

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：(主査) 教授 豊谷 純

(副査) 教授 水上祐治 教授 三友信夫

東京都市大学 教授 高橋弘毅

本論文は人間が構成する複雑系シミュレーションにおける、入力に対する複雑性とその出力の収束性に着目し、現実的に応用可能な社会シミュレーション手法の構築を行ったものである。社会を模したマクロな空間において、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必要な計算コストは非現実的なものであった。また、MAS によるシミュレーションはその対象が、数多くの個体が構成する複雑系から成る空間であることから、個々の事例に併せてモデルを設計が必要であった。

本論文では、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を排除するための諸手法を構築する。また、マクロな空間に点在しているミクロな空間における影響を詳細に考慮するための手法を構築、検証する。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 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。

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。

第 4 章では、社会シミュレーションで対象となる空間に点在するマイクロな空間におけるシミュレーション手法を提案する。通常、社会シミュレーションで対象となるのは居住地域、商業地域、工業地域などを含むマクロな空間である。そのようなシミュレーションの精度を向上させるにはそれぞれの地域に点在する施設内、すなわちマイクロな空間における事象も含むことが好ましい。ここでは、第 2 章同様、COVID-19 感染症流行禍における社会を想定し、感染拡大の大きな原因となる飲食店舗における利用者の相互作用を再現するシミュレーターを開発する。一般の飲食店舗では、店舗利用者の行動に不確実性があることを前提とするが、感染症が蔓延する社会においてはそれが感染拡大の原因となりうるため好ましくない。そこで本章では、店舗営業に一定のルールを介在させ最適化手法を適用することで不確実性を排除し、感染症の拡大を予防するようなモデルを提案する。実験ではミクروسケールな仮想空間に対して提案手法を適用し、単一のパラメータにより店舗の利益損失と感染リスクを抑制できることを示す。

第 5 章では、第 4 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マクロ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、検証した。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、整合性を検証する。

第 6 章では、感染症が蔓延した社会を想定し、感染症予防の施策の効果を高速にスクリーニングするための枠組みを提案する。感染症に対する社会シミュレーションとして代表的な微分方程式による数理モデルは少ない計算コストで試行錯誤的に施策の検証ができるが、複雑性を有する社会を表現するためにはその表現能力に限界があった。また、従来 MAS は複雑性を有する社会シミュレーション手法であるが、計算コストの面で問題を抱えていた。そこでここでは、従来の確率論的アプローチによる MAS と最適化手法の一つである機械学習を組み合わせることにより、ここまで示した手法の弱点を克服し、少ない計算コストで感染症拡大抑制に有効な施策を発見するための手法を提案する。具体的には、あらかじめ MAS により作成した学習用データセットを用いて Support vector regression(SVR) モデルをさせることで、有効な施策を発見するための枠組みを開発し、その有効性を数値実験により検証することで、提案手法の優位性を示す。さらに、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の MAS による出力の収束性について論じる。

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。

この成果は、生産工学、特にマネジメント工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令 和 5 年 2 月 13 日