

スマート・シティを支える 大規模社会シミュレーション基盤

オープンデータの普及によって、交通、環境、災害など都市のさまざまな問題を解決する上で必要なデータが、リアルタイムかつ膨大に取れる時代が到来しています。本稿では、これらのビッグデータ解析の基盤技術とスマート・シティを支える基盤技術の一つとして、高いスケーラビリティを持つシミュレーション基盤、XAXIS (X10-based Agents eXecutive Infrastructure for Simulation) を解説します。

1. スマート・シティを実現するビッグデータ

近年、交通、環境、災害などに関係する公共データは、政府が積極的に公開を進めています。例えば、アイルランドのダブリン市では Dublinked [1] というウェブ・サービスを立ち上げ、ダブリン市の主要幹線道路の監視カメラからの画像データ、市内の数十箇所の交通量、バスの位置情報データなどを公開し、数分から数十分おきに更新しています。このように政府が保有するデータを積極的にオープンにする（オープン・ガバメントと呼ぶ）ことによって、それらのデータを用いて都市の問題を解決するさまざまなサービスが登場します。これらのサービスを活用することによって、市民、政府、サービス提供者の3者すべてにとって価値のあるエコ・システムを作り出すことができるでしょう。このような動きは、ダブリン市に限らず、世界の主要な都市に広がり始めています。

このようなオープンデータに加えて、ソーシャル・メディアを通じて発信されるデータなど、交通渋滞、環境問題、防犯、災害など都市のさまざまな問題を解決する上で必要なデータが利用可能になり、そのデータ量も爆発的に増大しています。このようなスマート・シティを支える根源となるデータが大規模になり、ビッグデータに昇華する中、都市のさまざまな問題を解決する上でどのようなソフトウェア基盤技術を使っていけば良いでしょうか。

2. ビッグデータ解析で都市の現況を理解する

都市の問題を把握するためには、まず都市の現況を理解する必要があります。それには、交通量観測データ、観測画像データ、そしてソーシャル・メディア・データなどリアルタイムに取得できるデータが活用できるでしょう。また、各種の調査に基づく時系列データも利用できるでしょう。この2種類のデータを解析するソフトウェア基盤として、リアルタイムにデータ処理を実現す

る処理基盤と過去のデータの統計処理や解析処理を行う処理基盤が必要となります。

リアルタイム・データを処理する基盤ソフトウェアとしては、IBM はストリーム・コンピューティングと呼ばれる新たな計算パラダイムを提唱し、IBM InfoSphere Streams という製品を有しています。この製品は、フィルタリング処理、時空間分析、時系列分析などさまざまな分析をリアルタイムに行うことができます。このストリーム・コンピューティングのデータ処理によって、画像データやセンサー・データを用いた交通量観測、災害などの発見を実現します。

また、蓄積された大量のデータに対して高速な解析処理を行う基盤としては、MapReduce などのプログラミング・モデルが主流になり、IBM では、IBM InfoSphere BigInsights の製品の中で実装しています。大量データを蓄えるデータストアとしては、既存のリレーショナル・データベースだけでなく、分散ファイル・システムも重要な役割を果たしており、HDFS (Hadoop Distributed File System) や GPFS (General Parallel File System) などの技術によって大量のデータを複数ノードに分散して格納し、高速な I/O 処理基盤を実現しています。この分散データ処理技術を用いることで、大量のセンサー・データを用いた統計解析や機械学習を高速に実現することができ、人間の行動モデルをはじめとする都市の現状を理解するためのモデリングが可能になります。

3. 都市の将来を予測するシミュレーション

前章で紹介したビッグデータ解析技術は、都市の現在および過去のデータを解析するための技術です。スマート・シティを実現する上でもう一つ重要な役割を担うのが、都市の将来を予測するためのシミュレーション技術です。例えば、車両、人、交通機関などの交通シミュレーションを行うことによって、どのよ

うなことが可能になるでしょうか。

例えば、大規模な災害が発生したときに、東京都にいる 1,000 万人の就労者はどのように行動すれば、無事に帰宅できるでしょうか。都市の状況も時々刻々変化します。例えば、交通機関が麻痺し、徒歩で帰宅するとします。災害から数時間経ち、いくつかの交通機関が復旧したとき、歩き続ける人もいるでしょうが、復旧の知らせと共に公共交通機関を利用する人もいるでしょう。しかし、必ずしも即座に公共交通機関を利用するという選択肢が良いわけではなく、皆が一斉に公共交通機関に乗るといった選択肢を取ることによって、交通機関がさらに麻痺状態に陥ることも考えられます。

