

博士學位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	ANDOU Keisuke 安藤 圭祐
学位の種類	博士（経営情報科学）
学位記番号	博 甲 第 48 号
学位授与	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与条件	学位規程第 3 条第 3 項該当
論文題目	マルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決における課題の検討 A Study on Issues in Problem Solving with Multi-agent Simulation
論文審査委員	(主査) 教授 伊藤 暢浩 ¹ (審査委員) 教授 菱田 隆彰 ¹ 准教授 内種 岳詞 ¹

論文内容の要旨

マルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決 における課題の検討 (A Study on Issues in Problem Solving with Multi-agent Simulation)

近年、社会問題に対する解決策の検討手法として、マルチエージェントシミュレーションが注目されている。マルチエージェントシミュレーションは環境に対して自律的に動作する主体をエージェントとしてモデル化し、それらの相互作用を再現する手法である。マルチエージェントシミュレーションを用いることで、個人レベルと全体レベルの両方の目標達成に向けたエージェントの協調行動を検討できる。例えば、感染症シミュレーションでは、ウイルスを媒介する人間とその活動環境をモデル化し、感染拡大を防ぎつつ個々の目的を達成するための協調行動を分析することが可能となる。

しかし、現行のマルチエージェントシミュレーションは、対象とする問題のメカニズムの解明が不十分な場合が多く、再現性や信頼性の確保が課題となっている。それでも、将来予測と対策検討が急務な社会問題に対し、より有効な対策を検討するための実用的なツールとして積極的に活用されている。

マルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決では、次のプロセスの検討が重要である。

- モデル化プロセス：環境とエージェントの持つ情報や振る舞いをどのようにモデル化するか
- 戦略設計プロセス：多数のエージェントをどのように効果的に協調させ、目的を達成させるか
- 評価プロセス：モデルの妥当性や戦略の有効性をどのように評価するか

これらのプロセスの具体的な手法は対象問題の性質に依存する。そのため、一般化された方法論の確立は難しく、実運用においては、多くの課題が存在する。

本研究では、マルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決プロセスにおける課題を明らかにするため、社会的に重要な次の問題に取り組む。

- 地震災害状況に有効な救助戦略の設計：南海トラフ地震等への備えとして、被害の状況予測や対策の検討はわが国の喫緊の課題である。
- 交通事故要因の究明：発生件数は減少傾向にあるものの、依然として多くの人命が日々失われており、効果的な対策のための要因分析が不可欠である。

¹ 愛知工業大学 情報科学部 情報科学科（豊田市）

これらの事例研究を通じて、今後ますます利用されることが想定される、マルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決における課題の抽出に挑戦する。

まず、地震災害状況に有効な救助戦略の設計として、ロボカップレスキューシミュレーションにおける有効な救助戦略を開発し、評価した。ロボカップレスキューシミュレーションは地震災害における救助活動を再現し、マルチエージェントの協調戦略を評価できるベンチマークシステムである。

環境情報を自律的に収集し、適応的に行動する分散型の協調戦略を設計し、実装した。これは災害現場の視界や通信範囲の制限により、エージェントが得られる環境情報が局所的かつ限定的になる状況を考慮したものである。性能評価の結果、提案戦略を実装したエージェント群は、標準的な比較対象エージェント群よりも、効率的な救助活動を達成した。一方で、過剰な建物の倒壊による道路の閉塞など、想定を超える過酷な環境下では、性能が低下することも確認された。この結果は救助戦略の設計において、未知の環境への適応性や頑健性の考慮が重要であることを示している。

次に、交通事故要因の究明として、実際の事故事例を分析した。交通事故は車両や歩行者といった交通主体が道路環境上で起こす現象であり、マルチエージェントシミュレーションによる分析が有効であることが予想される。しかし、交通流シミュレータは存在するものの、交通事故そのものを再現、分析できるマルチエージェントシミュレーションは確立されていない。そこで本研究では、将来的な交通事故のマルチエージェントシミュレーションの実現へ向けたモデル化に関する知見獲得を目指した。

