

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16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 シミュレーションフロー	8
2.1.4 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	13
3.3	評価指標	14
3.4	結果および考察	15
第 4 章	結論	20
4.1	本研究のまとめ	20
4.2	今後の展望	20
	謝辞	21
	参考文献	22

図目次

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
2.4	シミュレーションフロー	9
3.1	実験環境	12
3.2	健常者（介護技術を導入した場合の被介護者）の場合の可視化	13
3.3	頻尿の場合の可視化	14
3.4	認知症の場合の可視化	15
3.5	健常者（介護技術を導入した場合の被介護者）の場合の可視化	16
3.6	頻尿の場合の可視化	16
3.7	認知症の場合の可視化	17
3.8	健常者と認知症の場合の可視化	17
3.9	健常者と頻尿の場合の可視化	18
3.10	認知症と頻尿の場合の可視化	18
3.11	実験結果	19

表目次

1.1	介護技術の分類	2
3.1	実験条件	13
3.2	被介護者ごとの排尿回数	14

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 介護技術の分類

	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。

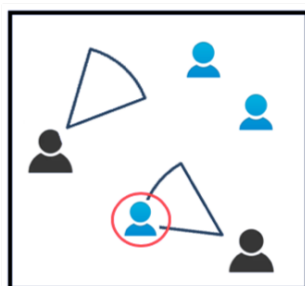


図 2.1 シミュレーションの概念図

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。

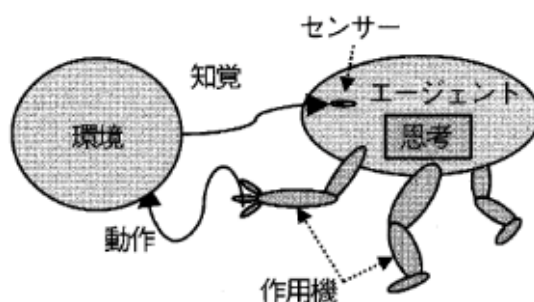


図 2.2 知的エージェントの模式図

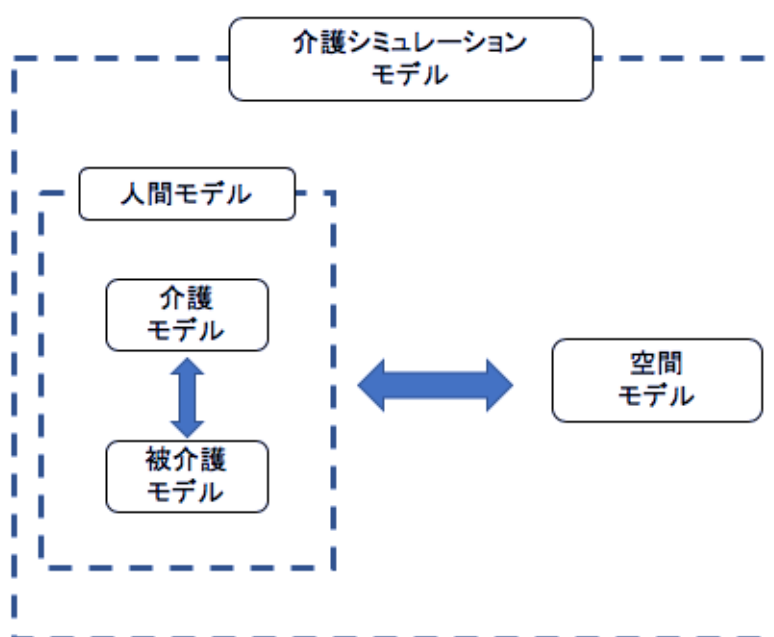


図 2.3 本シミュレーションにおける環境とエージェント

- 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。

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

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 シミュレーションフロー

本研究におけるシミュレーションの流れの概略図を図2.4に示す。まず、高齢者施設、介護者、被介護者といった空間を構成する要素を環境として構成し、その後実際にシミュレーションを開始する。タイムステップごとに、各エージェントの内部状態を変化させ、介護シミュレーションを行っていく。被介護者の場合は、時間経過で尿量を加算し、エージェントごとに設定されている閾値を超えた時点で介護アラートを出す。介護者は、自分の周りで介護アラートが出たタイミングで、自らと最も距離の近い被介護者のもとへの介護に向かう。これを繰り返すことがシミュレーションが進んで行く。

