

社会的相互作用を考慮した行動モデルの 数値シミュレーション手法の開発

浦田 淳司¹・井料 隆雅²

¹正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: urata@person.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

他者からの相互作用による影響を考慮した行動変化の分析のため、社会的相互作用を導入したモデル分析やパラメータ推定に関する研究は進展しつつある。一方で、アクティビティシミュレーション等により、社会的相互作用を考慮した確率的行動選択は実装されていない。これは、個人の行動選択確率に他者の選択確率が組み込まれた入れ子構造となるため、シミュレーションでローディングする際に、選択確率の算出時間が NP-hard となることに起因する。本研究では、相互作用を考慮した行動モデルの選択確率を近似により非線形連立方程式へと変形することで、多項式時間で求解できることに着目する。実際に、この非線形連立方程式を解くアルゴリズムを示し、収束過程や解の特徴を明らかにする。

1. はじめに

これまでの交通需要予測においては、平常時の出発時刻選択、目的地選択、交通手段選択、経路選択というトリップを表現するための代表的な選択問題を中心に研究が進められてきた。これは、交通ネットワークの計画策定には、定常的な状態を想定し、日々の主なトリップの再現が必要であるからである。一方で、近年、交通計画の対象が広場スケールの空間計画や非マストランジットとなる場合も増え、例えば、道路空間再配分や相乗りサービス、ACC といった施策・サービス・新技術の評価には、従来の代表的な選択問題・従来の予測手法では不十分となりつつある。また、大規模自然災害への備えも求められており、災害直後や復旧期の交通行動は、当然、定常状態を想定した交通行動の予測技術では表現しきれない。

こうした問題の中の一つの論点として、時々刻々と変わる状況における意思決定のモデリング方法が挙げられる。災害避難や復旧期では、意思決定者にはこうした動的な状況下での意思決定が必要である¹⁾。また、日常においても、歩行者の二次元経路選択やドライバーの車線選択、シェアリングサービスの利用選択等では、定常的な状況は存在せず、常に変化しうる状況での意思決定が行われる。動的に状況が変化する主な要因は、周辺他者の挙動自体が動的に変化することにある。上述の選択には他者からの相互作用が働いており^{2),3),4)}、周辺他者の行動・挙動自体が変化すれば、相応の時々

刻々の意思決定が必要となる。つまり、他者からの相互作用を表現することで、こうした動的な意思決定のモデリングの可能性も広がるといえよう。

相互作用のモデリングやその再現方法自体には課題が多い。社会的相互作用を扱ったモデル^{6),5)}のうち、効用最大化モデルを基に他者群の影響(グローバルインタラクション)を評価し、駐輪行動⁷⁾や買い物行動⁸⁾のモデル分析や小規模なネットワークでの1対1の影響(ローカルインタラクション)を考慮した避難開始選択のモデル分析²⁾は存在するものの、数少ない。また、こうした研究も行動分析にとどまっており、相互作用を評価したアクティビティシミュレーションはさらに少ない。筆者の知る限りでは、世帯内の送迎等のスケジューリングがCEMDAP⁹⁾に組み込まれているのみであり、空間的に近くにいる他者等との相互作用を評価したシミュレータはない。

相互作用を考慮した行動モデルの実装が困難となる主な理由として、計算コストの問題がある。ローカルインタラクション型の相互作用モデルを導入した行動選択確率を用いて、アクティビティシミュレータ上でローディングする際には、意思決定者全員の同時選択確率を算出する必要がある¹⁰⁾。その際、最尤となる同時選択確率の算出の計算コストは NP-hard となる。そのため、都市規模のシミュレーションにおいて、インタラクションが広範囲に繋がる相互作用を考慮した計算は難しい。パラメータ推定においても同様の問題が生じるため、大規模なネットワークにおいてローカル

