、乗降口にて待ち行列を形成している乗客は降客に対して道をあけているため、スムーズに移動することができる。階段に至るまでの移動として、降客は他の旅客を回避しながら階段に向かう。また、降客の中には他の降客を降ろすために再乗車を行う人もいる。その場合、後ろから続いて降りてくる他の降客の移動の妨げにならないように、乗客が形成している待ち行列の先頭に加わる動きをとる。他の降客がいなくなったら、待ち行列を形成している乗客は先頭から順番に乗車を開始する。図 2.6 は再乗車行動の様子を表す。

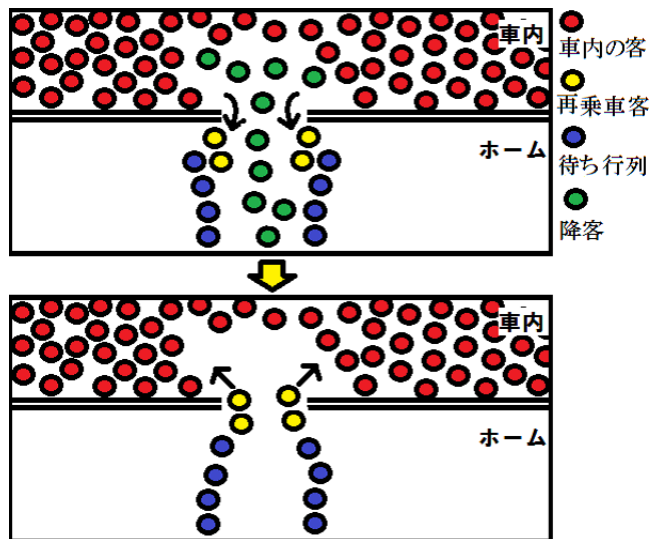


図 2.6: 再乗車行動の様子

第 3 章

提案手法

本章では本研究の提案手法について述べる。本研究で目標としているシミュレーションは混雑した駅ホームでの旅客の再乗車行動の再現である。また、旅客が再乗車行動をするにあたって、実際に駅ホームで旅客がとる行動として、乗客が乗降口に向かう様子や、乗降口で待ち行列を形成する様子の再現も行う。ここでは、この目標を達成するためには何が必要なのかを説明する。2章では、本研究で用いる駅ホームの状況の想定および、駅ホームで旅客がとる行動を分類した。本章では、2章の旅客の分類に基づき、乗客と降客がとる動きを再現する手法を提案した。3.1節では群集の動きを再現するのに必要な要素について述べ、3.2節や3.3節では駅ホームの特有の旅客がとる動きの再現について述べる。

3.1 旅客モデルの基本動作

実際の旅客の行動を再現する際、提案手法にて移動する旅客1人1人を旅客モデルと定める。旅客モデルの中でも乗客を乗客モデル、降客を降客モデルと定める。モデルの動きを制御するにあたり、人体円の設定し、目的地と移動経路の設定し、モデルの認識判定を踏まえたうえで、移動処理で動く幅(以下、移動ベクトル)を決定するものとした。3.1.1項では人体円について述べ、3.1.2項では目的地と移動経路について述べ、3.1.3項では旅客モデルの認識判定について述べ、3.1.4項では旅客モデルの移動ベクトルについて述べる。

3.1.1 人体円

実際の旅客の行動を再現する際、旅客モデルは人の体を真上から見た形として三角形や円、楕円などで表現するのが一般的である。本研究では、混雑した場面を表現するために大量の旅客モデルを用いるので、シミュレート時の計算が少ない半径 R の人体円で旅客モデルを表現した。しかし、旅客モデルを人体円だけで表現すると、旅客モデル同士が完全に接触することを許すことになる。混雑により密接した状態では、実際の旅客は接触することも多々起こりえるが、移動の際に接触を避けて移動を行うのが普通である。そこで、本研究の旅客モデルには、パーソナル・スペースを導入した。パーソナル・スペースとは、他者が入り込むと不快感を感じる空間のことである [13]。パーソナル・スペースを用いることで他者との接触を回避する空間を持たせた旅客を表現することができる。本研究では、人体円に対して円周上から余裕を持たせる割合 c を導入し、 c は 1 より大きい値であるとした。これによりパーソナル・スペースをもった人体円を旅客モデルとして表現とした。実際にパーソナル・スペースおよび人体円を表した旅客モデルが図 3.1 である。

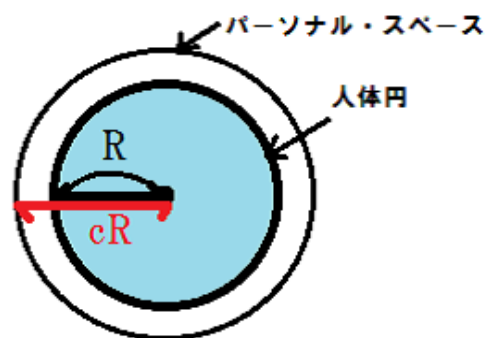


図 3.1: 人体円

3.1.2 目的地と移動経路

実際の駅ホームには複数の乗降口や階段があり、各旅客は異なる目的地に向かって移動を行う。本研究では、阿久澤の研究 [6] を参考にネットワークモデルを用いて、旅客モデルの大まかな動きを決定した。ネットワークモデルとは空間に対して移動の中継地点 (以下、ノード) を設定し、大まかな移動経路を設定しておく手法である。