2.1.4 介護ペア選択アルゴリズム

上述のように、被介護者がアラートを発した時にどの介護士とマッチングさせるのかというのがシミュレーション上必要になる。本研究では、各タイムステップごとにある被介護者がアラートを出した時点で、その被介護者と介護可能な介護士との距離を計算し、ペアになりうる介護士と被介護者のペア候補配列を作成していき、その中

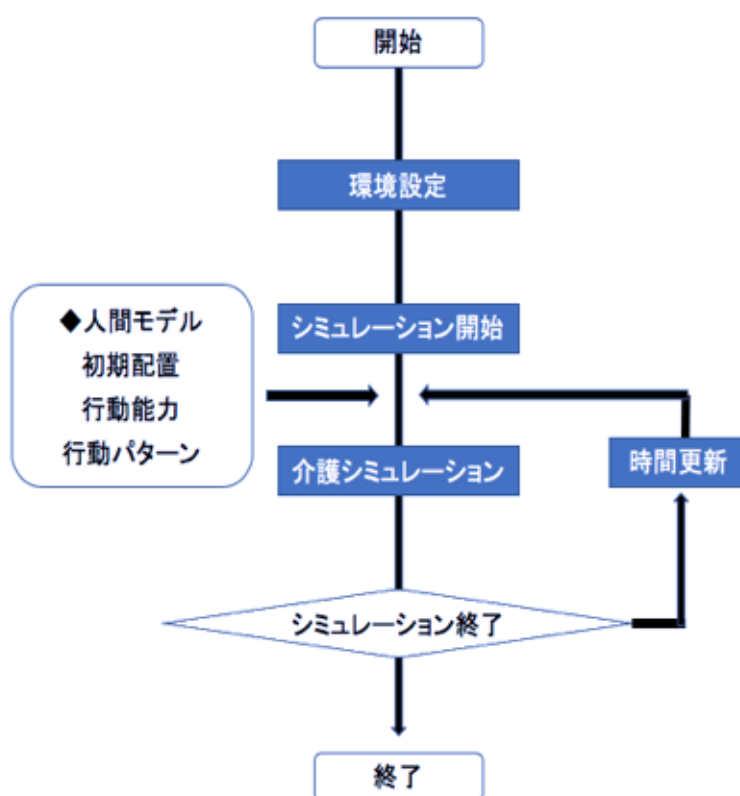


図 2.4 シミュレーションフロー

で全探索を行うことで、最も距離の近いペアを作成して行くこととする。

2.2 仮想環境

本シミュレータにおける環境とは、高齢者施設とそこに存在する介護者、被介護者構造を指す。高齢者施設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、介護者・被介護者は基本的に、自由移動を行うことができる二次元平面を想定している。

2.2.1 高齢者施設

今回の開発では、高齢者施設を表現するための第 1 ステップとして、Social Force Model を利用するため自由に歩行できる連続空間を対象とし、壁に囲まれた移動可能な二次元平面を作成した。

2.2.2 介護者エージェント

介護者エージェントは2次元の高齢者施設に存存するため、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 Social Force Model を採用した。歩行者シミュレーションの研究分野においては、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閉二次元平面での歩行を対象とする場合には、部屋の中を目的地に対してどう動いて行くかを単純に記述するモデルで十分である。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 Social Force Model 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。

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 %、女子が 23 % と高い水準にあり、男子では排尿困難症状が多く、女子では頻尿を訴える例が多かった。また明らかな尿失禁を抱えているのにも関わらず、その存在を知られたくないという心理が半数以上の人に認められたことも挙げられている。これらから、実際にトイレに行きたいと思っているかどうかの認知についてと、トイレで正常に排尿を行えるのかどうかといった機能について、被介護者のバリエーションを設けることとした。