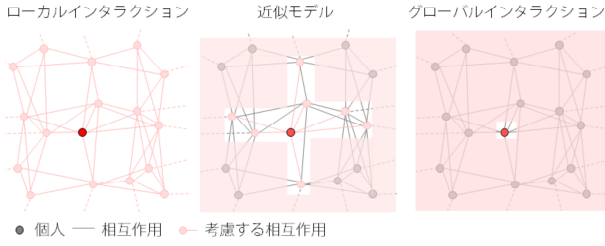


図-1 インタラクションの近似

インタラクション型の相互作用の評価は難しい。

本研究では、動的な意思決定への相互作用モデルの適用を見据え、現実的な計算コストでの相互作用の評価モデルとその計算アルゴリズムを提案する。既存研究¹⁰⁾では、他者との相互作用の近似によって NP-hard の計算コストを多項式時間に減らす定式化が示されているものの、求解アルゴリズムは示されておらず、解の性質も明らかではない。本研究では具体的に、ローカルインタラクションの近似による定式化を用いて、実際に選択確率を導出するためのアルゴリズムを示し、そのアルゴリズムの取束過程と解法の課題を明らかにする。

2. 数値シミュレーションの手法

(1) ローカルインタラクションの近似モデル¹⁰⁾

本節では、浦田ら¹⁰⁾で示した他者相関を近似した際の選択確率の定式化について説明する。まず、ローカルネットワークの近似の考え方を図-1を用いて説明する。図-1は、赤丸で示した個人に対するインタラクションの捉え方のイメージを示している。図左のローカルインタラクションモデル⁶⁾では、接続したインタラクションをすべて評価することで、結果としてネットワークに含まれる全員からの影響を個人の意思決定に反映する。結果として、個人の意思決定の選択確率は互いに従属するため、前述した同時選択確率の算出にあたっての課題が生じる。対して、図右のグローバルインタラクションモデル⁶⁾では、意思決定者以外の選択確率をまとめて評価し、個人の意思決定への影響として反映する。結果として、1対1のインタラクションを評価する枠組みと同様となり、求解可能である。図中央の近似モデルにおいては、他者の選択確率は独立した個人の選択確率を定義する。個人の選択確率には、直接リンクする他者の影響は反映されるが、それ以外の他者については明示的には反映されない。

次に、具体の式展開について説明する。ここでは、情報統計力学における確率伝搬法のアプローチ^{11),12)}を援用している。まず、ネットワーク上でリンクをもつノード i, j に関するポテンシャル関数 $W_{ij}(a_i, a_j)$ によ

り真の同時確率 $P(\mathbf{a})$ を

$$P(\mathbf{a}) = \frac{\prod_{ij \in B} W_{ij}(a_i, a_j)}{\sum_{\mathbf{z}} \prod_{ij \in B} W_{ij}(a_i, a_j)} \quad (1)$$

と定義する。なお、行動主体 $i (1 \leq i \leq N)$ の選択を a_i とし、全主体の行動選択の結果を \mathbf{a} とする。また、 B は全リンクの集合であり、 $\sum_{\mathbf{z}} = \sum_{z_1} \cdots \sum_{z_i} \cdots \sum_{z_N}$ である。次に、試行確率関数 $Q(\mathbf{a})$ を導入し、その周辺確率分布は、

$$Q_i(a_i) \equiv \sum_{\mathbf{z}} \delta_{a_i, z_i} Q(\mathbf{z}) \quad (2)$$

$$Q_{ij}(a_i, a_j) = Q_{ji}(a_j, a_i) \equiv \sum_{\mathbf{z}} \delta_{a_i, z_i} \delta_{a_j, z_j} Q(\mathbf{z}) \quad (3)$$

とする。なお、 δ_{a_i, z_i} は $a_i = z_i$ のときのみ 1 となるクロネッカーのデルタである。試行確率 $Q_i(a_i)$ は、他のノードの周辺確率分布に対して独立している。この試行関数 Q について、カルバック・ライブラー情報量 $KL(Q||P)$ (以下、KL) を導入する。

$$KL(Q||P) = \sum_{\mathbf{z}} Q(\mathbf{z}) \ln \frac{Q(\mathbf{z})}{P(\mathbf{z})} \quad (4)$$