具体的には、まず過去のデータから事故の発生しやすい場所と時空間を表現する事故クラスタを特定するための手法を開発し、既存手法に対する優位性を示した。次に、事故発生地点とその周辺の道路環境属性との関係を分析した。その結果、事故発生地点に空間的な偏りがあることや、その偏りが事故時の違反内容により異なること、正面衝突事故が曲率の有意に大きいカーブ区間で発生しやすいことなどを明らかとした。しかし、利用可能なデータの詳細度には限界があり、事故の発生と要因との因果関係を説明するには至らなかった。これは交通事故の精密なモデル化には、より

詳細かつ多角的なデータの収集、分析が必要であることを示している。

上記の事例研究を通じて、マルチエージェントシミュレーションによる問題解決における課題として、本研究では、次の点を明らかとした。

- 戦略設計における焦点：協調戦略のどのような性質が、対象問題の解決に本質的な影響を与えるかを特定することが重要である。この理解は効果的な戦略の設計において、不可欠である。この性質の発見のためには、さまざまな協調戦略から、それらの影響を分析し、協調戦略の性質と問題との関係を明らかにする必要がある。
- モデル化における限界：現実世界から得られるデータには、量、質、網羅性の限界がある。これは事故が稀な事象であること、センシング技術や導入コストの制約、観測困難な内的要因などに起因する。このデータ限界にいかに対応し、妥当性の高いモデルを構築するかが鍵となる。

本研究では、これら2つの課題を明らかとしたが、モデル化、戦略設計、評価のプロセスは相互に依存し、この連関性を考慮した総合的なアプローチが重要である。例えば、戦略設計で重要となる性質はモデル化に必要なデータの種類やその精度を規定する。また、モデルの妥当性はシミュレーション結果の信頼性を左右し、ひいては戦略評価の正当性にも影響する。このように相互に影響し合うプロセス全体を俯瞰し、整合性を保ちながら、進めることが今後のマルチエージェントシミュレーションによる問題解決において重要である。

本研究で抽出したこれらの課題は特定の応用分野に限らず、マルチエージェントシミュレーションによるさまざまな問題解決において共通して現れるものと考えられる。これらの解決に向けては、シミュレーション技術の高度化に加え、近年発展の著しい深層学習やジェネレーティブAIといった人工知能技術の活用が期待される。

論文審査の結果の要旨

本研究はマルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決における課題を明らかとするため、社会

的に重要とされる「地震災害」「交通事故」の2つの問題の解決に取り組むものである。マルチエージェントシミュレーションは環境に対し、自律的に動作する主体を「エージェント」としてモデル化し、これらの相互作用を再現する手法である。また、これを用いることで都市計画、災害対策、商業戦略等、広く社会システム上で発生する問題と、その解決策を検討できるものとして知られている。近年、さまざまな仕組みのデジタル化に伴い、急増したデータの利活用が行政を中心に促進されている。同手法はこれらのデータを用いた有効な意思決定手段の一つとして注目を集めている。

本研究はこれまでにこなわれてきたマルチエージェントシミュレーションを用いた取り組みから、その流れを、次の段階に分けて、捉えている。

1. モデル化：問題や解決策の表現に、必要な要素や関係を検討し、収集可能なデータに基づき、環境およびエージェントについて、その状態や振る舞いをモデル化する。
2. 戦略設計：問題を効率的に解決するためのエージェントが振る舞いや、複数のエージェント間でなされる協調について検討し、解決策となる協調戦略を設計する。
3. 評価：問題とこれに対処する協調戦略のシミュレーション結果から、構築したモデルの妥当性、問題に対する協調戦略の有効性を検討し、モデルや戦略の質の改善へ繋げる。

一般にマルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決は、その状況をこれらの段階に分けることができる。しかし、各段階で検討すべき内容は対象とする問題により異なる。そのため、この問題解決手法の体系化に関しては、十分に整理されていない。そのため、実運用では、対象の問題に対し、有効な方法を模索するほかないという難しさが存在する。

本研究はこのようなマルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決の適用において、解決すべき本質的な課題を探るものである。そのために、わが国で重要視される「地震災害」「交通事故」という2つの

性質の異なる問題へ取り組んでいる。

地震災害については、令和6年能登半島地震をはじめ、過去の被害を踏まえ、今後起こり得る南海トラフ地震等の大規模震災への備えは重要であり、被害予測とその対策は急務である。また、交通事故については、国際的に重要視される課題であり、国内ではすでに警察によるデータを用いた事故分析や対策検討が進められている。しかし、依然として日々人命が失われていることから、効果的な対策が求められている。本研究はこれらの事例研究を通じ、今後より一層需要が高まることが想定されるマルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決の課題抽出に挑戦したものである。