図 3.2 は、島式ホーム型の駅に対してネットワークモデルを設定したものである。

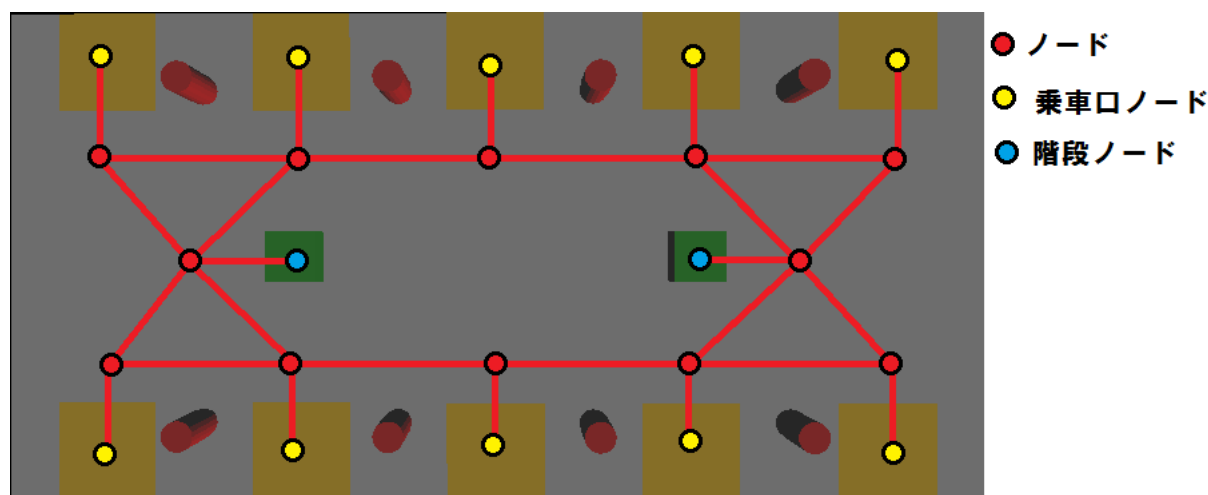


図 3.2: 駅ホームのネットワーク

乗客が乗降口に向かって移動するにあたり、どのような経路を通るかを決定する必要がある。経路を決める要素として、乗車位置を選択する旅客を分析した河合らの研究 [14] がある。この研究では乗客のほとんどが乗車位置を決めているという分析結果がある。本研究ではその分析結果を参考にし、旅客モデルが移動する際、決定した経路は変更しないものとした。さらに実際の旅客は目的地に向かう際、最も労力の少ない移動を行うため、本旅客モデルは移動に関して最短経路を選択し行動するものとした。これらのことからウェイポイントナビゲーション [15] を用いて、旅客モデルの移動経路を決定した。ウェイポイントナビゲーション

とはあらかじめ、空間に配置してあるノードに対して、移動経路をあらかじめ算出しておく手法である。これを用いることによって、旅客モデルは初期位置と目的地を設定するだけで自動的に移動経路を決定し、経路に沿った動きを行うことができる。旅客モデルは目的地に向かう移動経路を通る際、移動経路に対して現在の位置からもっとも近いノードを一時的な目的地とし、それに向かって移動を行うようにした。図 3.3 は経路に沿った動きを表したものである。また、移動経路から外れた場合には、旅客モデルの位置から領域ごとに区切られた空間に対して、自分のいる領域を求め、その領域から目的地に向かうあたり、最も近いノードを一時的な目的地として、それに向かって移動を行うようにした。図 3.4 は移動経路から外れた場合の移動を表したものである。このとき、現在位置から一時的な目的地までの正規化したベクトル場を $\mathbf{W}(x, y)$ とする。ベクトル場 $\mathbf{W}(x, y)$ は 3.1.3 項にて旅客モデルの可視判定を行う際に用いる。また、3.1.4 項にて旅客モデルの移動ベクトルを決定する際にも用いる。

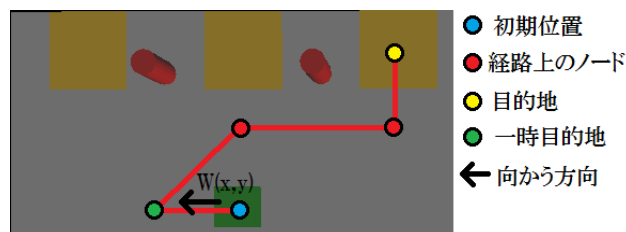


図 3.3: 経路に沿った動き

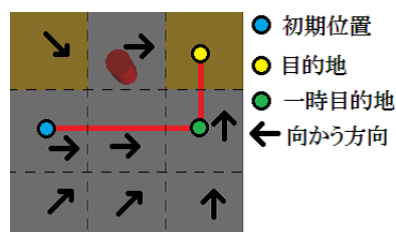


図 3.4: 移動経路から外れた場合の移動

3.1.3 モデルの認識判定

実際の旅客は、前方にいる他の旅客を認識すると衝突の危険を察知し、ぶつからないように回避行動を行う。このとき、前方にいる他の旅客すべてから影響を受けるわけではなく、前方に対してある空間を持ち、その空間に入った旅客からのみ影響を受ける。この旅客の前方にある空間を視野と定める。本研究では、阿久澤の研究 [6] や石川の研究 [16] を参考に旅客モデルの視野に対して他の旅客モデルを認識する、扇形の認識判定領域を設けた。

旅客モデルに認識判定領域を設定するにあたり、旅客モデルの中心を基準に認識判定領域を設定すると、自身の真横や後方いる他者を全く意識しないことになる。実際の旅客は前方のみならず真横や後方にいる旅客を視界に捉えなくても、雰囲気では他者の位置を意識し、他者との距離をあける。このことを考慮するために、認識判定領域を旅客モデルの後方の位置より設定し、自身を内包するような認識判定領域を設定した。

認識判定の基準となる旅客モデルを A_i 、旅客モデル A_i の位置ベクトルを \mathbf{A}_i 、進行方向のベクトルを \mathbf{V}_i とし、認識する対象となる旅客モデルの位置ベクトルを \mathbf{A}_j とする。このとき、3.1.2項で説明したネットワークモデルによって決定したベクトル場 $\mathbf{W}(x, y)$ を旅客モデルの進行方向のベクトル \mathbf{V}_i として用いる。次に認識判定領域の視界の大きさを r 、視野の広さを θ_a とする。自身を内包するように \mathbf{V}_i に対し、旅客モデルの半径 R およびパーソナル・スペースの割合 c 分に加え、さらに後方にとりうる幅を係数 a にて設定することで、自身を内包する後方位置 \mathbf{A}'_i を決定した。