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、シミュレーション実験を行った。この章では、実験で用いた環境設定と、実験結果をどのような評価指標で判断したか、またその結果と考察についてまとめている。

3.1 実験条件

今回の実験では、図 3.1 に示すように、15m 四方の二次元平面と、排泄場所としてのトイレをその上部に設置した。

この環境の中で、介護者と被介護者の可視化をおこなっていく。今回の実験では、介護における技術を導入した際に、それが介護環境にどのようなインパクトをあたえるのかについて検証を行うことが目的であるので、介護者の数は 1 人、被介護者の数は 16 人と設定し、比較的大きい施設を対象とした。被介護者のバリエーションとしては、健常者（技術のサポートを受けている被介護者）、頻尿である被介護者、認知症等の要因によってトイレに行くというアラートを出すことが難しい状況にある被介護者の 3 種類を想定している。それぞれ図 3.5、図 3.6、図 3.7 に示しているように、可視化の際に形を変えることでエージェントがそれぞれどのように相互作用を行っているのかを見ることができる。

この 3 種類のエージェントが、介護施設内の自由時間である 2 時間の間にいかなる回数排泄介助を行うことが必要か、またその介助は本当に必要であったのかというこ

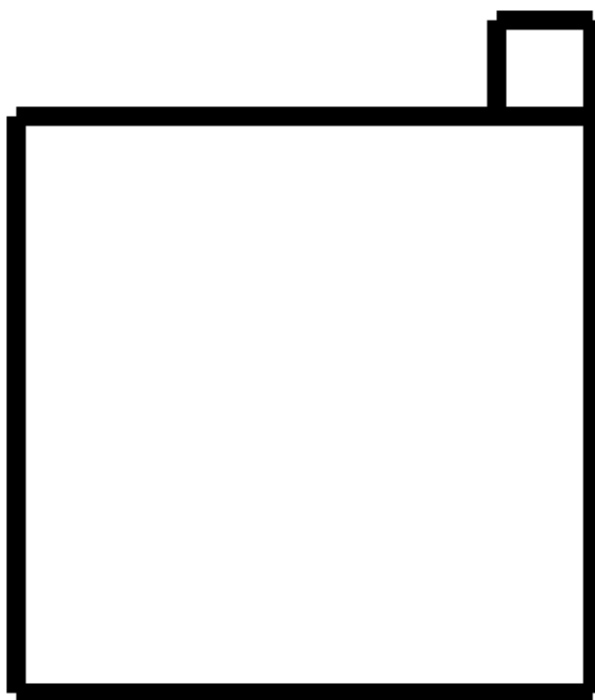


図 3.1 実験環境

とを確かめる実験をおこなう．一般的に高齢者の排尿量は一回で 100-150ml で，1 日に 8 - 10 回ほどトイレで尿を行うことが知られているので，今回の実験ではそちらの数値を用いることとした．健常者の場合は，頻尿の場合は，認知症の場合は，この 3 種類を～のように組み合わせた 6 パターンにおいて，相互作用を確認することとする．2 時間という時間の中で介護シミュレーションを行い，それを本章で示す評価指標で評価する．

Case1 は、健常の被介護者（技術の補助を受けた被介護者）が 100 % の状態，Case2 は頻尿の被介護者が 100 % の状態，Case3 は認知症の被介護者が 100 % の状態，Case4 は、健常の被介護者（技術の補助を受けた被介護者）と頻尿の被介護者が 50 % ずつの状態，Case5 は健常の被介護者（技術の補助を受けた被介護者）と認知症の被介護者が 50 % ずつの状態，Case6 は頻尿の被介護者と認知症の被介護者が 50 % ずつの状態を表現し，それぞれで実験を行う．実験条件については表 3.1 に示す．