地震災害に対しては、さまざまな環境に有効な救助戦略を設計した。地震災害はすでにモデル化されたマルチエージェントシミュレーションに、ロボカップレスキューシミュレーションがある。本研究では、同システム上で有効な戦略を提案した。本戦略は現実の災害にある知覚・通信範囲等の制約を考慮している。各救助部隊は周囲の環境情報から、各々取るべき行動を判断し、最小限の通信から、互いに協調する。本戦略は救助戦略の有効性を競う競技会「ロボカップレスキューシミュレーションリーグ2024」で優勝し、優れた能力を有することが示された。

一方、多くの建物の倒壊から通行可能な道路が限られた過酷な環境では、本戦略の性能が十分発揮されないことも確認された。本研究では、この結果から、未知の環境への適応能力を備えた戦略が必要であるとした。この戦略の実現には、問題全体に対する戦略の評価が不可欠である。しかし、このような手法に対する取り組みはまだなく、現行の評価手法は結果の評価に留まる。本研究はこのような評価方法の必要性を明らかとした。

交通事故に対しては、マルチエージェントシミュレーションによる分析が有効であることが予想されるものの、これをモデル化したシミュレーションが存在しない。そこで本研究では、実際の事故事例に関するデータを収集、分析し、モデル化のための知見獲得を目指した。具体的には、事故の発生しやすい時間・場所を特定するための手法を開発し、既存手法よりも高い検出力を持つことを示した。また、

事故地点の空間パターンには偏りがあり、このパターンが法令違反の内容により異なることから、運転者の行動が環境により左右されていることを確認した。さらに、ミクロな分析として、正面衝突事故が発生しやすくなる道路曲率の閾値を明らかにした。

このようにマクロからミクロへと分析の観点を詳細化し、特徴の傾向から発生条件まで、さまざまな事故の特性に関する知見を明らかにした。しかし、利用可能なデータの数や項目には、物理的な限界がある。さらに特定の種類を対象にしたデータ分析では、その数がより少なくなる。そのため、これらの分析結果は信頼性の確保が難しい。精密な交通事故のモデルを実現するためには、事故発生に関連する多角的なデータを継続的に収集し、これを分析する必要があることを示した。

これらの事例研究を通じて、マルチエージェントシミュレーションによる問題解決における課題として、本研究は次の点を明らかにした。

- 問題の核の抽出（戦略設計）：問題全体に共通して存在する、問題解決に強く影響する核となる要素の抽出が重要である。優れた戦略の設計は、この核に対応した協調動作をエージェントに持たせることと対応する。この核の抽出には、さまざまな環境（問題設定）と戦略の組み合わせの中から、シミュレーションを通じ、それぞれの性質間の関係を明確化していくことが必要である。
- モデル境界の形成（モデル化）：観測可能なデータの限界に伴う、モデル境界は妥当なモデルの構築に対する課題である。この解決には、さまざまなデータを収集・結合するだけでなく、そこから導き出される情報を用いた潜在的要素の補完が必要である。また、こうした情報をいかにして導き出すか、というデータとその関係に対する研究が重要である。

本研究では、「地震災害」「交通事故」という社会問題に対する取り組みから、これらの課題を明らかにした。マルチエージェントシミュレーションを用いた問題解決では、モデル化、戦略設計、評価の各段階は互いに依存している。したがって、本研究で明らかにしたこれらの課題は本問題解決手法の全体に関わり、今後、その体系化に向けて、重要なものであるといえる。

以上から、本論文は専門分野の学会等において学術的価値を認められ、その成果は社会的意義が大きく、今後の社会貢献にも寄与するものである。このことから、申請者は専門分野の全般における知識を有し、独立した研究者として評価できる。また、本論文は本学の論文審査項目である「新規性」「進歩性」「有用性」「論理性」「明確性」「信頼性」のいずれの観点においても高く評価でき、これまでの研究の集大成として、博士の称号を授与するのにふさわしい水準に達していると判断する。