

論文の内容の要旨

氏名：柿本 陽平

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：複雑性を有する社会シミュレーションに対する最適化手法の応用に関する研究

社会を模した大規模な空間において、自律した個体が相互作用することにより現れる大域的な動向を再現する手法は、社会シミュレーションとして知られる。一般に社会シミュレーションによりある施策が社会に及ぼす影響や効果を予測したい場合には、シミュレーションの内部状態の多さや、入力次元、入力を取る範囲の広さに複雑性を持たせる。このような予測を目的とした社会シミュレーションに対する代表的な手法である Multi-agent システム(MAS) はコンピュータの発展とともに広く普及してきた。MAS が対象とする複雑性を有する社会シミュレーションでは、シミュレーションを構成する自律した個体の持つ不確実性の影響を考慮し、多数回のシミュレーションにより出力をある程度収束させることが重要である。一方で社会シミュレーションが対象とする空間は基本的に大規模であることから、不確実性の影響を取り除くためには非常に大きな計算コストを必要とする。また、社会に対して検証したい施策が複数ある場合には、その組み合わせにより多数のシナリオが生成される。多数のシナリオの効果を検証するためにはやはり不確実性の影響を取り除く必要があることから、既存の MAS を社会に対する施策効果の予測に用いる場合、計算コストは大きな問題であった。

本研究では、これらの問題を解決すべくいくつかの最適化手法を社会シミュレーションに応用することで、社会を構成する複雑系が内在する不確実性の影響を受けにくく、計算コストを削減するための諸手法を構築する。まず、従来の MAS の信頼性について検討し、その限界を明らかにする。明らかにした限界を解少数ため、MAS を最適化手法の一つである整数計画法が適用できる問題として定式化し、最適解を得ることで施策効果に対して不確実性を内在しない手法の構築を検討する。さらに、一般に特定の事例に合わせて設計する必要がある不確実性を内在する MAS に対して、最適化手法の一つである機械学習を応用し多くの事例に応用可能な施策選定のための枠組みを構築する。また、大規模な空間に対するシミュレーションの予測精度向上のため、点在している小規模な空間における影響を詳細に考慮するための手法について検討する。

第 1 章では本研究の対象となる社会シミュレーションの概要とその歴史について触れ、従来の手法が持つ問題点と本研究の目的について論じる。

第 2 章では、社会シミュレーションにおける伝統的な手法の一つである確率論的なアプローチによる MAS について調査する。そのために先行研究として COVID-19 感染症の感染拡大を再現する MAS によるシミュレーション手法を紹介する。さらに、伝統的な MAS によるシミュレーションの信頼性を検証するため、感染症拡大を表す微分方程式による数理モデルと比較することにより検証する。具体的には初期条件を一致させ、MAS によるシミュレーションの出力、すなわち総感染者数と、微分方程式による感染症拡大モデルとが一致することを示す。それにより両者の類似性を確認し、MAS によるシミュレーションが有効であることを示す。

第 3 章では、交通シミュレーションを題材として整数計画問題による MAS の数理モデルについて論じる。第 2 章で紹介する MAS はシミュレーションの過程で多数の不確実性を含む事象が存在することから、シミュレーション結果に対する一意性が保証されず、多数回の試行による不確実性の排除が必要であった。整数計画問題は解に対する最適性が保証される厳密解法を用いることで、評価関数に対する最適性が保証される。すなわち、不確実性を内在する MAS のように出力の収束性を考慮する必要がない。具体的には道路ネットワーク上で時間駆動する貨物輸送車を MAS における個体と仮定し、個体に対する休憩施設配置モデルを提案する。一般的な貨物輸送車の輸送スケジュールには遅延リスクに対処するためのバッファ時間が挿入される。もし遅延が発生せずバッファ時間が余った場合、バッファ時間は休憩施設によって適切に消化されなければならない。提案する手法は需要が時間駆動するものとみなし、休憩施設の配置と車両がいつ、どこで、どれだけ施設を利用するのか、という輸送スケジュールを同時に与えることを可能にする。実験では日本の首都圏をもとに生成した仮想ネットワークを用いて提案した手法の有効性を検証する。その結果、構築した手法は複雑性に対する表現力は高いが、計算コストの面で大きな問題があること

がわかった。

第4章では、最適化手法の一つである機械学習による社会シミュレーションのための枠組みを構築する。第3章で提案し、整数計画法により定式化されたMASの数理モデルは、入力に対して一意的に出力が定まり施策の最適性を保証するが、膨大な計算コストにより入力に対する複雑性が担保されにくいなどの弱点があった。そこで、複雑性を有する大規模な空間を想定した社会において高速に多数の入力構成に対する出力を予測するための枠組みを提案する。具体的には、社会に対して検証したい多数の施策の中から、効果的な施策を選定するための枠組みを、第2章でレビューしたMASシミュレータと機械学習モデルの一つであるSVRを用いて実現する。また、提案した枠組みにより構築したSVRモデルの予測精度と学習用データセットにおける出力の収束性に着目し、その関係について検証を行った。その結果、提案した枠組みは不確実性に対してロバストで高精度なMAS出力の予測ができることが確認された。

第5章では、大規模な空間に組み込むことを前提とした小規模な空間に対するシミュレーション手法を提案する。小規模な空間の対象としてはある地域に点在する飲食店舗程度の規模を仮定する。すなわち、ここでいう大規模な空間とは居住区や商業地帯、工業地帯を含む地域、小規模な空間とは大規模な空間に点在する施設程度の規模と仮定している。また、小規模な空間において多数の試行により出力をある程度収束させる必要があるような対象を選定する。具体的には、感染症が蔓延する社会を仮定する。感染症拡大の主な原因は屋内におけるクラスターでの感染とされていることから、特に感染が多く報告される飲食店舗を対象としてシミュレーションを行う。また、実験ではシステムが介在しないような飲食店舗の営業と、感染症拡大を予防する目的を持ったシステムを導入した場合の営業を比較する。前者に対するシミュレーションでは、飲食店舗利用者の行動パターンに不確実性が介在するため、入力に対する出力の一意性は保証されない。一方で、後者ではあるルールに基づき利用者の行動を制限することにより、不確実性を排除することで一意性を保証する。

第6章では、第5章に提案したマイクロな空間に対するシミュレーション手法を大規模空間に導入する場合を想定し、どのような地域に対して導入することが有効であるか、検証する。具体的には千葉県習志野市を対象に、人口流動データを用いてカーネル密度推定法により人口分布を推定し、その整合性を検証する。

第7章では、本研究により得られた成果と貢献を総括する。

以 上