

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

修士論文

高齢者支援施設における  
マルチエージェントシミュレーション  
Multi-agent simulation in nursing homes

2020年1月15日ビルド

指導教員 吉村忍 教授

学籍番号 37-186421

紫安勇成

# 目次

図目次	iii
表目次	iv
第 1 章 序論	1
1.1 研究背景 . . . . .	1
1.1.1 日本の抱える諸課題 . . . . .	1
1.1.2 医療現場の諸課題 . . . . .	2
1.1.3 国の取り組み . . . . .	2
1.1.4 医療技術の発達 . . . . .	2
1.1.5 医療技術導入における課題 . . . . .	3
1.2 目的 . . . . .	4
1.3 本論文の構成 . . . . .	4
第 2 章 提案手法	5
2.1 知的マルチエージェントモデル . . . . .	5
2.1.1 知的エージェントの構築 . . . . .	6
2.1.2 Social force model . . . . .	6
2.1.3 介護ペア選択アルゴリズム . . . . .	8
2.2 仮想環境 . . . . .	9
2.2.1 高齢者施設 . . . . .	9
2.2.2 介護者エージェント . . . . .	10
2.2.3 被介護者エージェント . . . . .	10

---

第 3 章	数値実験	11
3.1	実験条件 . . . . .	11
3.2	介護挙動の基本的な検証 . . . . .	12
3.3	評価指標 . . . . .	12
3.4	結果および考察 . . . . .	13
第 4 章	結論	17
4.1	本研究のまとめ . . . . .	17
4.2	今後の展望 . . . . .	17
謝辞		18
参考文献		19

# 目次

2.1	シミュレーションの概念図 . . . . .	5
2.2	知的エージェントの模式図 . . . . .	7
2.3	本シミュレーションにおける環境とエージェント . . . . .	7
3.1	知的エージェントの模式図 . . . . .	12
3.2	知的エージェントの模式図 . . . . .	13
3.3	知的エージェントの模式図 . . . . .	14
3.4	知的エージェントの模式図 . . . . .	15
3.5	知的エージェントの模式図 . . . . .	15
3.6	知的エージェントの模式図 . . . . .	16

# 表目次

1.1	交通流シミュレーションのモデル比較 . . . . .	2
-----	-----------------------------	---

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

高齢者施設は、現代社会の基盤となるシステムである。一方で、少子高齢化やそれに伴う介護士の不足は、医療サービス利用者にとって大きな問題である。これらの問題を解決するために、介護士の労働環境の改善や医療施設の拡充等が検討されている。医療現場は、一旦変更してしまうと容易に元に戻すことが難しい。しかも医療現場は非常に複雑であり、サービスの被提供者のプライベートや安全と密接に関連していることから、実験を行うこと自体が時間・コスト・安全の面から現実的ではない。このため、最新技術の導入等の実験を行い、それらの効果検証が出来る医療シミュレータの開発が急を要しているものの、医療現場はプライベートな空間であり、これまで現実データを十分に獲得することが出来ず、有用なシミュレータの構築が難しかった。しかし、今後の日本における医療の重要性を考えると、個人の特性や意志を持った主体として介護者、被介護者を取り扱い、それらの詳細な相互作用を取り入れたシミュレータの構築が必要であると考えられる。

#### 1.1.1 日本の抱える諸課題

我が国では、世界に先駆けて少子高齢化が深刻化している。1950 年時点で 5 %に満たなかった高齢化率（65 歳以上人口割合）は、1985 年には 10.3 %，2005 年には 20.2 %と急速に上昇し、2015 年は 26.7 %と過去最高となっている。将来においても、2060 年まで一貫して高齢化率は上昇していくことが見込まれており、2060 年時

点では約 2.5 人に 1 人が 65 歳以上の高齢者となる見込みである [1].

1.1.2 医療現場の諸課題

1.1.3 国の取り組み

1.1.4 医療技術の発達

これら技術には、高齢者自身の自立生活支援、高齢者介護の支援、生活の質（QOL）と快適性の高揚とその維持など、高齢者に対する生活支援分野においては、その使用者が被介護者か介護者により自立支援技術と介護支援技術に分けられる。

・ 自立支援技術

排泄、入浴、調理、食事、就寝・起床、洗濯、清掃、義肢・装具、移乗、生活圏移動

・ 介護支援技術

排泄、入浴、清拭、褥瘡予防、食事、就寝・起床、移載・移動、監視

また、これら技術には開発の優先順位が設けられている。以下の表では、高齢者を自立意識が高い、低い、認知症の 3 パターンで分類したものと、被介護者の状態として全介護、半介護、身体異常の 3 パターンで分類したもののマトリクスを示している。