都市や交通状況をシミュレーションすることによって、上記のような混乱を予測し、最適な経路へ人々を誘導していくことが可能になります。そのための交通状況のモデリングでは、センサー・データをリアルタイムで受け取り、モデル化している都市データを更新していく必要があります。さらに、これらのデータを基に Hadoop などの基盤ソフトウェアを用いて大規模なデータ処理を行い、統計処理やモデル構築を経て、ストリーム・コンピューティングで実現するリアルタイム処理の補完を行います。次に、このリアルタイムな交通状況のモデリング結果を受けて、この先、何が起きるかを予測するシミュレーションを行っていきます。このシミュレーションは即時性が求められるもので、半日かけて実現できればよいようなものではありません。刻々と変わる 1,000 万人規模の人と都市の状況をリアルタイムに把握し、シミュレーションしていく必要があるのです。このようなシミュレーション技術の高速化は、昨今のビッグデータ解析基盤とは別に、非常に重要な技術です。

これまで 1,000 万人規模の都市全体のシミュレーションを行ったり、リアルタイムの 10 倍以上の速度でシミュレーションを行う技術は存在しませんでした。私たちは、複数の計算機やスーパーコンピューターを用いてこれらを実現するシミュレーション基盤 XAXIS を開発しましたが、次章以降ではこの基盤について解説していきます。

4. 実務応用を可能とする 大規模シミュレーション環境

前章で記述したように、社会、ビジネス、サービスでの活用が期待されるシミュレーションですが、都市計画の実務で使われた例は実は多くありません。この背景としては(エージェント)シミュレーションという技術が複雑適応系の発見的研究に主に使われてきたという歴史的経緯や、実験結果の解釈やモデルの妥当性の保証が簡単ではないことなどが挙げられます。しかし何よりも、実問題の再現に必要な大規模実験に対応できていなかったことが大きな要因でしょう。

オブジェクト指向と相性の良いエージェント・システムの設計にはプログラム言語として Java が好んで使われていますが、あまり工夫せずにスレッドをエージェントに対応させると数千のエージェントしか生成できません。最近ではスレッド・プールに対応した並列化も容易になってきていますが、それでもクラスターやスーパーコンピューターのような大規模分散環境への対応はまだ困難です。

そこで、われわれは大規模分散環境でのエージェント・シミュレーションを可能とするために、分散環境に適したアーキテクチャーを備え、アプリケーションを Java 言語でも記述できる XAXIS フレームワークを開発しました [2]。

図 1 に示すように、この XAXIS 上でエージェント・シミュレーションを実装することにより、アプリケーション・プログラマーは並列性や分散環境を意識することなく、1 台のマシンからクラスター環境、さらにはスーパーコンピューター上での実験が可能となるスケラブルなシミュレーターを開発することができるようになります。XAXIS は、都市から国レベル、そして地球全体にいたるまで、さまざまなスケールのシミュレーションを可能にするシミュレーション基盤です。この XAXIS の有効性は、各種の評価実験によって示されています。

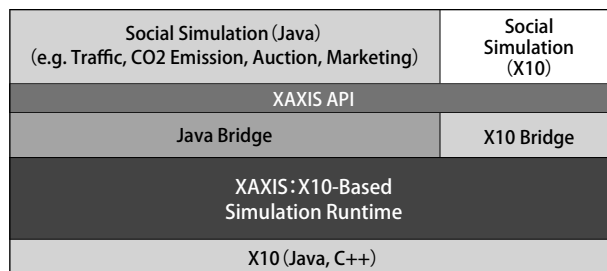


図 1. X10 と XAXIS 上に構築された社会シミュレーター

5. XAXIS 上に構築された 大規模交通シミュレーター

ここでは、XAXIS 上に実装された大規模交通シミュレーター、IBM Mega Traffic Simulator [3] についてご紹介します。IBM Mega Traffic Simulator では、各車両をエージェントとして扱い、各エージェントの行動モデルを実装することによって、都市、国レベルの交通シミュレーションを行います。それぞれの行動モデルに従うエージェントの行動を追跡することにより、道路閉鎖、制限速度変更、信号制御、新道路開設などさまざまな条件の下でシミュレーションを実現することができます。