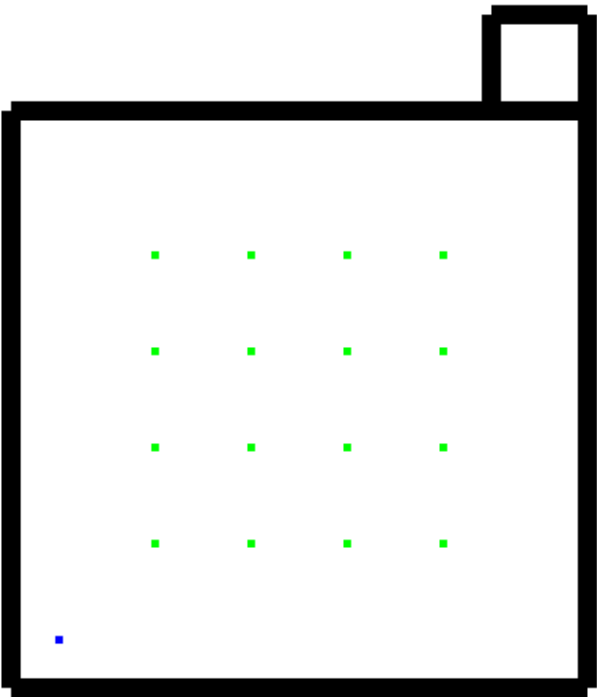


図 3.2 健常者（介護技術を導入した場合の被介護者）の場合の可視化

表 3.1 実験条件

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
健常者	100 %	0 %	0 %	50 %	50 %	0 %
頻尿	0 %	100 %	0 %	50 %	0 %	50 %
認知症	0 %	0 %	100 %	0 %	50 %	50 %

3.2 介護挙動の基本的な検証

本シミュレータが現実を反映できているのかについて，簡単な検証を行った．被介護者が，時系列で尿量が加算されて行き，その数値が健常者の場合は 100ml を超えた時点で，頻尿の被介護者は～を超えた時点で，認知症の被介護者は～を超えた時点で，トイレに行きたいというアラートを発するように内部状態を設定した．その結果，健常者の場合は，2 時間の間に 1 回トイレに行くという結果を得ることができた．これは実際のデータと比較しても整合性のある値となった．この結果を表??に示す．な

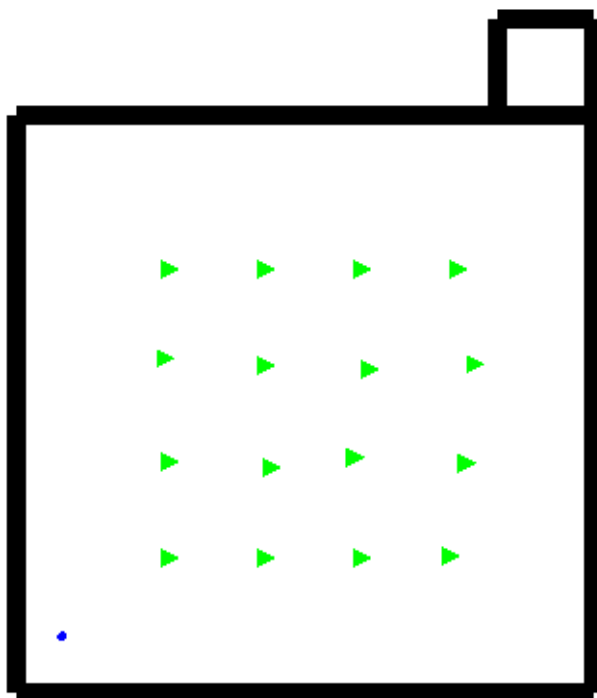


図 3.3 頻尿の場合の可視化

お，実験では 16 人の被介護者が存在するので実際は数値を 16 で割った数字が一人当たりの回数となっている．

表 3.2 被介護者ごとの排尿回数

	健常者	頻尿	認知症
一回目	15	21	6
二回目	15	22	5
三回目	16	26	5

3.3 評価指標

本研究の目的は，疾患のある被介護者，すなわち現状介護者の負担増の原因となっており，被介護者自身も自らの排泄が負担となっているようなケースにおいて，技術の導入を行うことでどれだけの効果が得られるのかを可視化するというものである．そこで，評価指標としては，排泄に行くべきである尿量の状態，あるいは自身が排泄