表 1.1 交通流シミュレーションのモデル比較

	全介護	半介護	身体異常
自立意識強い	自立支援		
自立意識弱い			
認知症		介護支援	

・ 自立支援

自立意欲が高いにもかかわらず自立できていないことに対する支援機器が必要

・ 介護支援

一部介護を要する自立意欲の弱い高齢者には肉体的・精神的・時間的に大きな負担

### 1.1.5 医療技術導入における課題

しかし、前述の支援機器の実用化には以下のように多くの問題点が存在する。

- 性能不十分
- 操作複雑
- 寸法・重量
- 高価
- 危険
- 公害
- プライバシーの侵害

これら問題により、新技術の導入は医療サービス被提供者にとってはもちろん、医療機関にとって簡単に行うことができない。これら技術の導入が進んで来なかった背景として、そもそも技術として不完全であることに加え、現場の忙しい看護師や医師たちが簡単に使えるようなものでなければいけないことなど多くの制約があり、中でも、導入した際の効果検証ができないことが、意思決定の大きなボトルネックとなっている。また、病院は収益が順調に出ている状態だと、リスクをとって環境を改善するインセンティブが湧きづらく、こういった技術導入へのインセンティブが働かないことも大きな課題として挙げられる。

以上のように、最新技術の導入等の実験を行い、それらの効果検証が出来る医療シミュレータの開発が急を要しているものの、医療現場はプライベートな空間であり、これまで現実データを十分に獲得することが出来ず、有用なシミュレータの構築が難しかった。しかし、今後の日本における医療の重要性を考えると、個人の特性や意志を持った主体として介護者、被介護者を取り扱い、それらの詳細な相互作用を取り入れたシミュレータの構築が必要であると考えられる。

シミュレーションを行う際に気を付けなければならないのは、シミュレーションで用いる行動ルールのパラメータの妥当性とその客観性である。実際の介護の動きの計測結果から客観的に抽出されるルールやパラメータを入力とするシミュレーションが理想的である。しかし現在のところ、行動ルールのパラメータを抽出することを可能



にするほどの精度の高い人流計測をするための研究はあまりされていない。これは一つには現在主流である単純な画像解析による手法の限界、もう一つには介護という環境がプライベートな空間であり、そもそも計測をできるような環境にない、という事が挙げられる。数値シミュレーションの現状を見ると、ポテンシャルモデルを用いた手法 1), セルオートマトンを用いた手法 2), 個別要素法に基づく手法 3), 4), 5) など様々な手法が存在している。これらの手法は計算の単純化による計算効率の高さや簡単な追従行動の再現能力などの長所を持っている。しかし、ポテンシャルモデルでは設定されるポテンシャルの客観性の低さ、通路閉塞のような非線形現象の予測の困難さ、といった問題がある。また、セルオートマトンを用いた手法ではルールの妥当性・客観性に問題がある。個別要素法に基づく手法は、人が密集する場合まで扱えるという利点はあるが、ここでもやはりルールを客観的に決定することが難しい。

## 1.2 目的

我が国日本では、医療技術の研究が盛んに行われているのにも関わらず、それらの導入・浸透には至っていない。そこで本論文では、各医療機関がそれら技術の導入の意思決定につながるシミュレーションモデルを構築することを目的とする。シミュレーション上で技術の性能評価を行い、それによって技術の導入促進を目指す。

## 1.3 本論文の構成

1 章では本論文の研究背景として、日本、医療界の諸課題について説明を行った。それに加えて課題の解決を目指す技術の紹介を行い、それらを導入する上での課題点を整理することで本論文の目的を示した。2 章では、提案手法についての説明をしている。3 章では提案手法の数値実験により手法の検証を行う。4 章では 3 章で得られた結果をまとめ、それらから得られる示唆についての考察を行い論文のまとめとする。

## 第2章

# 提案手法

本研究で対象とするエージェントシミュレーションの大きな特徴は、介護の対象となる高齢者の運動機能や認知機能の低下に大きなバリエーションがあると同時に、介護者側にも国家資格をもった介護福祉士から、介護ヘルパー、ボランティアスタッフまで技能や知識、経験に大きなバリエーションがあることである。そうしたことを念頭に置いた上で、本研究では介護者エージェント、被介護エージェント、環境としての高齢者施設の基本モデリングを検討した。図 2.1 に概念図を示す。黒で示される介護者が、自身が持つ視野の中で水色で示される被介護者を観測する。