式 (3.1) は自身を内包する後方位置 \mathbf{A}'_i を示したものであり、認識判定の対象となる旅客モデルの位置ベクトル \mathbf{A}_j が条件式 (3.2) を満たすならば対象となる旅客モデルは基準となる旅客モデルの視界に入っていることになる。図 3.5 は、自身を内包した認識判定領域をあらわしたものである。

$$\mathbf{A}'_i = \mathbf{A}_i - \frac{\mathbf{V}_i}{|\mathbf{V}_i|}(cR + a) \quad (3.1)$$

$$|\mathbf{A}_j - \mathbf{A}'_i| < r, \quad \text{and} \quad \frac{\mathbf{A}_j \cdot \mathbf{A}'_i}{|\mathbf{A}_j||\mathbf{A}'_i|} > \cos \theta_a \quad (3.2)$$

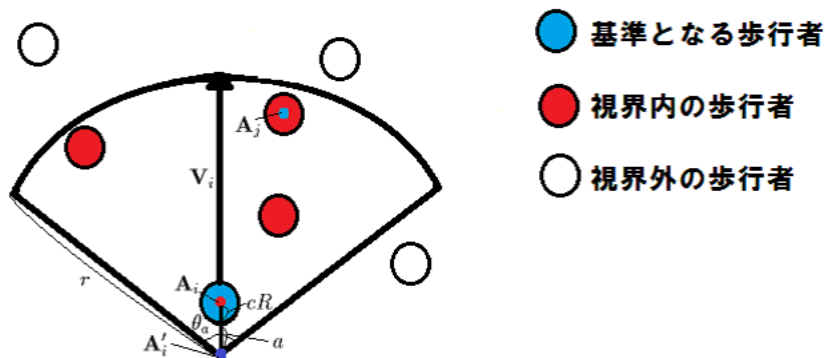


図 3.5: 他の旅客モデルの認識判定

また、本研究では混雑した場面を想定しているため、認識判定領域に入る認識対象の旅客モデルすべてを認識すると、多くの旅客モデルから影響を受けることになる。そのため、認識領域に入る旅客モデルの中から影響を受ける旅客モデルを絞り込む必要がある。本研究では、認識判定の基準となる旅客モデルに対して、認識判定領域に入る旅客モデルの中から対向する旅客モデルからのみ影響を受けられるようにした。

認識判定の基準となる旅客モデル A_i の進行方向のベクトル \mathbf{V}_i に対して、旅客モデル A_j の進行方向のベクトルを \mathbf{V}_j とする。対向者と判定する角度を θ_a とする。このとき2人の進行方向のベクトル \mathbf{V}_i と \mathbf{V}_j のなす角が条件式 (3.3) を満たしていれば、旅客モデル A_j は旅客モデル A_i に対向していることになる。図 3.6 は、認識判定領域内にいる対向者を判別している様子を表したものである。

$$\frac{\mathbf{V}_j \cdot \mathbf{V}_i}{|\mathbf{V}_j| |\mathbf{V}_i|} < \cos \theta_v \quad (3.3)$$

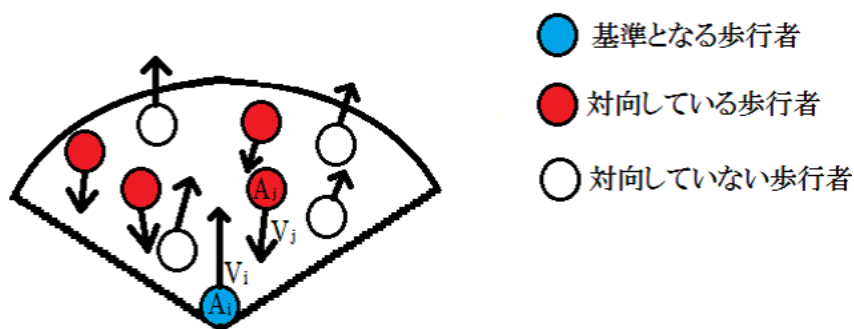


図 3.6: 認識判定領域内にいる対向者の判定

3.1.4 移動ベクトルの決定

本研究では、大石の研究 [17] や和田の研究 [18] を参考にポテンシャルモデルを用いて、旅客モデルの移動ベクトルを決定した。

ポテンシャルモデルとは、旅客モデルに正の電荷、目的地に負の電荷を与え、クーロンの法則に基づいて旅客モデルが目的地に向かうようにシミュレートするモデルである。ポテンシャルモデルで用いる旅客モデルとその旅客モデルが目指す目的地の間には引力が作用し、旅客モデルと他の旅客モデルの間には反発力が作用する。旅客モデルは一度の処理ごとに目的地や他の旅客モデルとの位置関係により引力と反発力を決定し、引力と反発力の大きさに応じて旅客モデルの速度と位置を決定する手法である。

この手法を用いるにあたり、3.1.2 項で説明したネットワークモデルによって決定したベクトル場 $\mathbf{W}(x, y)$ を用いる。ベクトル場 $\mathbf{W}(x, y)$ を用いて、旅客モデル A_i にかかる引力 \mathbf{E}_i を決定するが、旅客モデルが目的地に向かうまでの速度を一定にするため、引力の大きさは旅客モデルの現在位置から目的地までの距離にか

かわらず一定になるようにした。この時、目的地に与える電荷を Q_e とし、電荷を Q_e をベクトル場 $\mathbf{W}(x, y)$ に掛けたものを引力 \mathbf{E}_i とする。