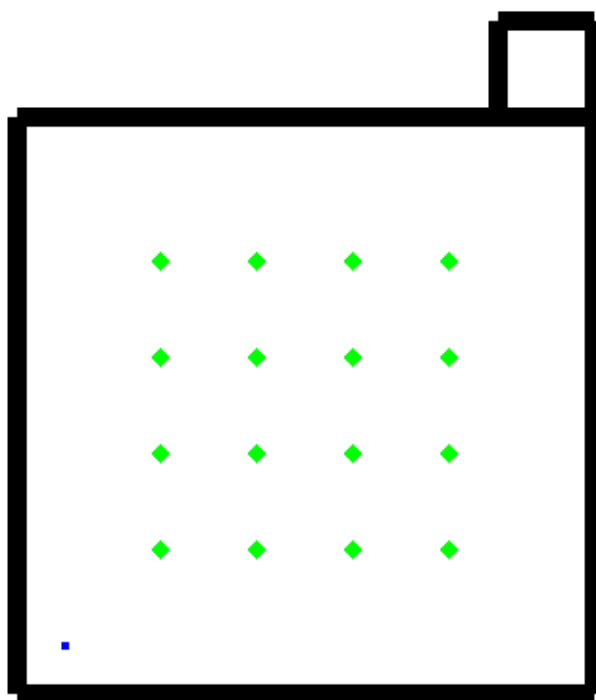


図 3.4 認知症の場合の可視化

に行きたいと感じている状態から実際に排泄を行うまでの時間を計測し、それを総我慢時間とし、本研究の評価指標とする。

3.4 結果および考察

図 3.11 に、介護者・被介護者の割合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。

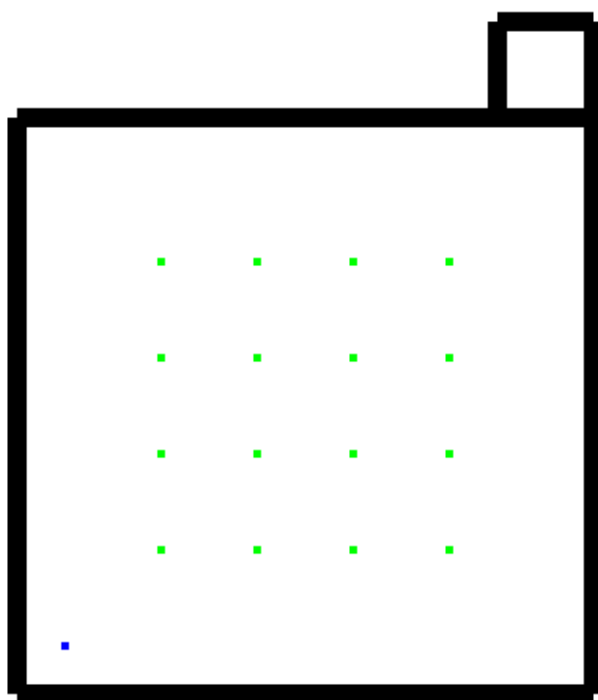