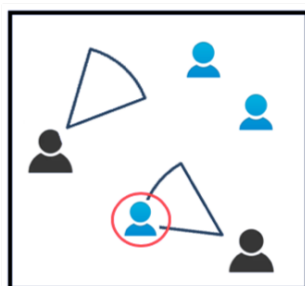


図 2.1 シミュレーションの概念図

### 2.1 知的マルチエージェントモデル

介護行動は社会系の複雑現象である。私たちが行動を起こす際に、認知症による自己の生理機能への理解が周囲に与える影響を懸念することはあっても、その繰り返しのによって大きな事故につながると理解している人は少ない。しかし、個人レベルで

は、手すりに捕まる、他の歩行者に接触しないようにするといった比較的単純なルールに従い行動しているが、それらの個人行動が多種・多量に存在し、相互作用することによって全体としては非常に複雑な現象となる。複雑系を解析する手法の一つとして、マルチエージェント手法がある。しばしば、セルオートマトンが複雑系のシミュレーションに用いられ、セルオートマトンに基づくシミュレーションの研究事例もいくつ也存在する。これに対して、本シミュレータでは、人間という知的レベルの高い主体が多数集まり相互作用を起こす介護現象をより精緻に再現するために、情報を知覚し、それを基に自律的に行動を起こす主体を知的エージェント (Intelligent Agent), それを取り巻く世界を環境 (Environment) と定義し、シミュレーションの構造はマルチエージェントのフレームワークに基づき構築している。そこで、これを知的マルチエージェントモデルと呼ぶ。

### 2.1.1 知的エージェントの構築

図 2.2 に知的エージェントのイメージを示す。知的エージェントは、情報を知覚するセンサーと動作を実行する作用器を持っている。また、エージェント自身の思考プロセスを保持しており、センサーから得られた情報と自分の有する知識と判断基準に基づき自律的に行動を決定し、作用器を通して行動を起こし、環境に働きかける。センサー、作用器、思考は知的エージェントが実際に適用される時点で、問題に応じて定義される。図 2.3 にエージェントと環境の相互作用の様子を模式的に示す。介護者エージェントが自らの行動により環境に影響を与え、その環境によって被介護者エージェントが影響を受けることになる。ある主体の動きによって系全体の動きが規程され、複雑な現象が創発する。

### 2.1.2 Social force model

本研究では、高齢者施設内で介護者が高齢者のトイレ介護のために空間移動するプロセスをモデリングするために、Social force model (SFM) [2] という歩行者モデリング理論を用いる。SFM は、歩行者を 2 次元の粒子であると仮定し、その粒子に以下の 4 つの力が働くと仮定するモデルである。