3.1.3 項にて行った認識判定の領域に含まれる対向者の旅客モデルのみを対象とし、基準となる旅客モデル A_i の位置ベクトル \mathbf{A}_i から、対象となる旅客モデル A_j の位置ベクトル \mathbf{A}_j までのベクトルを \mathbf{T}_{ij} とする。対象となる旅客モデルに与える電荷の大きさを Q_f 、引力 \mathbf{E}_i と \mathbf{T}_{ij} のなす角を θ_f とする。これらを用いて、旅客モデル A_i が旅客モデル A_j から受ける反発力 \mathbf{F}_{ij} を式 (3.4) で求めた。このとき、旅客モデル A_i は対象となる旅客モデル全員から影響を受けるため、対象となる旅客モデル全員分の反発力を式 (3.5) で求め、合計の反発力 \mathbf{F}_i を旅客モデル A_i にかかる反発力とする。

反発力を求める際、なす角の余弦を乗じているのは、対象者に向かえば向かうほど反発力を大きく、平行もしくは遠ざかる方向へ進むほど反発力を小さくするためである。図 3.7 はポテンシャルモデルのイメージである。

$$\mathbf{F}_{ij} = \left(\frac{Q_T}{|\mathbf{T}_{ij}|^2} \right) \frac{\mathbf{T}_{ij}}{|\mathbf{T}_{ij}|} \cos \theta_f \quad (3.4)$$

$$\mathbf{F}_i = \sum_j \mathbf{F}_{ij} \quad (3.5)$$

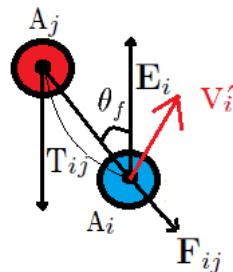


図 3.7: ポテンシャルモデル

旅客モデル A_i の単位時間 Δt 後の移動ベクトル \mathbf{V}'_i は、前回の速度ベクトル \mathbf{V}_i および、求めた引力 \mathbf{E}_i 、反発力 \mathbf{F}_i を用いた式 (3.6) によって得られる。また、旅客モデル A_i の単位時間 Δt 後の位置座標 \mathbf{P}'_i は、前回の位置座標 \mathbf{P}_i に速度 \mathbf{V}'_i を加えたオイラー陽解法 [19] の式 (3.7) によって得られる。これらの処理を行うことで、単位時間ごとに旅客モデルの移動を行った。

$$\mathbf{V}'_i = \mathbf{V}_i + (\mathbf{E}_i - \mathbf{F}_i)\Delta t \quad (3.6)$$

$$\mathbf{P}'_i = \mathbf{P}_i + \mathbf{V}'_i\Delta t \quad (3.7)$$

3.2 待ち行動

実際の駅ホームの乗降口にて、乗客は電車を待つ際に列を作って電車を待つ。本研究では松下の研究 [9] や待ち行列アルゴリズム [20] を参考に電車を待つ乗客の様子を再現を行った。乗客が電車を待つ際、列を作る様子を待ち行列形成という。待ち行列を形成するにあたり、列に並ぼうとする乗客は、他の乗客の有無によって行動が異なる。

乗降口が o 箇所存在するとする。このとき乗客モデル A_i が並ぼうとしている乗降口の左側を ${}_l\mathbf{P}_o$ 、右側を ${}_r\mathbf{P}_o$ とした。乗客モデルは、他の乗客がいない場合は ${}_l\mathbf{P}_o$ 、 ${}_r\mathbf{P}_o$ のいずれかを目的地として移動した。すでに待ち行列ができている場合には左右どちらの行列の人数が少ないかを判断する。判断をした際、少ないほうの一番後ろの乗客モデルを A_j とした。乗客モデル A_i は、乗客モデル A_j の後方の位置を目的地として移動した。これらの移動処理を行うことで、実際の乗客が電車を待つ列を作る様子を再現した。他の乗客がいない様子を図 3.8、すでに待ち行列ができている様子を図 3.9 で示す。

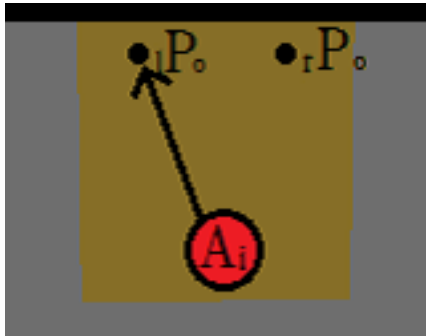


図 3.8: 待ち行列の先頭がない

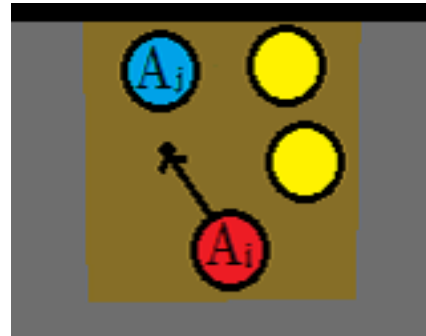


図 3.9: 待ち行列に加わる

実際の駅ホームにて、電車が到着した際、電車を待っている乗客は降客がいなくなるまでその場にとどまり続ける。このような動きを再現するにあたり、待ち行列を形成している乗客モデルの先頭は、電車の入口に向かって3.1.3項の認識判定を行い、判定領域に入る降客モデルの数が0人ならば電車の入口を目的地として移動した。先頭の乗客モデルの後ろに並んでいる他の乗客モデルは、先頭の乗客モデルが動き出したら、それに追従して移動を行う。これにより降客がいなくなるまで待つ乗客の様子を再現した。