IBM Mega Traffic Simulator を支える XAXIS フレームワークでは、スレッドを割り当てられ並列実行される単位を定義し、シミュレーションの実行を管理すると同時に、複数ノードでの分散シミュレーション時にはそれらを各ノードへと配置します (図 2)。交通シミュレーションにおいては、交差点がこの並列実行の

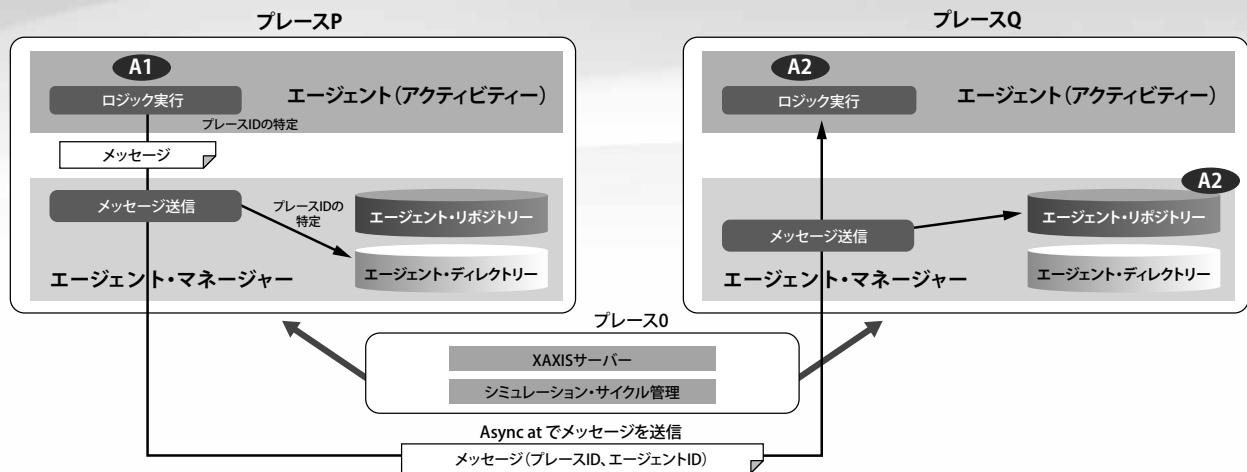


図2. 分散環境における交通シミュレーター

単位となり、交差点に接続する道路上の車両エージェントの挙動を管理し、ログ出力を行います。また、並列実行時には、地理的な特性を生かして、隣接した地域ごとに分割し、そこに含まれる交差点をノードに配置することによって、ノード間の通信を極力抑えています。

車両エージェントはそれぞれ異なる挙動を行えるように経路選択モデル、速度変更モデル、車線変更モデルを持っています。これらのモデルを入れ替えることにより、さまざまな交通特性の試行を行います。

われわれは速度選択モデルとして Gipps の追従速度モデル [4] を用いています。このモデルでは、望ましい巡航速度と加減速のパラメーターを持ち、前方の車両との関係を考慮して速度の変更を行います。前方に車両がない、あるいは十分離れている場合には巡航速度に達するまで加速し、前方に車両がいる場合には、その車両が急ブレーキをかけた場合でも安全に停止できるよう減速します。

また、車線変更モデルは、Toledo などによるモデル [5] を用いています。シミュレーター内の道路ネットワークでは、始点と終点と同じ交差点となる複数の車線ができ、車両は隣の車線へ

と移動できます。隣接する左右どちらかの車線に移動するか移動しないかをそれぞれの車線における前方後方の車両の速度、間隔を基に確率的に決定します。これによって、混雑した車線から余裕のある車線への車線変更が行われますが、その頻度は車両エージェントごとに異なります。

これらの速度変更モデルと車線変更モデルを IBM Mega Traffic Simulator に用いることで、自由走行相と渋滞相に分かれる現実の交通流特性に近い性質を再現できることを確認しました。具体的には、単純な道路ネットワークにおいて、異なる交通量や速度でのシミュレーションを繰り返すことによって、交通量と速度の関係を表す QV 曲線が実際の交通に見られる形状となることを示しました (図3)。