図 3.5 健常者（介護技術を導入した場合の被介護者）の場合の可視化

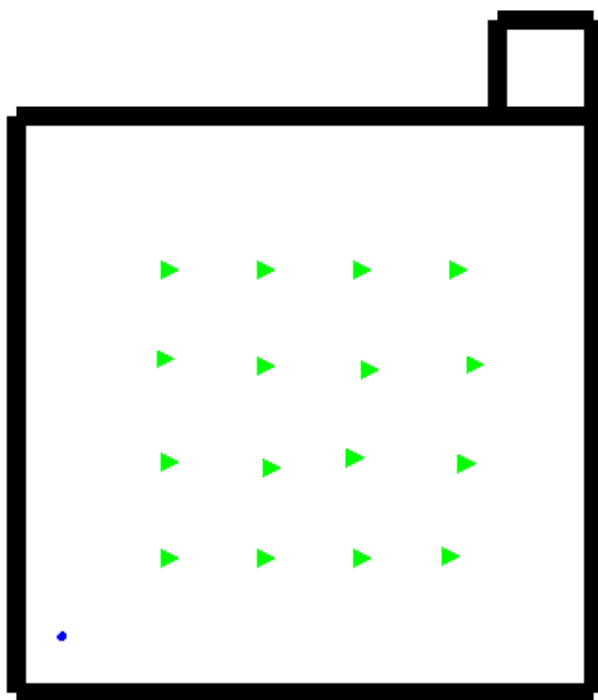


図 3.6 頻尿の場合の可視化

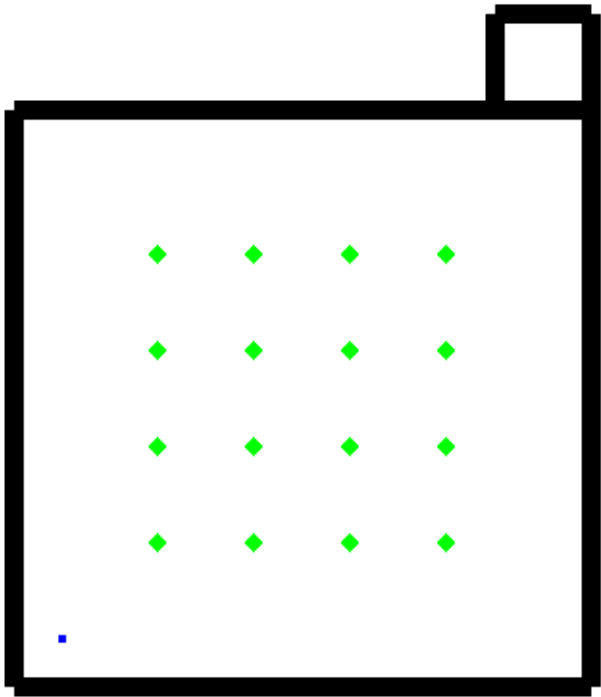


図 3.7 認知症の場合の可視化

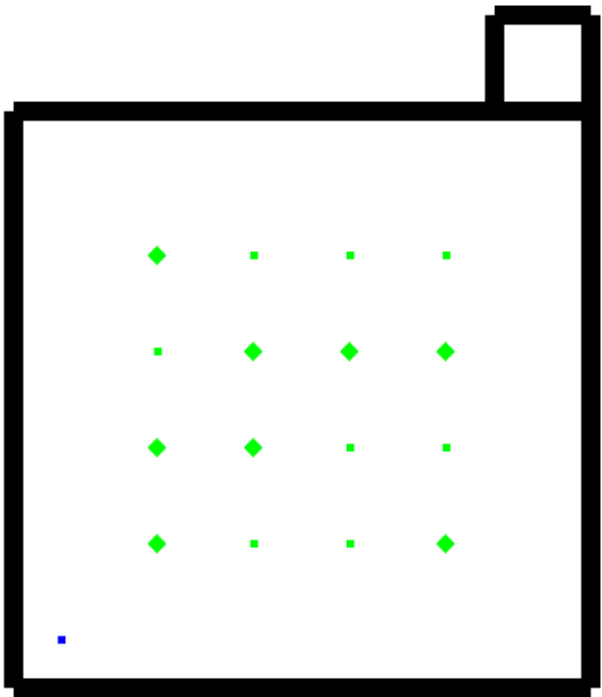


図 3.8 健常者と認知症の場合の可視化