また、 $Q(\mathbf{a})$ を周辺確率分布を用いて、

$$Q(\mathbf{a}) = \left(\prod_{i \in \Omega} Q_i(a_i) \right) \left(\prod_{ij \in B} \frac{Q_{ij}(a_i, a_j)}{Q_i(a_i) Q_j(a_j)} \right) \quad (5)$$

という形に制限する。これは、 $Q(\mathbf{a})$ が個人の生起確率 $Q_i(a_i)$ と二者の同時生起確率 $Q_{ij}(a_i, a_j)$ のみで表現できるという仮定の上で、成り立つ。これらを確率の総和が 1 になる制約、同時生起確率 $Q_{ij}(a_i, a_j)$ と生起確率 $Q_i(a_i)$ の関係を制約とし、ラグランジュ未定乗数法を用いて展開し、次の選択確率が得られる。

$$\hat{Q}_i(a_i) = \frac{1}{Z_i} \prod_{i' \in c_i} \lambda_{i' \rightarrow i}(a_i) \quad (i \in \Omega) \quad (6)$$

$$\hat{Q}_{ij}(a_i, a_j) = \frac{1}{Z_{ij}} \left(\prod_{i' \in c_i \setminus (j)} \lambda_{i' \rightarrow i}(a_i) \right) W_{ij}(a_i, a_j) \times \left(\prod_{j' \in c_j \setminus (i)} \lambda_{j' \rightarrow j}(a_j) \right) \quad (ij \in B) \quad (7)$$

となる。なお、規格化定数 Z_i, Z_{ij} は、

$$Z_i = \sum_{z_i} \prod_{i' \in c_i} \lambda_{i' \rightarrow i}(z_i) \quad (8)$$

$$Z_{ij} = \sum_{z_i} \sum_{z_j} \left(\prod_{i' \in c_i \setminus (j)} \lambda_{i' \rightarrow i}(z_i) \right) W_{ij}(z_i, z_j) \times \left(\prod_{j' \in c_j \setminus (i)} \lambda_{j' \rightarrow j}(z_j) \right) \quad (9)$$

である。ここでは $\lambda (> 0)$ は未定乗数法を用いた際の未定乗数から定義され、解となる確率 $\hat{Q}_i(a_i)$ を得るための未知変数であり、その数は $|B||a_i|$ である。この λ は、

$$\lambda_{j \rightarrow i}(a_i) = \frac{Z_i}{Z_{ij}} \sum_{z_j} W_{ij}(a_i, z_j) \prod_{j' \in c_j \setminus (i)} \lambda_{j' \rightarrow j}(z_j) \quad \forall i, j \quad (10)$$

で示される $(\lambda_{j \rightarrow i}(a_i))$ と同数の) 非線形連立方程式を解くことで得られる。

次に、前述の式展開の元となる同時確率の式 (1) とローカルインタラクションモデルの確率選択の対応を説明する。ローカルインタラクションモデルでは時刻 t における個人 i の選択肢 a の効用 V を

$$V(a_{it}, \mu_{it}(a_{-it}), \epsilon_{it}(a_{it})) = u(a_{it}) + S(a_{it}, \mu_{it}(a_{-it})) + \epsilon_{it}(a_{it}) \quad (11)$$

と社会的効用 S 、個人効用 u 、誤差項 ϵ を用いて定義する。なお、 $\mu_{it}(a_{-it})$ は i 以外の他者の選択を表す。社会的効用 S は、

$$S(a_{it}, \mu_{it}(a_{-it})) = -E_n \sum_{j \in c_{it}} J_{ijt}(a_{it} - a_{jt})^2 \quad (12)$$

