

特集 「エージェント」

エージェント研究におけるシミュレーション

Agent and Simulation

服部 宏充
Hiromitsu Hattori

京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University.
hatto@i.kyoto-u.ac.jp, <http://hatto.org/>

栗原 聡
Satoshi Kurihara

電気通信大学大学院情報システム学研究科
Graduate School of Information Systems, the University of Electro-Communications.
skurihara@uec.ac.jp, <http://www.ni.is.uec.ac.jp/>

Keywords: agent, simulation, multiagent.

1. はじめに

シミュレーションとは、実際に実験・実行することが困難または危険な事象を、定式化やモデル化し、模倣的に実行することであり、さまざまな場面で利用されている。なかでも、コンピュータシミュレーションは実空間で観測される事象や仮説を、コンピュータの仮想空間上で計算モデル化し実行する技術である。モデル内の変数をさまざまに変化させることによる実空間での模擬実験で実現困難な設定での試行や、地球シミュレータのような詳細なモデル化と計算パワーを利用した気象予測などに見られるように、今やコンピュータシミュレーションは科学技術における中核的なツールとなっている。人工知能研究分野の一つである「エージェント」においても、シミュレーションは重要な手段となっている [Klügl 12]。本稿では、エージェント研究分野のシミュレーションとの関わりを中心に最近の研究をいくつか紹介しつつ、シミュレーションを利用するうえでの課題や、これまでと異なるシミュレーションの新たな活用法に関する話題を紹介する。

2. ABS・MABS

ABSはAgent Based Simulation, MABSはMulti-Agent Based Simulationの略語であり、今日のエージェント研究分野では普通に利用されるキーワードである。エージェント研究分野も、本特集のほかの記事にあるようにその応用範囲は多岐にわたるが、ABS・MABS研究分野はそれらの中でも大きな割合を占めると同時に、いずれの研究分野とも密接な関連がある基盤的な性格を有している。

エージェントに関する著名な国際会議としては、AAMAS (International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems) [AAMAS], IAT

(International Conference of Intelligent Agent Technology) [IAT], および PRIMA (International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems) [PRIMA] などがあり、それぞれにおいてABS・MABSに関する多くの研究成果が報告されている。また、エージェント研究分野よりも裾野が広いシミュレーションに関する国際会議においても、ABS・MABSが重要テーマの一つとなっているものが多い。例えば、シミュレーション系国際会議の草分けであるWSC (Winter Simulation Conference) では、近年、毎回関連するセッションが組まれ、チュートリアルも行われるなど、ABS・MABSとの関連は強い [WSC]。また、毎年開催されている国際ワークショップであるMABS (International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation) は、MABS2013[MABS]で14回目となるなど十分な開催実績も持っている。

国内においても、毎年開催されているJAWS (Joint Agent Workshop and Symposiums: 合同エージェントワークショップ&シンポジウム)において、シミュレーションに関する論文が多数発表されている [JAWS]。

3. マルチエージェントとシミュレーション

エージェント研究は、ヒューマンエージェントインタラクションのように、主として単体のエージェントを研究対象にするものと、交通制御問題や人工市場、ソーシャルメディアなど研究対象が複数のエージェント、すなわちマルチエージェントにて構成されるものに分けられる。双方の研究分野においてシミュレーションは欠くことのできないツールであるが、特に後者においては扱う問題の規模が社会基盤レベルであるものが多いことから、実際に運用しての実験が極めて困難であり、事前の模擬実験であるシミュレーションが必須となる。

3.1 人工市場：U-mart

U-mart プロジェクトは日本を代表する人工市場研究のプロジェクトの一つとして、多くの研究者が参画しており、1998年にその構想が生まれた歴史のある活動である[U-Mart]。その主な研究対象は金融市場の制度デザインで、国際公開実験UMIEシリーズや国内公開実験U-Martシリーズが定期的に開催されている。工学系の教育機関では、プログラム演習の課題として、シミュレーション環境であるU-Martシステムが利用されているなど認知度も高い(図1参照)。