実際のシミュレーションでは、一定領域の交通需要を表す Origin-Destination (OD) 表を基に、出発地および目的地の交差点を当該領域内で確率的に決定し、出発時刻も確率的に割り当てておきます。出発地と目的地の間の経路は、シミュレーター内における所要時間あるいは後で述べる個性によって重み付けされたコストが最小となる経路を各車両の生成時に与えます。

IBM Mega Traffic Simulator は、ある時間内で、このように定められた経路を走行する車両エージェントを生成し、1秒ごとの各ステップにおいて、速度と車線の変更を行います。すべての交差点と道路上におけるエージェントの振る舞いを記録するために、一定時間 (例えば1時間) ごとの各道路の通過交通量や平均速度をログ・ファイルに出力します。

6. データ解析によるモデル・パラメーター自動生成

シミュレーションにおいて、複雑な人間集団の挙動モデルのパラメーターの値を適切に設定することは重要かつ困難な課題です。従来の交通シミュレーターでは、直感的に理解困難な多くのパラメーターの入力を必要とし、その選定がユーザーに任されていた。

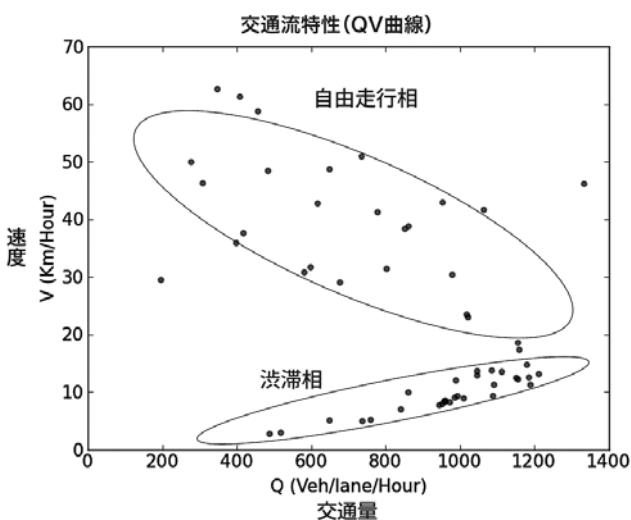


図3. シミュレーションによって得られた交通流特性

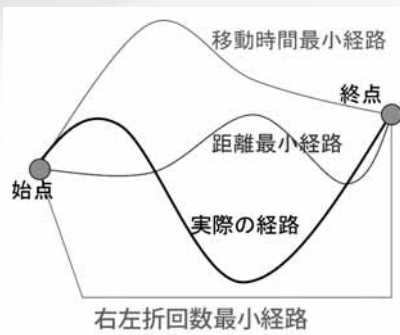


図4. 始点と終点の間のさまざまな経路

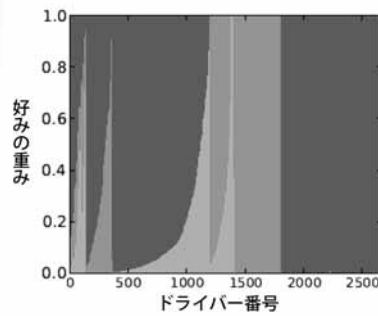


図5. ドライバーが重視するコストの重み

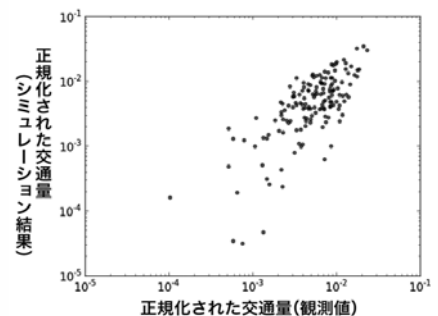


図6. 交通量の比較検証

われわれは東京におけるタクシーのプローブ・カー・データを機械学習技術により解析し、運転行動モデルのパラメータを系統的に推定しました。プローブ・カー・データは、多数の運転手が走行した結果、膨大な位置の時系列情報として存在します。交通シミュレーションにおいてその情報を活用するためには、位置情報を地図上の経路に対応させるマップ・マッチング技術 [6] や、プローブ・カー・データが少ないエリアに関しても存在するデータから所要時間の分布などを推定する技術 [7] が必要となります。ここでは、経路選択における個性推定技術について紹介します。