となる。 J_{ijt} は個人 ij 間の影響の重み、 c_{it} は個人 i が影響を受ける周辺他者の集合である。ここで、社会的効用は自分と(相関を持つ)他者の行動選択に差異がある場合に生じる不効用である。個人 i が出発を選択する確率 P_{it}^{st} は、誤差項に i.i.d ガンベル分布を仮定すれば、

$$P_{it}^{st} = \frac{\exp(u_{it}^{st} + S(st_{it}, \mu_{it}(no_{-it})))}{\exp(u_{it}^{st} + S(st_{it}, \mu_{it}(no_{-it}))) + \exp(u_{it}^{no} + S(no_{it}, \mu_{it}(st_{-it})))} \quad (13)$$

となる。なお、周辺他者 $j(j \in N_{it})$ と選択結果が異なることの期待値は他者 j が異なる選択を行う確率 P_{jt} と等しいとしている⁶⁾。この際、式 (12)(13) より、

$$W_{ij}(a_i, a_j) = \frac{\exp\left(\frac{u_i^{a_i} - J_{ij}(a_i - a_j)^2}{|c_i|}\right) \exp\left(\frac{u_j^{a_j} - J_{ji}(a_i - a_j)^2}{|c_j|}\right)}{\exp\left(\frac{u_i^{a_i} - J_{ij}(a_i - a_j)^2}{|c_i|}\right) + \exp\left(\frac{u_j^{a_j} - J_{ji}(a_i - a_j)^2}{|c_j|}\right)} \quad (14)$$

とポテンシャル関数 $W_{ij}(a_i, a_j)$ を定義すれば、ローカルインタラクションモデルの選択確率式 (13) は、式 (1) と同様の形式により表現できる。

(2) 求解の方法

a) アルゴリズム

非線形連立方程式の求解アルゴリズムとして、最も単純な反復法を適用する。まず、(10) 式の差分を

$$f_{ij}(\lambda) = \lambda_{j \rightarrow i}(a_i) - \frac{Z_i}{Z_{ij}} \sum_{z_j} W_{ij}(a_i, z_j) \prod_{j' \in c_j \setminus (i)} \lambda_{j' \rightarrow j}(z_j) \forall ij \quad (15)$$

と置く。これを用い、 $\mathbf{f}(\lambda^*) = \mathbf{0}$ となる λ^* を求める。具体には、 $\|\mathbf{f}(\lambda^k)\|$ を最小化する微分方向への更新を繰り返すため、

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha_k \frac{\mathbf{d}^k}{\|\mathbf{d}^k\|} \quad (16)$$

$$\mathbf{d}^k = -\left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda^k}\right)^{-1} \mathbf{f}(\lambda^k) \quad (17)$$

により、 $k+1$ 回目の更新を行う。なお、 α_k は線形探索の結果から得られる正のパラメータである。ただし、 $(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda^k})$ は \mathbf{f} のヤコビアン行列であり、本研究では BFGS

公式を用いて算出する。最終的には、 $\|\mathbf{f}(\lambda^k)\| < H$ と $\mathbf{f}(\lambda^k)$ が十分に $\mathbf{0}$ に近づいた段階で更新探索を終了する。閾値 H は 0 に十分近い正の値とする。また、条件 $\lambda > 0$ を明示的に考慮しておらず、また、 $\lambda = \mathbf{0}$ は解となってしまふ。 $\lambda = \mathbf{0}$ を解として得ることを避けるため、ある $\lambda_{j \rightarrow i}(a_i)$ で式 (15) を割り、かつ $\lambda^0 > 0$ となる初期値を与え、更新探索を行う。