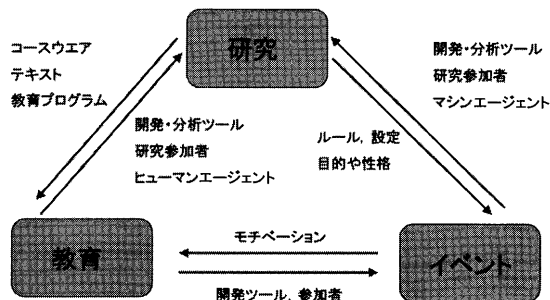


図1 U-mart プロジェクト ([U-Mart] より抜粋)

3.2 高度道路交通システム・スマートグリッド

次世代高度道路交通システム(Intelligent Transportation Systems)構築に関する研究は、カーナビゲーション、渋滞解消問題や信号機制御問題などに関連して、エージェント研究分野においてもさまざまな研究が報告されている[Balaji 07, Bazzan 09, Jan-Dirk 08, Kurihara 09, Oliveira 05]。現在運用されている信号機制御、VICS, およびプローブカーシステムは、基本的に中央制御型のシステム構成であり、東日本大震災にて通信の断絶障害に弱いことや即応性の欠如などが認識され、自律分散制御の有用性が真剣に見直され始めている。

電力系社会インフラも交通システムと同様の問題を抱えており、スマートグリッドに代表されるように、これまでの大手電力会社による一元管理から、一般家庭による発電、電気自動車の活用など、大規模自律分散系にシフトする流れが加速している[Lamparter 10, Vytelingum 11]。

これらの社会インフラ系研究分野においてもシミュレーションは必須である。特に、中央制御型のシステムと異なり、自律分散系ではシステム全体としての挙動を一元的に把握することは困難であるため、マルチエージェントに基づいて自律分散型の社会システムを表現したうえで、シミュレーションによる事前の動作検証を行うことは有用である。

3.3 ソーシャルメディア

Facebook, Tumblr, twitter, Foursquare など, SNS を利用するユーザ数は急激に増加しており、東日本大震災では、リアルタイムな情報配信メディアとしての

twitter が注目された。一方で、デマや流言の拡散という負の部分が指摘されるなど問題点も顕在化してきており、情報拡散のダイナミクスの解析やソーシャルメディアを活性化させるためのメカニズムに関する研究の必要性が高まり、活気づいている。詳細は本特集の山本らの記事にて述べられているが、情報拡散の解析などにおいてシミュレーションは必須である。

4. シミュレーション研究の難しさ

著者らは、マルチエージェントに関連するしないにかかわらず、シミュレーションには大きく二つの側面があると考えている。一つは「模倣」である。模倣型はよりリアルに現実のパラメータを導入することで緻密なシミュレータを構築し、現実の再現を目指す方向性である。例えばフライトシミュレータなど、これまでのシミュレーション研究の多くはこちらに含まれる。もう一つは「創発」である。模倣型では対象とする実問題が理解されていることが前提であり、ゆえに模倣が可能であったのに対して、創発型では対象とする問題の本質を表現するモデル化が目的となる。脳や社会システムなどのモデルを推定する場合、このような多様性のある大規模複雑システムに関しては、実問題から得られるデータにシステムの本質が確実に包含されるとは言い切れず、データからの知識発見を目的とするデータマイニングの技術は十分に力を発揮しない。必要とされるのは、実問題から得られるデータの中からは抽出できないパラメータなどを発見し、対象とする問題にフィードバックすることでモデルの精緻化を行う方法であり、まさに掘るだけでなく、掘っては新しい鉱脈を見つけ、そこを掘ってはまた新しい鉱脈を見つけることの繰返しが必要となる。しかし、現実には、実問題が理解できていない状況であるにもかかわらず、その実問題から得られるデータのみから忠実な模倣を行うことを目的とする研究も少なくないと感じられる。この場合、データに合致する現象が見られるシミュレータが完成し、モデルが推定されたとしても、実問題そのものを理解できたことにはならない。必要なデータのすべてを収集することが現実的に困難であるとするならば、真のモデル化を行うためには構成論的な新しいマイニング手法を確立する必要がある、その際に必要となるのが創発型のシミュレーションであると考えられる。