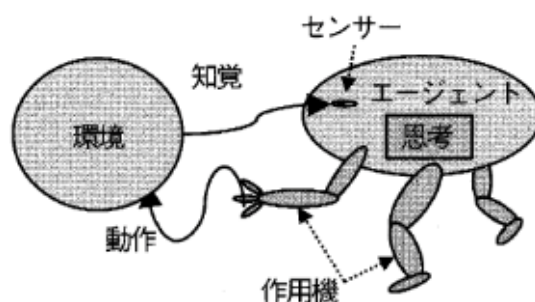


図 2.2 知的エージェントの模式図

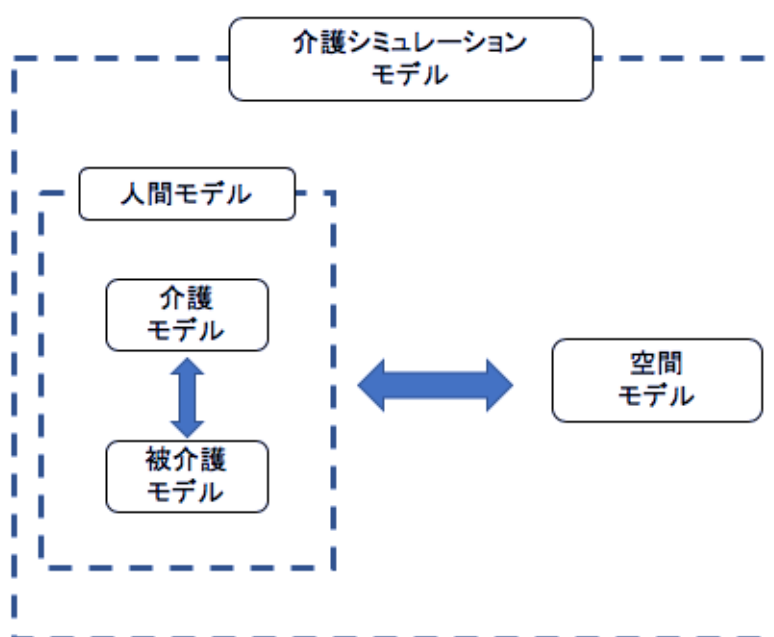


図 2.3 本シミュレーションにおける環境とエージェント

- 移動目標に近づく力
- 他のエージェントからの斥力
- 壁などの環境からの斥力
- 魅力的な環境への引力

移動目標に近づく引力は、エージェントが当初想定していたコースからはずれてしまった場合に目的地の進行方向へと曲げるように働く力のことであり、他のエージェントや壁などからの斥力は、エージェント間、あるいは壁とエージェント間との距離

や、お互いの進行方向から決定される反発的な力のことである。魅力的な環境への引力では、友人やショーウィンドー、高齢者支援施設の中では手すりのような、歩行者にとって近づくことのインセンティブが発生するようなものへの引力のことである。これら4つの力は以下のように数式で表現される。

$$\begin{aligned}
 F_{\alpha}(t) = & F_{\alpha}^0(v_{\alpha}, v_{\alpha}^0 e_{\alpha}) + \sum_{\beta} F_{\alpha\beta}(e_{\alpha}, r_{\alpha} - r_{\beta}) \\
 & + \sum_B F_{\alpha\beta}(e_{\alpha}, r_{\alpha} - r_B^{\alpha}) \\
 & + \sum_i F_{\alpha i}(e_{\alpha}, r_{\alpha} - r_i, t)
 \end{aligned} \quad (2.1)$$

右辺第一項が移動目標に近づく力、第二項が他のエージェントからの斥力、第三項が壁などの環境からの斥力、第四項が魅力的な環境への引力を表している。各エージェントはタイムステップごとに以上の力を計算して、あらかじめ設定された最大歩行速度を超えないように歩行速度を更新する。

### 2.1.3 介護ペア選択アルゴリズム

MATES には、フランチング カ済んだ後に行う、1, 3 抹示慨産を'ノ.云した。ただし、現在のところプランニングー1乱地、危.由地、目的地などを定める行為)のブローヒスは粕に入っていない。荊路探索は、本来レ量と一身可能性の1斗且宏抱える雉しい問返であるが。第1段階としてA\*アルゴリズムIHに基づく経路録才減能を'メ装した。さらに、探索された複Stの径路力帯:・1つをノ一択するプロセスについては、-1己に示すオ1「路選択に圓わる複数の因子1a)出発地から1=1的地までの逗のり[b:一戸E発地から目的地までの旅行時間「C)交デ厂』点での直JL回叛(d:た)' :点でのノ折回数[e>交差点での右折回数[1:1通過する道路の幅を9{:みつきて線形結合した)r'式の効1.1:II知数を定乳し、これ.亡最大にするものをノ]二択することとした。

## 2.2 仮想環境

本シミュレータにおける環境とは、道路構造とそれに含まれる情報一般を指す。道路構造のモデル化はそれ自体が交通流シミュレータの汎用性・拡張性を実現する上で重要な課題である。本シミュレータでは、車は基本的に、車線（レーン）に沿って一次元制で走行することを仮定する仮想走行レーンモデル 101 をベースとして道路モデルを構築しており、加えて仮想走行レーンモデルのみでは実現することが難しい大域的な経路探索や、車線変更、追い越し挙動などを実現するために、レーン束オブジェクトとレーン幅という概念を新たに導入した階層型道路モデルを構築した 4)。本研究では、これに加えて、歩行者を扱うために道路モデルを拡張した。

### 2.2.1 高齢者施設

現実には、車も歩行者も道路空間を移動するが、それぞれの移動範囲の時空間スケールや従うルールは大きく異なる場合も多い。こうした差異を無視して、道路環境に関して一元的な定義をしようと、シミュレータの汎用性や拡張性を大きく損なうことになる。そこで、歩行者の存在空間を車の存在空間とは独立して定義し、歩行者空間と車空間のコミュニケーション方式を定義することにより、道路環境を定義することとした。また、今回の開発では、歩行者を扱うための第 1 ステップとして歩行者エージェントの存在範囲を横断歩道に限定した。これは、交通量の多い都市部の幹線道路においては、歩行者が自動車と相互作用するのは交差点内の横断歩道がほとんどであると考えられるためである。歩行者は図 3 のような横断歩道エリアの中で行動する。横断歩道はそれぞれ固有の座標空間を持ち、2 次元座標を以てエージェントの位置を表す。横断歩道はエリアの境界に仮想的な滞留スペースを保持しており、歩行者は滞留スペースの中で絶えず発生している。歩行者の、横断歩道の幅方向の初期位置はランダムに決定する。滞留スペースに存在する歩行者は、該当する信号が青である場合に横断歩道 E に登場する。