運転手が経路を選択する際に重要視する要因として、所要時間、距離および右左折回数を考えます (図4)。運転手の個性によって、これらの要因をどれだけ重視するかの重みが割り当てられ、タクシーの運転手が実際に走行した経路から、それぞれの運転手の個性 (重み) を推定しました (図5)。さらに、推定された個性の分布に基づいて、一般のタクシー運転手の個性を推定するモデルを構築しました。一般のタクシーの運転手の個性を推定するモデルを構築しました。

この生成モデルが組み込まれたシミュレーターでは、車両を生成するたびにその個性が、プローブカー・データに基づいて構築された分布に従って、生成されます。今後の複雑なシミュレーションにおいては、大量のエージェント・パラメータはこうしたデータ・サイエンスに基づいて自動生成することが重要になるでしょう。

7. 広島市における実証実験

われわれの IBM Mega Traffic Simulator の有用性を確認するため、広島市道路交通局と共同で実証実験を行いました。まず、IBM Mega Traffic Simulator の出力が現実をどれだけ再現しているか評価するために、広島市の交通センサスで得られた道路交通量とシミュレーション結果を比較します。本章の広島市における交通シミュレーションでは、平成 17 年度のパーソン・

トリップ・データに基づく OD 表を用いています。およそ 200 点における観測交通量とシミュレーションによる通過交通量との相関係数は 0.72 となり、適合度 72% の高い精度が得られました。それぞれの地点での交通量を合計が 1 になるよう正規化し、両対数グラフで散布図を描いたものが図6です。この図からは交通量の多い主要な道路で特にシミュレーションの精度が高くなっていることが分かります。

次に、実証実験として、祇園新道 (図7) における交通規制、および新設される高速道 (広島南道路) の開通による周辺の変化を、シミュレーションによって評価しました。シミュレーションによる評価結果は、交通規制の方法について警察との調整、住民への説明の際に、具体性を持った材料として提示でき、合意を得るために役立ちます。

まず、祇園新道の工事に伴う交通規制についての影響をシミュレーションによって評価しました。図7の地図における白島駅北交差点と城北駅北交差点の間の上下それぞれ3車線道路のうち、下り3車線が工事のため夜間通行止めとなります。残る上り3車線をどのように使用するかを2通りのシナリオで検討しました。一つは、そのまま上り3車線の一方通行道路とするもの (シナリオ1) であり、もう一つはこの3車線を交通整理によって上り1車線、下り1車線に分割し上下共に通行できるようにするもの



図7. 祇園新道付近の地図

(シナリオ2)です。

シミュレーション結果を見たい範囲は限定されていますが、車は周辺からの流入もあるため、広島市全域の道路をシミュレートしました。工事は夜間に行われるため、1日分の交通需要として与えられているOD表から夜間率0.27を用いて、夜間の交通需要を求め、車両エージェントを生成しました。

シミュレーションの実行ログから各道路について通過交通量および平均速度が得られ、ヒートマップとして表現することができました。交通規制を行わない通常時の交通状況とそれぞれのシナリオでの算出結果を図に示しています(図8)。左がシナリオ1、右がシナリオ2です。図8において、矢印の前の数字は通常時の交通量(1時間あたりの通過台数)を表し、矢印の後の数字は通行止め時の交通量を表します。2つのシナリオによる交通規制のシミュレーション結果はどちらにおいても交通量の変化は2倍に抑えられ、通過時間の変化はさらに小さなものとなりました[8]。夜間で交通量が少ないこともあって、2つのシナリオのいずれにおいても、問題となる渋滞は発生しないことがシミュレーションによって予測できました。

次に、広島南道路の開通による影響を評価しました。広島南道路は、国道2号線と広島高速3号線からなり、ほぼ東西に伸びています。現在、広島南道路の西端は吉島出入口まで開通しています。この広島南道路の西端が扇1丁目付近まで延長したときの交通流と現在の交通流をシミュレーションによって比較します。祇園新道と同じく、シミュレーション自体は広島市全域について行いました。また、シミュレーションは昼夜両方を含む時間帯で行いましたが、昼と夜とで交通量(車両数)を変化させています。通勤などのピーク時間を考慮した車両生成も可能では