4.1 現実問題のモデル化

エージェント研究分野が対象とする実問題は、市場経済や交通システムなど、多数の自律行動主体により構成される大規模複雑系が多く、系を構成する各自律行動主体はコンピュータやロボットよりも、「人」であることのほうが多い。よって、これらの問題に対するシミュレーションは創発型にならざるを得ない。ここで問題となるのが実問題のモデル化である。例えば、交通シミュレ

ーションについて考えてみる。近年、次世代の高度道路交通システムの構築を目的とするさまざまな研究が行われているが、モデル化に関する明確なガイドラインは見当たらない。渋滞の生成原理やその解消を目的とするシミュレーション環境を構築する場合、無論、道路と車のモデル化が中心となる。道路については、交差点をノード、道路をエッジとするグラフとして道路ネットワークをモデル化する方法が一般的であるが、複数車線の扱い方や複雑な交差点のモデル化については、統一されたモデル化の様式は確立されてはいない。また、道路ネットワーク上を移動する車の移動のさせ方においても、さまざまな方法が提案されている。カーゲームのように限りなく正確に現実世界を模倣した環境を構築し、車を連続的に移動させる方法から、道路をセルで構成し、車の移動をセルオートマトンとして表現する方法までさまざまである。

§1 交通渋滞問題のためのモデル化

道路を連続した複数のセル、車を個々のセル上を離散的に移動するオブジェクトとしてモデル化する方法は、現実からはかなり乖離しているように見える。ASEPモデルはこのモデル化の著名な例である [Nagel 92]。ASEPモデルでは1列のセルの並びを考える。各セルはそれぞれ“有”と“無”の二つの状態をもつ。すなわち、中に物体を入れることができる容器が1列に並んでおり、容器には中に物体が入っているものと入っていないものが存在する。ここで容器内の中身を一斉に隣の容器に移すことを考え、次の二つのルールを設定する。

- (1) 物体は一方向に対してのみ移すことができる。
- (2) 物体を移す先の容器をすでにほかの物体が占有している場合、物体を移すことはできない。

すなわち、一方向にしか進むことができないために非対称で、かつ一つの容器に二つ以上の物体を入れることができない排他的なモデルである。これを図で表すと図2のようになる。ここで容器の列を道路に、容器の中に入る物体を車に置き換えて考える。まず、車は一般的に道路を逆向きに走行することはないため、一方向にしか進むことができない仮定は自然である。車間距離を開けた走行はこのモデルで再現でき、また前のセルに車が存在する場合に車が動けない状態は、信号あるいは渋滞によって停止している車の様子を表現する。ここで、図2の時間 t における左から7番目と8番目のセルに注目する。この部分では2台の車が集団を形成しており、 $t+1$ では、この集団は左から6番目と7番目のセルに移動している。このような集団はクラスタと呼ばれ、ASEPモデルではクラスタが後方に移動していく様子が観察される。実際の交通渋滞においても渋滞部分は後方に伝わっていく。以上の例のように、ASEPモデルでは、実際の車に近い動きを表現することが可能である [西成 06]。しかし、無論、本来車の動きは連続的であるため、車の速度のように離散的なモデルでは表現が難しい部分がある点については注意が必要である。