3.3 降客優先行動と再乗車行動

乗降口で電車を待っている乗客は、電車到着の際、降客を優先的に移動させるために道をあけるという行動をとる。

本研究では非貫通制約 [21] を用いて乗客がとる降客優先行動を再現した。乗客モデルの位置を A_i 、降客モデルの位置を A_j とし、乗客モデルと降客モデルの半径を R とする。降客モデルが移動し、乗客モデルと重なった降客モデルを式 (3.8) によって抜き出し、重なった降客モデルをそれぞれ $S = \{S_0, S_1, \dots\}$ とする。このとき乗客モデル A_i に対して、重なり分の長さ D_{ij} を式 (3.9) にて求め、式 (3.10) によって重なっている人数人分の重なり分、乗客モデルの位置ベクトル A_i を移動し、移動した位置ベクトルを B_i とする。重なりが発生した際、乗客モデルの位置

を動かすことで降客優先の動きを再現した。乗客と降客の重なるの様子を図 3.10 で示す。

$$S = \{j \mid |\mathbf{A}_j - \mathbf{A}_i| < 2R\} \quad (3.8)$$

$$D_{ij} = |\mathbf{A}_j - \mathbf{A}_i| - 2R \quad (3.9)$$

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{A}_i + \sum_{j \in S} \frac{\mathbf{A}_j - \mathbf{A}_i}{|\mathbf{A}_j - \mathbf{A}_i|} D_{ij} \quad (3.10)$$

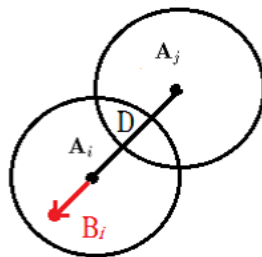


図 3.10: 重なるの図

実際の旅客の乗り降りの様子に関して、ドア付近に乗車していた旅客の中には電車内混雑により、自分が降りたい駅ではないにも関わらず、一旦電車から降りる旅客がいる。この旅客は、他の降客がすべて降りたら再び電車に乗るという再乗車行動をとる。このとき、再乗車を行う旅客は、乗降口にて乗車を待っている乗客が作っている行列の先頭的位置に移動する。図 3.11 は再乗車を行う旅客の行動のイメージ図である。

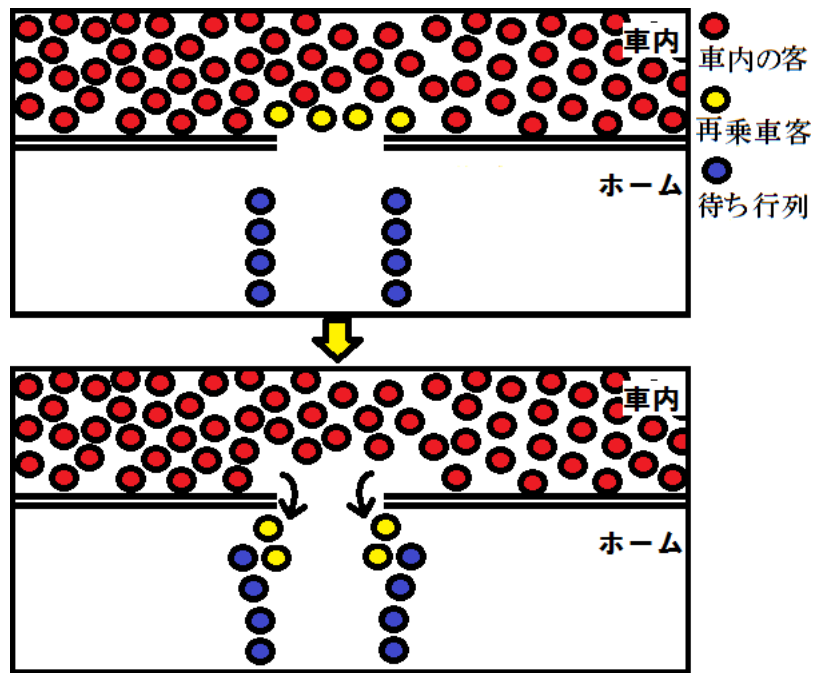


図 3.11: 再乗車客の行動の様子

このような再乗車行動を行う旅客の再現には、降客優先の動きと同様に非貫通制約を用いた。

再乗車を行う降客モデルは、乗客モデルが形成している待ち行列の先頭を目的地として移動を行う様にした。再乗車を行う降客モデルが移動する際、待ち行列を形成している乗客モデルとの間に重なりが発生した場合は降客優先行動と同様に、式 (3.10) によって乗客モデルを移動した。再乗車を行う降客モデルは目的地に到着した際、乗客モデルに変化し、3.2 節の降客モデルがすべて降りるまでその場にとどまる。降客モデルがいなくなったら、待ち行列の先頭者として、乗車行動を行う様にした。

第 4 章

検証と考察

4.1 検証結果

本章では、第 3 章で述べた旅客の動きを再現する提案手法をプログラムにて実装を行い、実際の旅客の動きを再現できているかの検証を行った。実装には 3D グラフィックツールキットである FK ToolKit System[22] を用いた。表 4.1 は実装の際に設定したパラメータの値を示す。

表 4.1: パラメータの設定値

パラメータ名	設定値
旅客モデルの数 (n)	500
人体円の大きさ (R)	0.5
パーソナル・スペースの割合 (c)	1.2
後方にとりうる幅 (a)	1.0
視野の広さ (θ_a)	120°
視界の大きさ (r)	5.0
引力の電荷 (Q_e)	0.1
反発力の電荷 (Q_f)	0.1