### 2.2.2 介護者エージェント

介護者エージェントは 2 次元の歩行者エリア上に存存するため、方向と速度の制御を行わなければならない。今回は、歩行者の行動モデルとして SFM を採用した。また歩行者シミュレーションの研究分野において様々なモデル化が検討されている [3, 4]。たとえば、磁気モデルを用いると多方向に歩行するエージェントの相互作用を効率的に記述することが可能である。しかし、今回の研究のように横断歩道上での歩行を対象とする場合には、単路を右から左、または左から右に渡る 2 方向を考慮すれば十分である、また歩行者モデルとしてあまり複雑なモデルを採用すると計算量が増大し交通シミュレータの大規模化が困難であることから、本研究では分岐型 2 ノード向モデルを採用した。以下で歩行者エージェントの特徴と挙動について述べる。

デルの単純化のために、人体を直径 0.45m（成人男子の肩幅）の 1 [j] で近似する。現バージョンの MATES では高さの情報を解析に用いないため、平面で十分である、さらに、人体円の外側に他人の進入を拒む領域としてパーソナルスペースを設ける、パーソナルスペースとしては様々な形状が提案されているが [5]、本研究では 1m の直径を持つ円をパーソナルスペースとして定めた。

### 2.2.3 被介護者エージェント

被介護者エージェントについては、介護者エージェントと同様に Social Force Model を軸に、歩行者エージェントを作成し、それに加えてエージェントの状態によって時系列的に発生する要介護行動を実装した。高齢者の排尿に関する実態研究 [6] によると、排尿障害症状を自覚している人は男子が 38

## 第 3 章

# 数値実験

研究で新たに実装した歩行者エージェントおよび歩車相互作用モデルの定量的な評価性能を検証するために、2 種類のシミュレーション実験を行った、

### 3.1 実験条件

歩行者の存在が自動車交通に与える影響の例として、自動車の左折容量の低ト．を考える、これは、信サのある交差点において、直進車と歩行者との相互作用を考えにくく、また右折車は対向車線の直進中二とも相互作用を起こすため、純粋に歩行者の影響を取り出すことが困難であると考えたためである．具体的に、図 7 のような単純な十字路を作成して、車両と歩行者の発生数を変えながらそれぞれ実時間で 1 時間分のシミュレーションを行い、左折車の台数をカウントして理論値と比較した．時間ステップ  $\Delta t$  は 0.1 秒としたので各ケースとも 36,000 ステップ計算した、時速 60km で走る自動車は  $\Delta x = 0.1$  秒の間に 1.67m 移動する、なお、左折車の発生台数は全体の発生台数の 3 分の 1 に設定した．信号のサイクル長を 120 秒、青時間を 50 秒、歩行者用信号の青時間を 40 秒とした．本シミュレーションは Pentium4 [1.6GHz, メモリ 5'12MB] の計算機を用いて行い、エージェント発生数が自動車 1,000 台/時間、歩行者 20 人/サイクルと最も多いケースでの計算時間がおよそ 25 分であった、信号付き交差点での交通容量の理論値とは、流人部において十分長い車列ができているとき、青信号表示中に停止線を通り得る最大の交通流率によって定義され、青 1 時間あたりの台数



で表される。これを飽和交通流率と呼ぶ。飽和交通流率は様々な条件によって変化するのので、次式のように飽和交通流率の基本値に様々な補正係数を乗じることによって求められる。