ありますが、今回はデータが得られなかったため昼夜のみの区別としています。

広島南道路の開通に伴い、特に扇一丁目付近で新規に広島南道路に接続される入り口付近で交通量が増大することがシミュレーションによっても示されました。シミュレーション結果において、広島南道路の延長によって、交通量が10倍以上になる箇所も見受けられます。交通量が顕著に増加すると予測された道路については、その影響についてさらに検討が必要です。一方、広島南道路と並行して東西に伸びる道路や、現在の広島南道路の西端で接続している南北に伸びる道路などにおいては、広島南道路の延長によって、交通量が顕著に減少することが示されました。他の周辺の道路においても、広島南道路の延長による交通量や走行速度の顕著な増減が、シミュレーションによって定量的に示されました。これらの結果は、今後の検討材料の一つとして広島市に提示されました。

今回取り上げたような交通規制や道路の延長は周辺に大きな影響を与えかねないため、十分な事前検討と行政や住民の間での協力関係が重要です。都市交通のシミュレーションを用いることによって、あらかじめ複数のシナリオで影響評価を行うことができ、その評価結果を持って住民への理解を求めることができるようになります。より正確な評価のためには、行政と協力して時間帯ごとの交通需要やその土地での走行データなど十分なデータを収集し、また実際の施策後のフィードバックを得ることが必要だと考えています。今回の広島市における実証実験ではシミュレーションの有用性を示すことができたものと思います。なお、本章で紹介した広島市における2件の実証実験の詳細は[8]に記載されています。

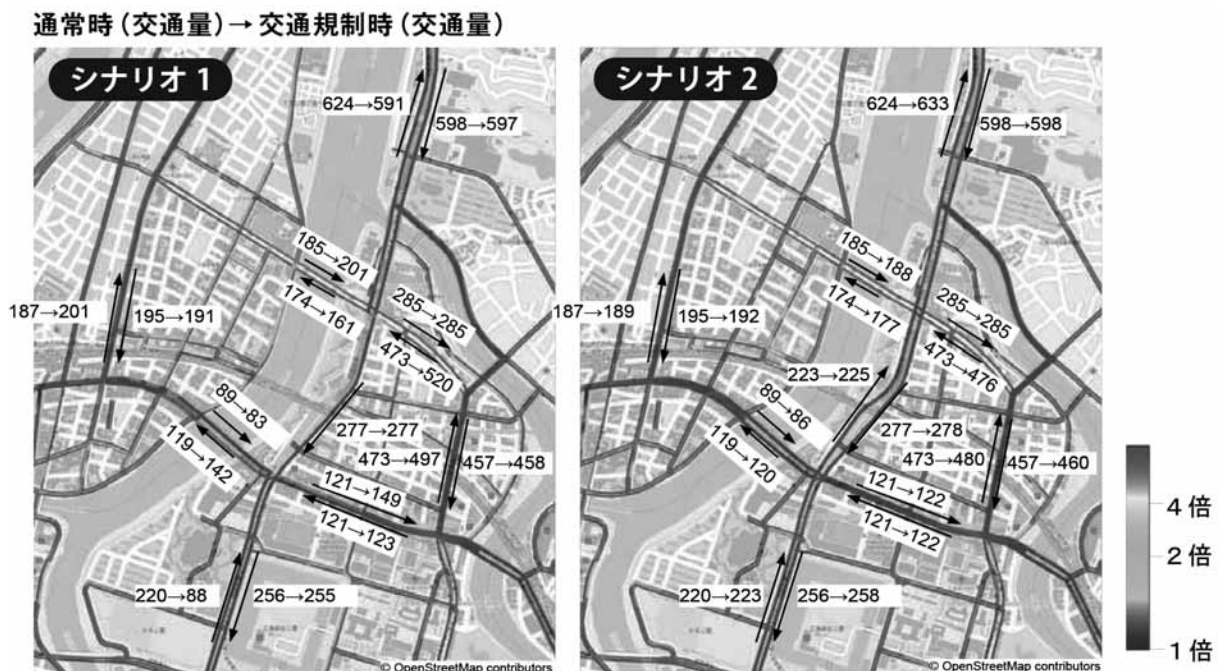


図8. 各道路の交通量の変化(ヒートマップ)