図 4.1 は島式ホームを移動する旅客を実装した様子を全体的に見た実装結果である。

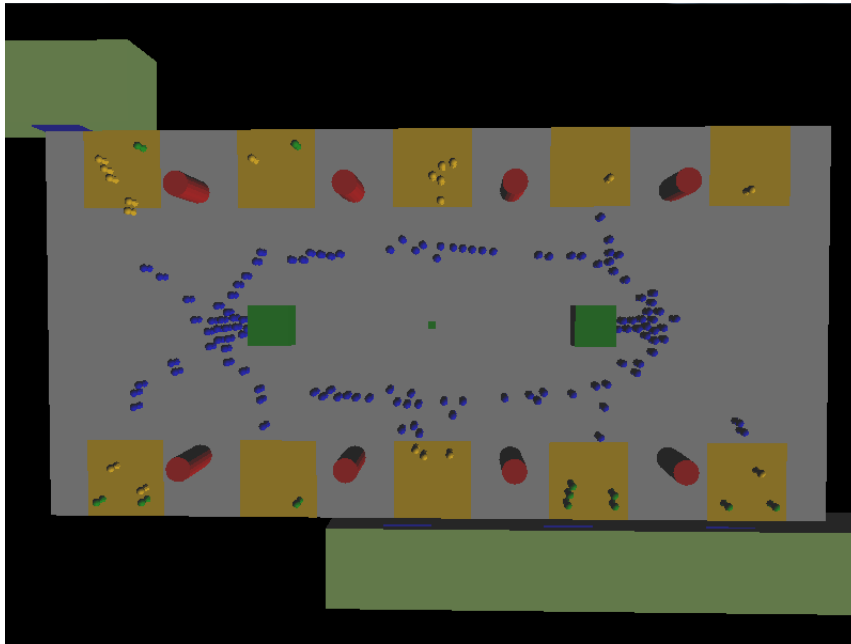


図 4.1: 島式ホームを移動する旅客の様子

図 4.2 は乗降口にて乗客が待ち行列を作る前の様子を表し、図 4.3 は乗客が待ち行列を作る様子を表す。黄色の人型モデルは乗降口で並ぼうとしている乗客を表し、緑色の人型モデルはすでに並び終えている乗客を表す。図 4.2 から図 4.3 に対して、並び終えている乗客モデルが増え、乗客モデルが行列を作っている。これらの実装結果画像から電車が来るまで乗客が待ち行列を作る様子を実現できていることが分かる。

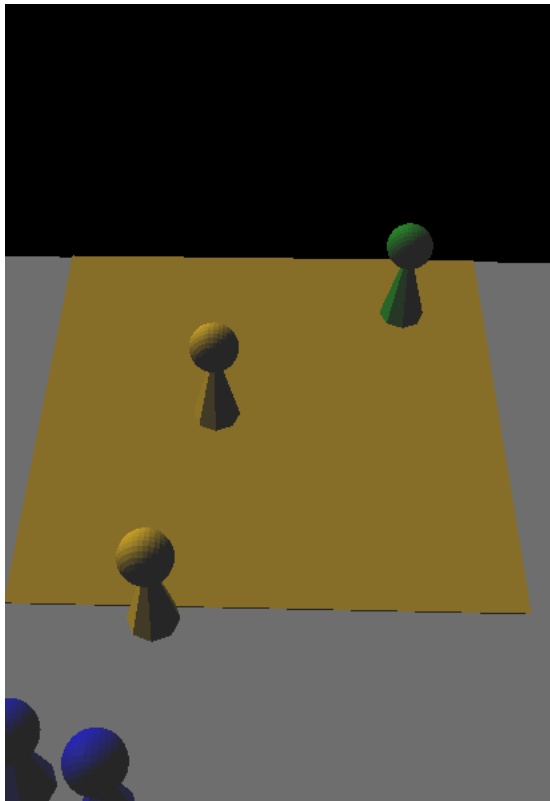


図 4.2: 待ち行列を作る前

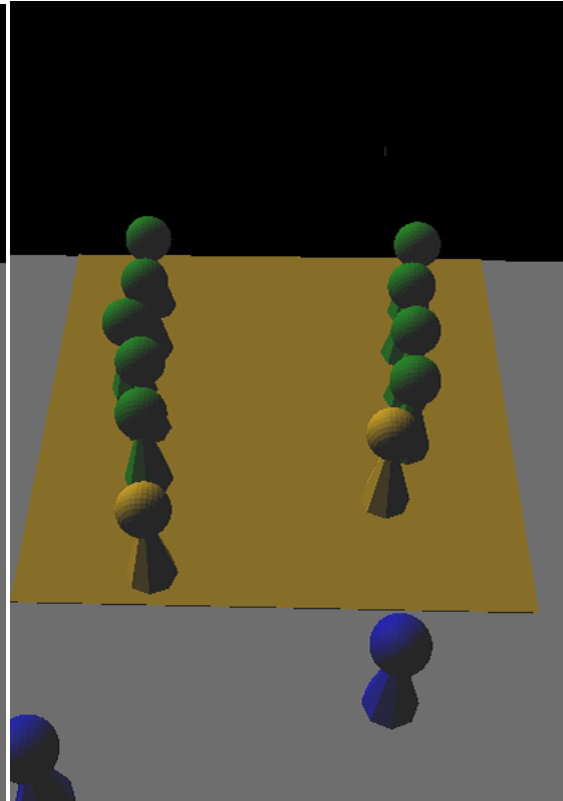


図 4.3: 待ち行列を作る様子

図 4.4 は乗降口にて乗客の待ち行列が降客を待っている様子を表し、図 4.5 は降客がすべて降りるまで、その場で待機している乗客の待ち行列の様子を表す。赤色の人型モデルは乗降口で降客がすべて降りるのを待っている乗客を表し、桃色の人型モデルは降客を表す。図 4.4 から図 4.5 に対して、乗客モデルの待ち行列は降客モデルが出てきた際、若干待ち行列の幅をとり、降客モデルの移動経路を妨げないようにしている。これらの実装結果画像から降客を優先的移動させる乗客の様子が再現できていることが分かる。