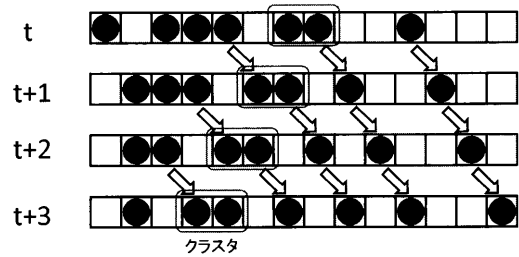


図2 ASEPモデル

§2 運転者としての人のモデル化

4.1節 §1で述べたモデルは抽象度が高く、エージェントの行動のメカニズムは個別性をもたない様なものであった。それに対して、個々の人間の行動に関する特徴や性質を抽出し、それらを反映したより詳細なモデルを構築するアプローチがある。現実からの乖離を抑えながら人間の運転者をモデル化するためには、特定環境下での人間の意思決定、およびその結果として実行した行動に関する情報が必要である。仮定の走行環境を提供するドライビングシミュレータを利用し、以下のプロセスを辿ることで運転者の計算モデル化を行う方法が提案されている [Hattori 11]。

- ドライビングシミュレーションの実施。ドライビングシミュレータでの走行シミュレーションにより、被験者から個々の運転行動ログデータを得る。例えば、図3に示すような、走行速度、加速度、およびアクセル/ブレーキ使用量の推移データが得られる。
- 特徴的な運転行動の特定。収集データから、特徴的な行動がとられた箇所を特定する。専門的知識を要する本作業は、交通工学の専門家と共同で行う。例えば、図3中の楕円マークは、交通工学の専門家が特徴的と認めた箇所である。
- 被験者インタビューによる先験的知識の抽出。被験者にプロトコル分析法に基づくインタビューを実施し、シミュレーションで観測された運転行動の理由・動機を明らかにして、ルール形式の先験的知識として抽出する。具体的には、注視対象、注視による認知内容、認知内容の評価、および行動選択とその選択理由に関する情報を抽出し、特定状況下での運転行動を表す運転行動ルールを得る。
- 観測事象の形式的記述。被験者の観測事象を述語論理に基づき形式的に記述し、モデル構築のための機械的処理を可能にする。例えば以下のような記述が可能となる。

```
if Curve(x) ∧ InSight(x, self) then ReleaseAccel(self)
```

本ルールは、前方にカーブ x があり (Curve(x)), もし被験者 (“self”) の視野にカーブ x が入っていれば (InSight(x , self)), 被験者はアクセルを緩める (ReleaseAccel(self)) ことを表す。なお、ここで定めた述語を用いて、抽出した先験的知識も形式化する。

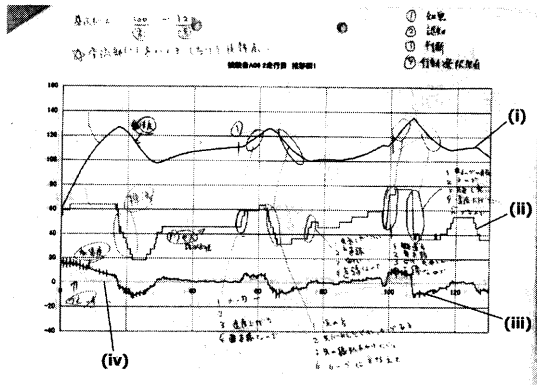


図3 走行ログデータのチャート例 ([Hattori 11]より抜粋)。(i),(ii),(iii),および(iv)は、それぞれ、速度、加速度、アクセルの使用量、およびブレーキの使用量を表す

●先験的知識に基づくモデル構築。形式的に記述された運転行動ルールと観測事象に基づき、被験者の走行を説明可能な運転行動モデルを構築する。具体的なモデルの構築手法として、仮説推論に基づくアプローチが提案されている。詳細は [Hattori 11] に譲るが、仮説推論により、被験者の運転行動を説明可能、かつ周辺環境に対して適用する優先度を割り当てた運転行動ルールの集合を獲得することが可能である。[Hattori 11] では、走行速度の推移に関して人間の運転行動を近似的に再現可能であることが示されている。