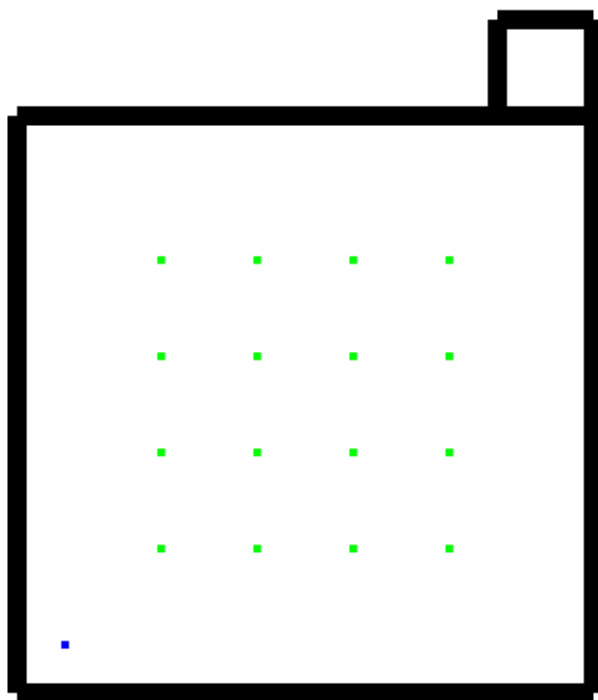


図 3.1 知的エージェントの模式図

## 3.2 介護挙動の基本的な検証

ATES の可視化機能を用いて交差点における自動車と歩行者の相互作用の様子を可視化したところ、その相互作用が自然に行われている様子を確認できた、図 11 には、そのスクリーンショットを小す。

## 3.3 評価指標

CaseV の目的は、CaseI の分断のない場合から CaseIV の完全分断への過程（経緯）を解析することにある。1（遮断率 0 %）と IV（遮断率 100 %）を除き中間値を 4 段階（遮断率 20・40・60・80 %）とし、その経緯を占有率、平均搬送距離、

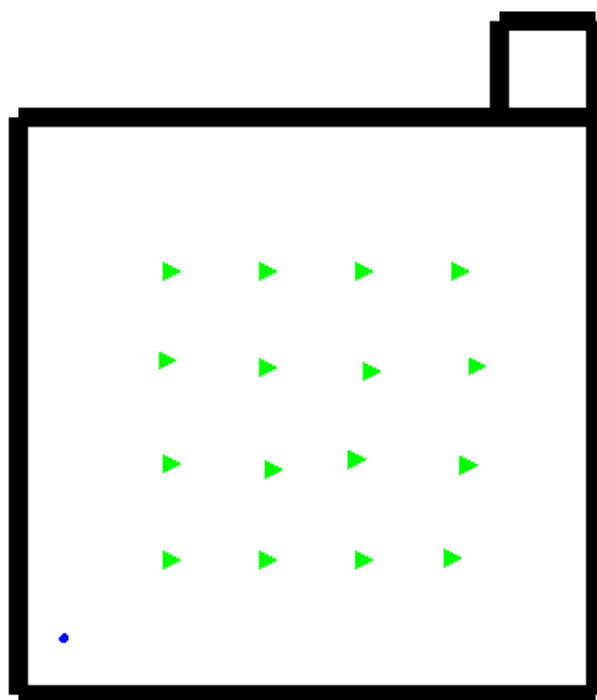


図 3.2 知的エージェントの模式図

変更過程、変更回数、負傷者の収容・未収容から検討する。個々の医療施設としてだけでなく、分断過程における同一地域内の医療施設群としても評価する。さらに、負傷者が互いに競合して影響し合う関係进行分析することで総食的に評価する。占有率が早期段階で満床にならない場合には平均搬送距離は長距離となるが、平均搬送距離を短距離とするには遠距離の負傷者を収容しないで早期段階で満床となる必要がある。つまり、全体のバランスについて考察することも必要である。

### 3.4 結果および考察

図 8 に、車両発生率・歩行者発生率をそれぞれ変化させた場合のシミュレーション結果（10 回の試行の平均値）を示す。比較のために、飽和交通流率の理論値も示す、車両発生率が 500 台／時間以下で歩行者発生率が 20 人／サイクル以上の場合には、シミュレーション結果と理論値の差は 12 % 以内であり、両者はよく一致しているといえる、一方、車両発生率が 200 台／時間以下の場合、お