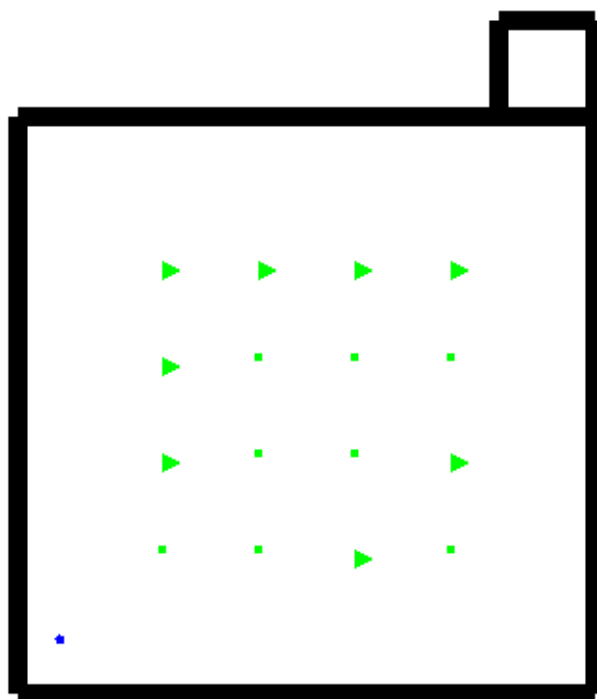


図 3.9 健常者と頻尿の場合の可視化

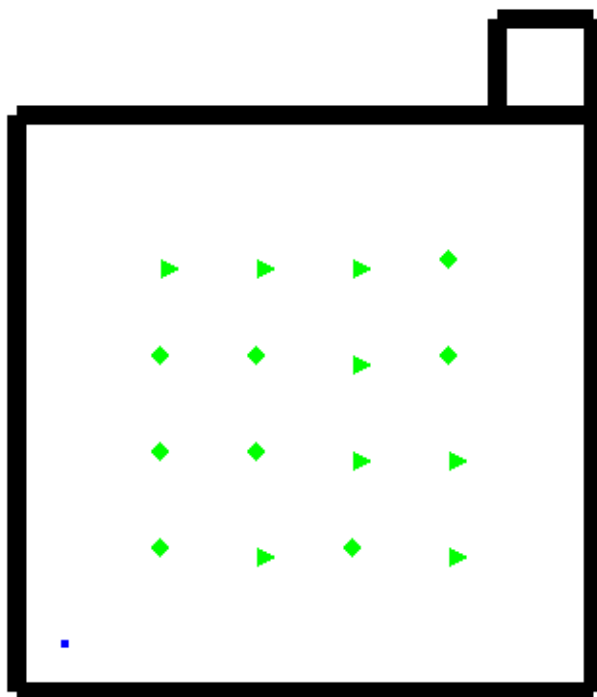


図 3.10 認知症と頻尿の場合の可視化

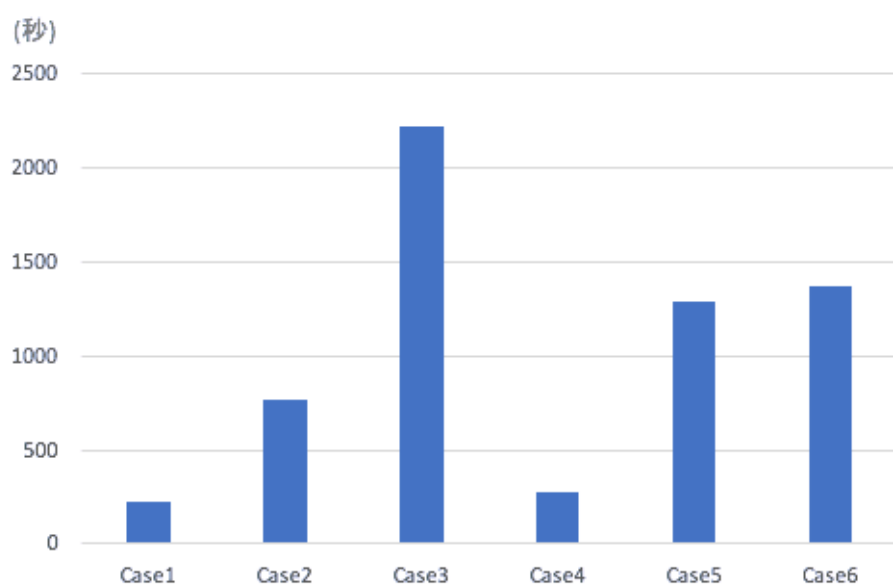


図 3.11 実験結果

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)