5. 新たな取組み

前章で述べたように、創発型のシミュレーションにおいては対象とする問題をどのようにモデル化するのが正解か曖昧で、研究者の経験と知識に依存する部分は依然として大きいのが現状である。一方、近年、新しい着想に基づく取組みが日本から生み出されつつある。

5.1 可能世界ブラウザ

創発型のシミュレーションは、大規模複雑システムをモデル化するための構成論型のアプローチであり、パラメータを変えつつ膨大な試行を繰り返すことでモデルの本質を理解し、その結果を現実問題の制御や理解に活用することが目的である。しかし、これまでの議論にあるように、現実問題のモデル化は容易ではなく、モデル化に基づきシミュレーションを行った研究に対して、「やったらこうなっただけでは？」と揶揄されてしまう例も少なくない。このような状況に対して、和泉らはこの弱点を逆に強みとするような、新たな社会シミュレーションの方法論を提案している [和泉 12]。提案されているのは、シミュレーションで興味ある状況を積極的に再現してしまい、そのとき何が起きているかを調べ、新しいミクロ-マクロ関係を発見しようというアプローチである。可能世界ブラウザでは、実データに基づきモデルを構築し (図4 (a)), シミュレーションによりユーザが興味あるケースを作成する (図4 (b))。そして、作成した

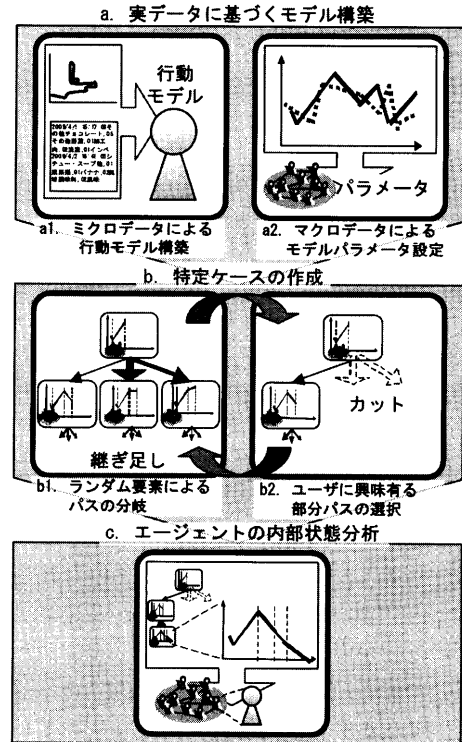


図4 可能世界ブラウザの枠組み ([和泉 12]より抜粋)

ケースに関して、モデルの内部で何が起きていたのかを分析し、そのメカニズムを解明する (図4 (c))。

[和泉 12] では、実際の購買データに基づいたシミュレーションによる購買ターゲットの特定を題材にして、可能世界ブラウザを応用した取組みについて述べられている。まず、「購買人格」という顧客の購買行動を特徴付けるパラメータをエージェントに組み込んだシミュレーションモデルを作成する。ユーザは、条件を変えながらシミュレーションを繰り返し実行し、興味深い結果や、発生自体が稀な結果を生むケースを積極的に作り出す。そして、特定ケースでのエージェントの購買人格の特徴を分析することで、目的の達成に大きく関係している購買人格成分を特定し、その成分の組合せから具体的な消費者像の推定を行うことで顧客ターゲティングにつなげることに成功している。

5.2 構成的情報学の方法論から見たイノベーション

中島らは、イノベーションを起こすための新しい枠組みである FNS ダイアグラムを提唱している [中島 08]。中島らは、イノベーションを起こすための一般論が追求されている状況に対して、絵画や音楽などの革新的な芸術をつくり出すための一般的手法が存在しないのと同様に一般化は不可能であり、特定の要求仕様に対してそれを満たす、その時点で知られている設計・構築手法を超えた手法を発見するための系統的な手続き (アルゴリズム) は存在しないと主張している。この主張において、彼はイノベーションを三つのフェーズ、すなわち「生成」「評価」、および「方向性の絞り込み」の繰り返しで起こる