8. まとめ ～シミュレーション基盤の今後～

シミュレーション基盤 XAXIS の応用は、都市計画などの社会シミュレーションだけにとどまりません。XAXIS 基盤を用いれば地球規模のシミュレーションも可能になりますので、例えば、パンデミックなどのような大規模の伝搬シミュレーションを高速に実行することで事前の打開策を打ち出せるようになるかもしれません。また、同様に Twitter などのソーシャル・メディア上の人と人のつながりを XAXIS 上で構築し、そのネットワーク上のメッセージ伝搬をシミュレーションすることができれば、どのような形で情報を発信すれば効率的に伝えられるかなどマーケティング分野へ活用することもできるでしょう。

XAXIS が可能にする大規模シミュレーションは、科学的で定量的な評価手法の適用範囲を大きく広げます。人の直感的な意思決定は、認知バイアスなどの影響によって、しばしば非合理的になることがあります。これまで人の直感に頼らざるを得なかった都市などの複雑なシステムにおける意思決定に際して、XAXIS は科学的で定量的な分析結果の提供を実現し、合理的な意思決定へと導きます。われわれは、これからもこの基盤の研究開発を続け、スマート・シティのさらなる推進を続けてまいります。

謝辞

IBM Mega Traffic Simulator の研究の一部は、科学技術振興機構 CREST および総務省 PREDICT の助成により行われました。

【参考文献】

- [1] Dublinked, <http://www.dublinked.ie/>
- [2] T. Suzumura and H. Kanezashi, "Highly scalable x10-based agent simulation platform and its application to large-scale traffic simulation", 2012 IEEE/ACM 16th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, Dublin, Ireland, 2012/10
- [3] T. Osogami, T. Imamichi, H. Mizuta, T. Morimura, R. Raymond, T. Suzumura, R. Takahashi, and T. Ide, IBM Mega Traffic Simulator, IBM Research Report, RT0896, December 2012.
- [4] P. G. Gipps: "A behavioural car-following model for computer simulation", Transportation Research Part B: Methodological, 15(2), pp.105-111 (1981)
- [5] T. Toledo, M. Ben-Akiva, and H. N. Koutsopoulos: "Modeling integrated lane-changing behavior", Transportation Research Record, 1857 pp.30-38 (2003)
- [6] R. Raymond, T. Morimura, T. Osogami, and N. Hirose: "Map matching with hidden Markov model on sampled road network", Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (2012)
- [7] R. Takahashi, T. Osogami, and T. Morimura: "Large-scale nonparametric estimation of vehicle travel time distributions", Proceedings of the 12th SIAM International Conference on Data Mining, pp.12-23 (2012)
- [8] T. Osogami, H. Mizuta, and T. Ide, "Identifying the optimal road closure with simulation," in Proceedings of the 20th ITS World Congress, Tokyo Japan, October 2013 (to appear) .



IBM 東京基礎研究所 (IBM Research-Tokyo)
アナリティクス&インテリジェンス数理科学
アドバイザー・リサーチャー

鈴木 豊太郎

Toyotaro Suzumura

【プロフィール】

IBM 東京基礎研究所アドバイザー・リサーチャー。2004年東京工業大学大学院 情報理工学研究所博士課程修了。大規模データ処理、大規模グラフ処理、社会シミュレーションなどの分散システムの研究開発に従事。東京工業大学大学院・情報理工学研究所、アイルランド国立大学ダブリン校客員准教授兼務。



IBM 東京基礎研究所 (IBM Research-Tokyo)
アナリティクス&インテリジェンス数理科学
スタッフ・リサーチャー

水田 秀行

Hideyuki Mizuta

【プロフィール】

IBM 東京基礎研究所主任研究員。1997年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。エージェントベース・アプローチによる社会シミュレーションや組織解析、サービス・サイエンスなどの研究に従事。



IBM 東京基礎研究所 (IBM Research-Tokyo)
リサーチ・スタッフ・メンバー

恐神 貴行

Takayuki Osogami

【プロフィール】

IBM 東京基礎研究所リサーチ・スタッフ・メンバー。2005年カーネギーメロン大学計算機科学科博士課程修了。1998年東京大学電子工学科卒業。現在は、人の行動のモデル化と学習、および意思決定の最適化に関わる研究に従事。