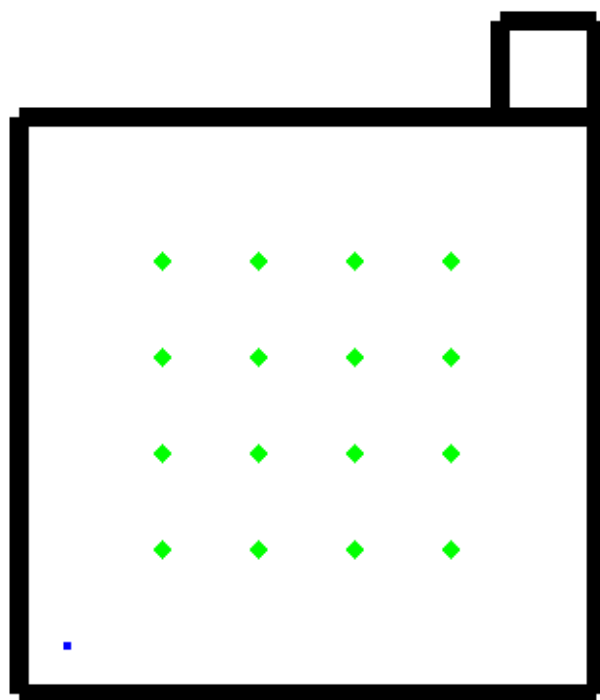


図 3.3 知的エージェントの模式図

よび歩行者発生率が5入／サイクルのときには、シミュレーション結果が理論値よりもかなり低くなっている。こ居しは、これらの条件では道路が飽和していないために発生する相違であると考えられる。