ものと述べている。「評価」には主として知識、「方向性の絞り込み」には主としてセンスが重要であるが、「生成」の部分にシミュレーションが登場しており、イノベーションを起こす基盤としてのシミュレーションの役割を示唆している。

5.3 大規模化と再現精度のトレードオフ解消の試み

山下らは、避難計画の検証などを目的とする歩行者シミュレーションに関して、大規模シミュレーションの高速計算と歩行行動の再現精度を両立する課題に取り組んでいる[山下 12]。従来の歩行者シミュレーションでは、二次元連続空間モデルやセルオートマトンモデルに基づいた空間表現を採用するものがその多くを占めている。前者については、細かい時間粒度でのシミュレーションは、歩行行動の高い再現精度を期待でき、興味深い現象を創発するが、計算量の増大が避けられない。後者については、歩行行動を比較的素朴な計算モデルで再現することにより、計算量を抑えることが可能だが、再現精度の低下を免れることは難しい。山下らは、一次元歩行者モデルを提案し、計算量と再現精度のトレードオフの解決を試みている。一次元歩行者モデルでは、シミュレーション空間は一種のネットワーク構造として表現され、歩行者は一次元のエッジ上に存在することになる。図5は、同一の実空間を二次元連続空間モデル(a)と一次元歩行者モデル(b)で表現した結果を示している。これら二つのモデルの対比に関して言えば、一次元歩行者モデルでは、二次元連続空間モデルで必要となる近傍歩行者の探索や移動方向の決定などの計算過程が省略でき、より高速な計算が可能となることわかる。

一次元歩行者モデルでは、歩行速度や歩行者間の相互作用をエッジ上の運動として表現する。ゆえに、抽象化された歩行行動を現実の歩行者の動きに近似させるための、モデルのパラメータ設定が新たな課題となる。文献[山下 12]では、二次元連続空間モデルを採用してい

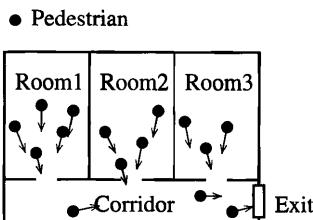
る歩行者シミュレータを利用することで適切なパラメータを効率的に獲得している。ここまでの作業はシミュレーションが提供する仮想空間上で完結するため、実際の有用性が明らかではない。そこで山下らは実空間での避難訓練との比較検証を行い、獲得したパラメータを用いた一次元歩行者モデルに基づくシミュレーションの有用性を評価し、実践的な避難誘導の検証に耐える精度を備えた大規模歩行者シミュレーション実現の可能性を明らかにしている。ところで、この試みは、仮想空間でのシミュレーションと実空間での実験の組合せにより、高精度のシミュレーションモデルを実現するもので、文献[Ishida 09]の参加型マルチエージェントシミュレーションにも通じる。高精度な実行データ獲得の可能性が高まっている昨今、シミュレーションの実用性を確保するアプローチとして、このような試みが活発になるのではないか。

5.4 超大並列計算機環境における MABS

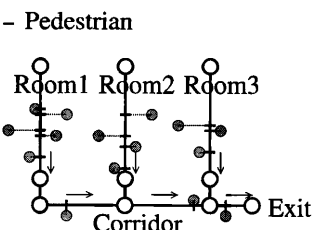
野田らは、社会システムの分析・設計ツールとしてのマルチエージェントシミュレーションの実用化を目指し、超大並列計算機を利用した社会現象シミュレーションの管理・実行フレームワークの必要性を提唱している*1。社会システムの設計で重要となるのは、システム挙動の精緻な予測よりもシステムの挙動が想定範囲内に収まるかを知ること、という視点に立ち、そのために、社会システムのモデルをシミュレーションによって網羅的に調べ上げるためのフレームワークの構築を目指している。