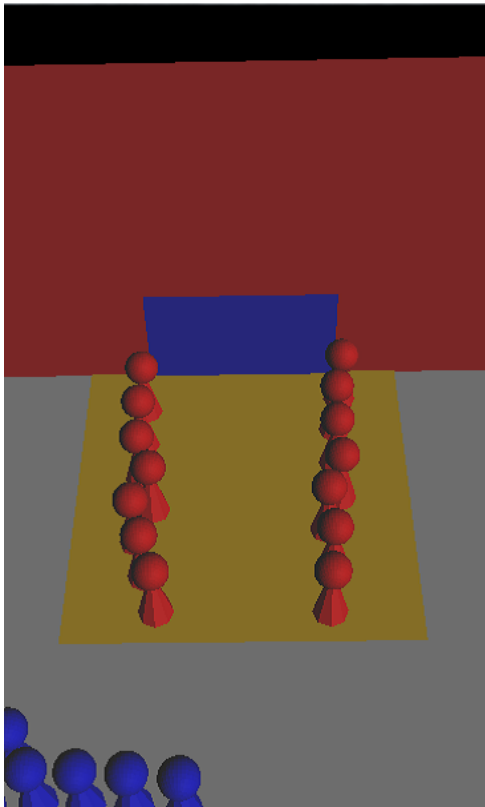


図 4.4: 電車到着時の待ち行列

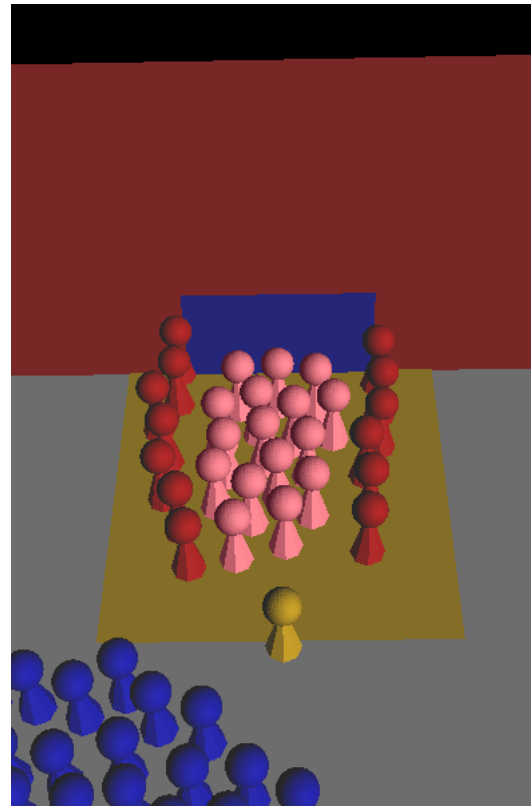


図 4.5: 降客を優先的に移動させる様子

図 4.6 は乗降口にて乗客の待ち行列が降客を待っている様子を表し、図 4.7 は再乗車を行う旅客が待ち行列に加わった様子を表す。赤色の人型モデルは乗降口で降客がすべて降りるのを待っている乗客を表し、桃色の人型モデルは降客を表す。黒色の人型モデルは再乗車するために乗客の待ち行列に加わった旅客を表す。図 4.6 から図 4.7 に対して、黒色の再乗車をする旅客モデルが乗客モデルの待ち行列の先頭に加わっている。再乗車する旅客モデルを加える際、すでに並んでいた待ち行列の先頭は、再乗車する旅客モデルを加えるための空間をあけている。これらの画像から再乗車する旅客の動きの再現、再乗車を加える待ち行列の様子を再現できていることが分かる。

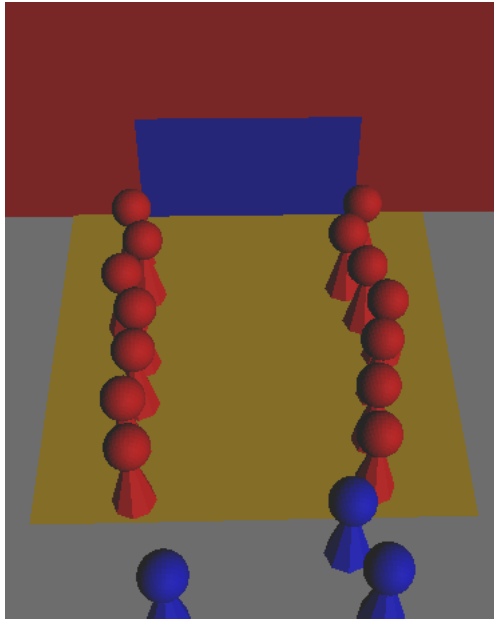


図 4.6: 電車到着時の待ち行列

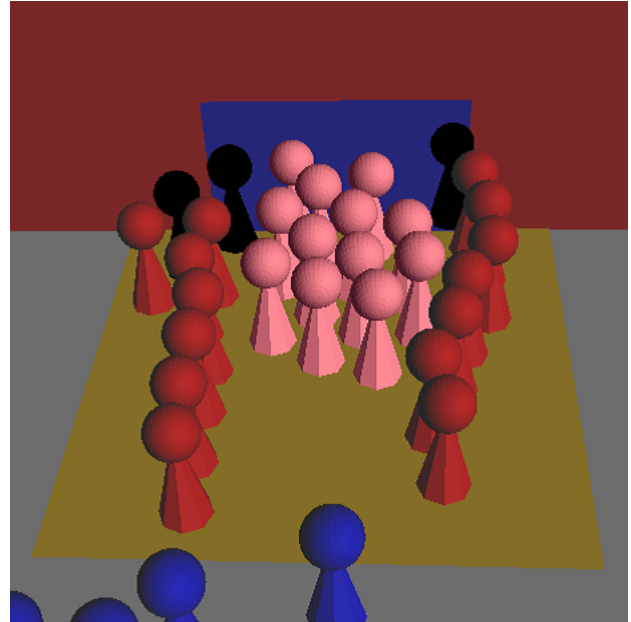


図 4.7: 待ち行列に加わる再乗車客

4.2 考察

本研究の提案手法を用いることで、混雑した駅ホームで旅客が電車を再乗車する動きを再現することができたといえる。旅客が電車を再乗車するにあたり、旅客を乗客と降客に分け、それぞれの動き再現することで、駅ホームで電車を再乗車する旅客の動きを再現した。まず、乗客は電車を待つ際に待ち行列を形成し、降客がすべて降りるまで乗車を行わない。実装結果では、乗客モデルが電車を待つ際に待ち行列を形成し、降客モデルがすべて降りるまで、その場にとどまっていることから、実際に乗客が待ち行列形成を作る様子と、降客に優先的に道を譲る様子を再現できたと判断する。次に再乗車を行う旅客は乗客の待ち行列の先頭に加わるという動きをとる。実装結果では待ち行列の先頭の乗客モデルは、再乗車する旅客モデルを加えるために空間をあける動きをとり、降客モデルがいなくなつてから、乗車を行う動きをとっていることから、実際の再乗車を行う旅客の動きを再現できたと判断する。