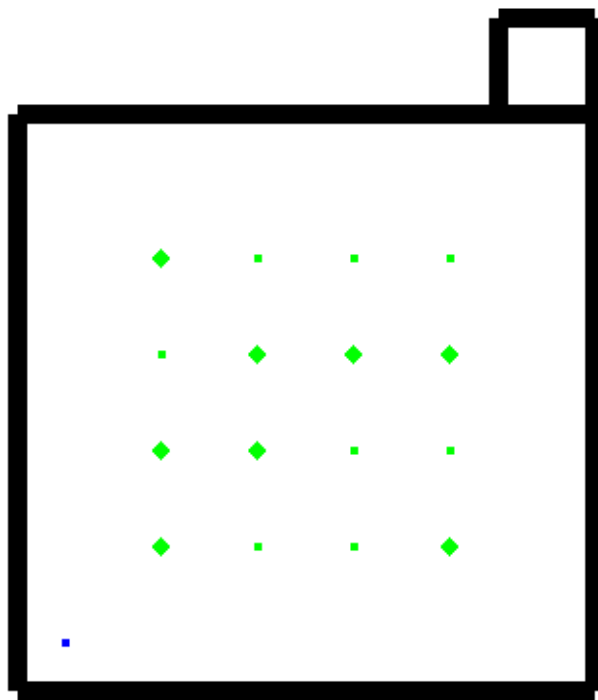


図 3.4 知的エージェントの模式図

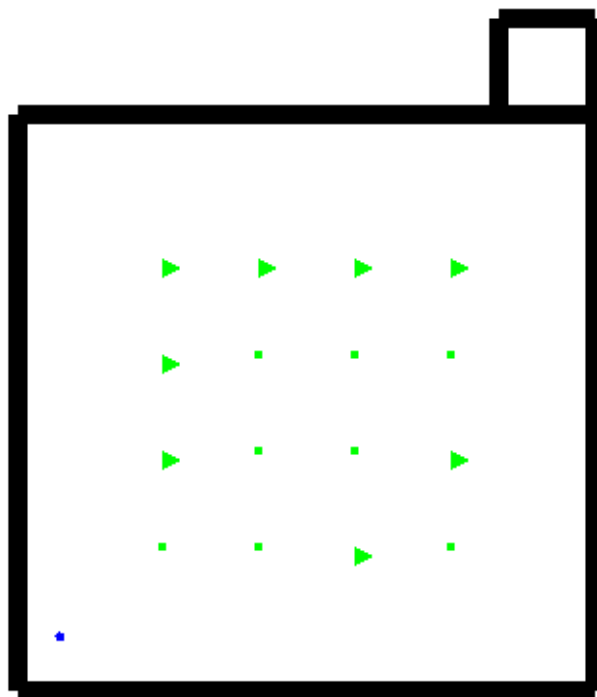


図 3.5 知的エージェントの模式図

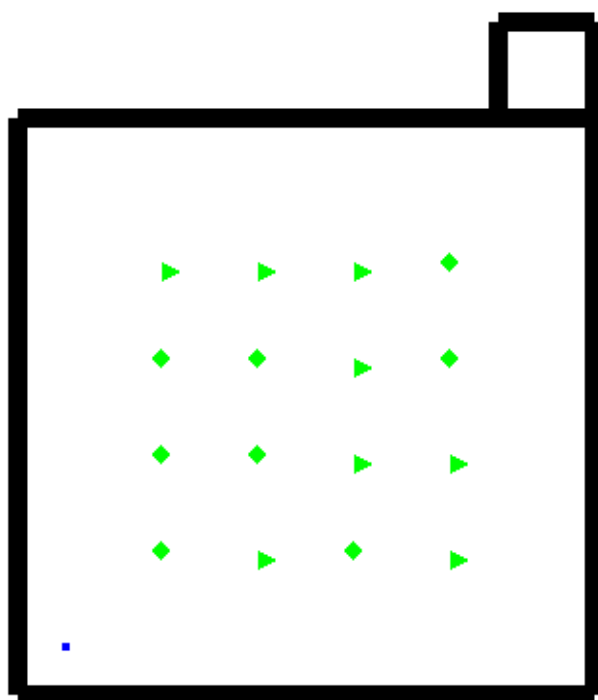


図 3.6 知的エージェントの模式図

## 第 4 章

# 結論

### 4.1 本研究のまとめ

本研究では，介護支援施設の主体（ここでは研究の第一段階として介護者，被介護者のみに着目する）を，能動的に自分自身で情報を集めて行動する主体性，すなわち自律性を持つ知的エージェントとしてモデル化し，多数の知的エージェントを仮想的な遭路環境上で相互作用させることによって，介護環境をシミュレーションする，知的マルチエージェントモデルに基づくシミュレータを構築した．本論文では，はじめに，本シミュレータに組み込まれた知的マルチエージェントモデルの理論及び実装法について述べた．次に，被介護者の状態によっていくつかの異なる環境を構成し，将来医療技術が発達して行くとどれほどのインパクトをもたらすのかについて，かなり良好な数値を示すことを確認した．

### 4.2 今後の展望

本シミュレータについて，絶対値レベルでの定量的な現状再現性については，信頼できる介護施設データが足りておらず，理論値を元に実測値と比較することでモデルの有用性について検証して行く必要がある．

## 謝辞

指導教員であり、本研究の機会を与えていただいた、吉村教授に感謝いたします。研究への姿勢や考え方など、右も左もわからなかった私に一から丁寧に教えていただきました。また、就職活動でもお気遣いいただき、本当に感謝しております。研究を通じて先生に教えていただいた、物事を構造的に捉え、仮説を持って取り組む姿勢は、授業では決して得られない貴重な学びになりました。先生から学んだ仮説思考とも言える考え方は、研究の領域に留まらず、人生においてとても重要なものであると確信しております。今回私は、これまで研究室にはなかった医療というフィールドでの研究を0から始めたわけですが、このようなチャレンジングな機会を与えていただいたこと、また研究内容が社会的意義のあるものだと感じたまま研究に取り組めたことは自分の修士課程にとってとても大きなことでした。本研究での経験や学びを忘れず、社会のために生かして参りたいと存じます。ゼミのディスカッションや研究打ち合わせでは、私に合わせて理解のしやすい説明も織り交ぜながら、医療現場について、研究発表について、教えていただきました。先生とのミーティングは、医療業界全体が抱えるマクロ的な課題をはじめとして、「私の母親の例だと～」といったようにミクロ的な物事の捉えかた、縦横無尽に課題を探索していく思考の柔軟さに圧倒されることが多く、非常に学びの多い時間でした。とても忙しいはずなのに何冊も本を読み、食欲に知識を蓄えていく姿勢は、私も今後死ぬまで持ち続けていきたいと心から感じております。これからは、吉村研究室の名に恥じない、社会に価値を提供できる人間になり、吉村研究室の卒業生として世界に名を馳せるよう精進いたします。また、いつも単位のことを気にかけてくださり、本当に感謝してもしきれません。約二年間、大変お世話になりました。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 厚生労働省, 平成 28 年版厚生労働白書 (2016)
- [2] D.HELBBING, P.MOLNAR: Social force model for pedestrian dynamics, Physical Review E 41, 4282, (1995)
- [3] 岡崎甚幸: 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, 日本建築学会論文報告集, 2S3, 111/117 (1979)
- [4] Kurdi Teknomo, Groria P. Gerilla : Sensitivity Analysis And Validation of a Multi - Agents Pedestrian Model, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6, 198/213 (2005)
- [5] 渋谷昌三: パーソナル・スペースの形態に関する考察, 山梨医科大学紀要, 2, 41/49 (1985)
- [6] 安藤正夫: 高齢者における排尿障害の実態について, 日本泌尿器科学会誌, 82, 560/564 (1991)