網羅的なシミュレーションは、避難誘導の評価などで行われ始めている。現状のシミュレーション規模は、たかだか十数個のパラメータを組み合わせた数千パターンでのシミュレーションを数百試行実施する数メガのケースを調べる程度である。しかし、モデルの精緻化や対象の拡大によるパラメータ数の増加により、網羅する組合せの数はテラやペタのオーダーにまで増大する。例えば、エージェントが数ステップ先の局面を個々に予測する(つまり先読みする)推論機構をもつ場合には、おのおののシミュレーションにかかる計算量は大きく膨れ上がるだろう。また、シミュレーションの規模は精度や再現される社会システムの挙動に大きく作用し得ることが報告されており、社会システムの設計・分析のシミュレーションには相応のシミュレーション規模が求められる。

スーパーコンピュータ「京」のような超大並列計算機は、状況の網羅性、エージェントモデルの高度化、およびシミュレーションの大規模化の追求で劇的に膨らむ計算量への対処を可能にする力をもっている。ただし、膨大な量のシミュレーション結果を管理・解析し、次に調査すべき設定を決める実験管理を人手で行うことは、現実



(a) 二次元連続空間モデル



(b) 一次元歩行者モデル

図5 歩行者モデルの表現の比較 ([山下 12] より抜粋)

*1 <http://www.postpeta.jst.go.jp/researchers/noda24.html> を参照。本プロジェクトの今後の研究成果に期待したい。

的には困難になる。野田らの取組みには、超大並列計算機を利用した超大規模マルチエージェントシミュレーションのための開発・実行・管理フレームワークを構築する事で、大規模並列計算技術を活かしたシミュレーションの構築を容易にし、多種多様な社会事象を対象とする大規模シミュレーションの実施を促進する事が期待される。