第 5 章

まとめ

本研究では混雑した駅ホームで旅客が電車を再乗車する動きを再現するシミュレーション手法を提案した。また、インタラクティブなコンテンツへの応用を可能にするため、リアルタイムなシミュレーションを目標とした。現実の旅客の動きを再現するために、旅客モデル1つ1つに対してパラメータを設定し、旅客モデルの動きを制御した。また、旅客を乗客と降客に分類し、乗客と降客がとる特徴的な動きを分析したうえで再現する手法を提案した。特に電車到着時に見られる乗客の降客優先の様子や、再乗車行動をとる旅客の様子などを重点的に再現するようにした。

本研究では提案手法にてリアルタイムに旅客の動きを再現できるかを検証するために、3DグラフィックツールキットであるFK ToolKit System[22]で実装を行った。駅ホームの全体的な旅客の動きを行う中で、乗客と降客それぞれがとる特徴的な動きを提案手法にて再現できる様子を実装結果を通して証明した。

今後の展望として、本研究では旅客モデルの速度をほぼ一定としたが、現実の旅客はそれぞれ移動速度が異なっており、時として他の旅客を追い越すなど、速度の違いにより行動が変化する。また、電車の発車時刻が迫ると駆け込み乗車を行うなどといった、旅客の速度に変化をつける面での展望がある。よりリアルな駅ホームでの旅客の動きを再現するにはこれらのことを考慮する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くのご指導並びに適切な助言を下さいました、本校メディア学部の渡辺大地講師、三上浩司講師に心からの感謝の意を表します。また、研究について親身に相談に乗ってくださった竹内さん、阿部さんをはじめ、院生の武田先輩、石塚先輩、瀬田先輩、松尾先輩、平野先輩に厚くお礼を申し上げます。そして、苦楽を共にしたゲームサイエンス研究室に所属する多くの仲間たちにも深く感謝いたします。最後に、精神的に支えてくれた家族に心からの感謝の意を表します。数多くの人々に支えられて、ここまで来ることができました。皆様本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] “Second Life.” <http://secondlife.com/?lang=ja-JP>.
- [2] “ザ・シムズシリーズ.” <http://www.thesims.jp/>.
- [3] “群衆行動シミュレーション: 研究サーベイ: 篠田 考祐.” http://profile.k4no.info/index_j.html.
- [4] 青木俊幸, 石突光隆, 山本昌和, “駅における人の流れ,” **鉄道技術情報誌特集:流れを探る** (2008).
- [5] 青木俊幸, “駅構内旅客流動シミュレーション,” **鉄道技術情報誌鉄道技術アラカルト** (2009).
- [6] 阿久澤あずみ, **駅構内における群集歩行シミュレーションの研究**, Master’s thesis (2006).
- [7] 金森寛, **移動効用を考慮した駅構内における人間の歩行シミュレーション**, Master’s thesis (2006).
- [8] 中村恭平, 藤井規雄, “マルチエージェントモデルに基づく詳細な列車運行および旅客行動を再現するシミュレータの開発,” **平成 22 年電気学会全国大会** (2010).

- [9] 松下聡, “持ち行動を含む群集歩行シミュレーションモデルの研究,” **日本建築学会計画系論文報告集 (432)**, 79–88 (1992).
- [10] 鈴木葉子, 森藤章光, 高柳英明, 服部岑生, 柳澤剛, “待ち行列形成と混雑回避行動を考慮した実座標系歩行モデルに関する研究,” **日本建築学会大会学術講演梗概集 (2005)**.
- [11] N. Pelechano, J.M. Allbeck and N.I.Badler, “Controlling individual agents in high-density crowd simulation,” *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH* (2007).
- [12] “こひつじの家 鉄道の部屋.” <http://www.isok.jp/rail/>.
- [13] 渋谷昌三, [人と人との快適距離パーソナルスペースとは何か], 日本放送出版協会, 東京 (1990).
- [14] 河合邦治, 青木俊幸, 大戸広道, 都築知人, 古賀和博, “鉄道駅における旅客流動に関する研究 その9 乗車位置選択の利用者意識調査,” **日本建築学会大会学術講演梗概集 (1999)**.
- [15] David M. Bourg Glenn Seemann, [ゲーム開発者のための AI 入門], O'REILLY オライリー・ジャパン (2005).
- [16] 石川朱香音, **人間の行動特性を考慮した雑踏における自律エージェントモデルの歩行行動**, Master's thesis (2003).
- [17] 大石隆俊, **仮想空間を用いた群集歩行の衝突シミュレーション**, Master's thesis (2005).
- [18] 和田剛, **スクランブル交差点における歩行挙動モデルとシミュレーション**, Master's thesis (2001).
- [19] 越塚誠一, [粒子法シミュレーション—物理ベース CG 入門], 培風館 (2008).

- [20] 牧本直樹, [待ち行列アルゴリズム行列解析アプローチ], 朝倉書店 (2001).
- [21] David M. Bourg Glenn Seemann, [ゲーム AIプログラミング], O'REILLY オライリー・ジャパン (2005).
- [22] “Fine Kernel Tool Kit System.” <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.