6. ま と め

本稿では、エージェント研究におけるシミュレーション技術との関係について俯瞰した。創発型シミュレーションへの取組みの難しさや、現実問題に関するモデル化の方法論、また、いくつかの新しいシミュレーションへの取組みについて述べた。ビッグデータというキーワードが過度に注目されている状況であるが、容易にさまざまな大量データが入手可能となってきたことは好ましいことではある。しかし、大量のデータが入手できたとしても、そこから有意な情報を抽出できなければ意味がない。情報抽出にはデータマイニングを駆使することになるが、ビッグデータの背景にある実問題が大規模複雑であればあるほど、大量のデータがあろうとも、獲得されたデータにその問題の本質が完全に包含されている確証はなく、創発型のシミュレーションとデータマイニングを効果的に融合された方法論を確立する必要がある。このような問題意識から、本学会で2010年に「データ指向構成マイニングとシミュレーション研究会」が発足しており、さらなるエージェントシミュレーション研究の活性化が期待される。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [AAMAS] AAMAS: *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, <http://aamas2013.cs.umn.edu/>
- [Balaji 07] Balaji, P., Sachdeva, G. and Srinivasan, D.: Multi-agent system based urban traffic management, *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1740-1747 (2007)
- [Bazzan 09] Bazzan, A. L. C.: Opportunities for multiagent systems and multiagent reinforcement learning in traffic control, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 18, No. 3, pp. 313-341 (2009)
- [Hattori 11] Hattori, H., Nakajima, Y. and Ishida, T.: Learning from humans: Agent modeling with individual human behaviors, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-9 (2011)
- [IAT] IAT: *The IEEE / WIC / ACM International Conference*, <http://cs.gsu.edu/wic2013/splash/>
- [Ishida 09] Ishida, T. and Hattori, H.: Participatory technologies for designing ambient intelligence systems, *J. Ambient Intelligence and Smart Environments*, Vol. 1, No. 1, pp. 39-45 (2009)
- [和泉 12] 和泉潔, 池田竜一, 山本仁志, 諏訪博彦, 岡田 勇, 磯崎直樹, 服部 進: 可能世界ブラウザとしてのエージェントシミュレーション, *JAWS2012 予稿集*, pp. 1-8 (2012)
- [Jan-Dirk 08] Jan-Dirk Schmocker, Ahuja, S., Bell, M. G.: Multi-objective signal control of urban junctions -Framework and a London case study, *Transportation Research Part C*, Vol. 16, No. 4, pp. 454-470 (2008)
- [JAWS] JAWS: *Joint Agent Workshop and Symposium: 合同エージェントワークショップ&シンポジウム*, <http://jaws-web.org/event/jaws2013/>
- [Klühl 12] Klühl, F. and Bazzan, A. L. C.: Agent-based modeling and simulation, *AI Magazine*, Vol. 33, No. 3, pp. 29-40 (2012)
- [Kurihara 09] Kurihara, S., Tamaki, H., Numao, M., Kagawa, K., Yano, J. and Morita, T.: Traffic congestion forecasting based on pheromone communication model for intelligent transport systems, *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2879-2884 (2009)
- [Lamparter 10] Lamparter, S., Becher, S. and Fischer, J.-G.: An agent-based market platform for smart grids, *Proc. 9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Industry Track*, pp. 1689-1696 (2010)
- [MABS] MABS: *Int. Workshop on Multi-Agent-Based Simulation*, <https://sites.google.com/site/mabsworkshop/>
- [Nagel 92] Nagel, K. and Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic, *J. Physics I France*, Vol. 2, pp. 2221-2229 (1992)
- [中島 08] 中島秀之, 諏訪正樹, 藤井晴行: 構成的情報学の方法論からみたイノベーション, *情報処理学会論文誌*, Vol. 49, No. 1, pp. 1508-1514 (2008)
- [西成 06] 西成活裕: 渋滞学, 新潮社 (2006)
- [Oliveira 05] Oliveira, de D., Bazzan, A. L. and Lesser, V.: Using co-operative mediation to coordinate traffic lights: a case study, *Proc. 4th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 463-469 (2005)
- [PRIMA] PRIMA: *Int. Conf. on Principle and Practice of Multi-Agent Systems*, <http://prima2013.otago.ac.nz/>
- [U-Mart] U-Mart, <http://www.u-mart.org/html/index-j.html>
- [Vytelingum 11] Vytelingum, P., Voice, T. D., Ramchurn, S. D., Rogers, A. and Jennings, N. R.: Theoretical and practical foundations of large-scale agent-based micro-storage in the smart grid, *J. Artif. Int. Res.*, Vol. 42, No. 1, pp. 765-813 (2011)
- [WSC] WSC: *Winter Simulation Conference*, <http://www.wintersim.org/>
- [山下 12] 山下倫央, 副田俊介, 大西正輝, 依田育士, 野田五十樹: 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用, *情処学論*, Vol. 53, No. 7, pp. 1732-1744 (2012)

2013年4月10日 受理

著 者 紹 介



服部 宏充 (正会員)

2004年名古屋工業大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。2004年日本学術振興会特別研究員(PD)。リバプール大学、マサチューセッツ工科大学客員研究員を経て、2007年京都大学大学院情報学研究所助教授。マルチエージェントシミュレーション、人間行動モデリング、社会システムデザインに興味をもつ。



栗原 聡 (正会員)

1992年慶應義塾大学大学院理工学研究科計算機科学専攻修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。基礎研究所を経て未来ねっと研究所に所属。1998年から慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科専任講師(有期)。現在、同大学環境情報学部非常勤講師。2004年から大阪大学産業科学研究所知能システム科学研究部門准教授。2013年から電気通信大学情報システム学研究科教授。マルチエージェント、ネットワーク科学などの研究に従事。著書『社会基盤としての情報通信』(共立出版, 共著), 翻訳『スモールワールド』(東京電機大学出版局, 共訳)など。博士(工学)。日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 人間情報学会, ACM, ESHIA, 各会員。