対象とする問題は非線形連立方程式の求解であり、問題は明らかに非凸であるため、局所解回避のアルゴリズムが必要である。つまり、式 (16)(17) の更新探索過程のみでは、局所解に陥った場合に抜け出すことができない。局所解を抜け出すための工夫として、メタヒューリスティクス¹³⁾における改悪解を許す焼きなまし法と反復局所誘導探索法の考え方を援用する。具体には、 k 回目までの最小の $\|\mathbf{f}(\lambda^k)\|$ の値 \mathbf{f}_{\min}^k を $k+K$ 回目までに更新できなかった場合は、局所解に陥っていると判断し、最急降下方向 \mathbf{d}^{k+K} 以外の方向に λ^{k+K+1} を移動させる。これにより、一旦、 $\|\mathbf{f}^{k+K+1}\|$ は増加するが、この後の更新過程において局所解を離脱しうる。また、移動先は乱数を用いて決定し、移動幅 $\|\lambda^{k+K+1} - \lambda^{k+K}\|$ の最大値は \mathbf{f}_{\min}^k に応じて、小さくする。これは、 \mathbf{f}_{\min}^k が小さい場合は、近傍に解があると想定するためである。一方で、改悪を許した更新過程を行っても \mathbf{f}_{\min}^k が更新できなかった場合は、 $\lambda^{k+A} = \lambda_{\min}^k$ とし、一旦、最小値を記録した λ_{\min}^k に λ を戻し、更新探索過程を再開する。つまり、 $A(> K)$ 回の更新探索を行っても最小値を更新できなかった場合は、改悪を許す乱数更新を用いた更新が有効に機能しなかったと判断し、元の最小解の近傍を探索する。

b) 複数解の問題

求解アルゴリズムにより局所解を回避し、 $\|\mathbf{f}(\lambda^k)\| \approx 0$ を満たすある λ^k を得ることができる。ただし、非線形連立方程式は複数解(最大で $|B||a_i|$ 個)をもちうるため、得られた解はその解の一つに過ぎない。一方で、本研究で対象としている動的な意思決定過程における選択確率は一つあれば充分である。そこで、動的な意思決定過程においては、前時間帯の確率を初期値としてインプットし、当該時間帯の確率を求解すればよいと考える。これにより、前時間帯の近傍にある解を得ることができ、確率の妥当な推移を得ることができよう。なお、この場合においても、最初の時間帯における初期値の与え方については、課題が残る。

3. 数値計算

ここでは、求解アルゴリズムの動作検証のため、簡易な設定での数値計算を行う。数値計算は、5 人の意思決定者の二肢選択(出発有無)を対象とする。5 者間の

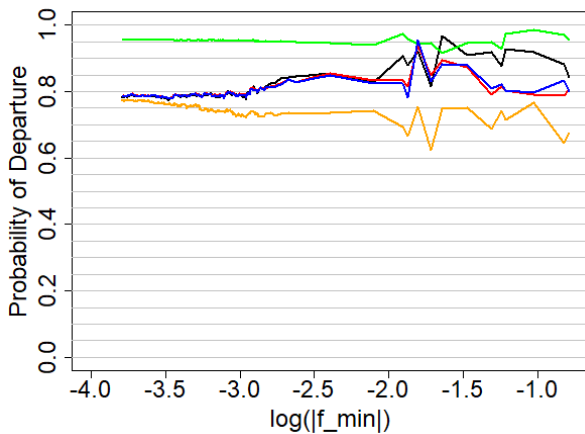


図-2 探索更新過程における選択確率の推移

相互作用のネットワークは完全ネットワークとする。ポテンシャル関数 $W_{ij}(a_i, a_j)$ と初期値 λ^0 は区間 $[0, 1)$ の連続一様乱数により与える。

図-2 は更新探索過程における選択確率の推移を示す。縦軸が出発選択の確率を示し、横軸が $\|f_{\min}\|$ の常用対数値を示している。実線が各個人の選択確率の推移を示している。更新過程が進むにつれて、 f_{\min}^k は小さくなる。このケースでは、 10^{-4} 程度まで小さくなることが確認できる。ポテンシャル関数や初期値の与え方により、同程度の繰り返し計算を繰り返しても、 $\|f_{\min}\|$ の値は $10^{-3} \sim 10^{-5}$ と幅があった。図の選択確率の推移をみると、このケースでは $10^{-3.5}$ 以下では変化は小さい (0.01 程度) となっているが、実際に、閾値 H の設定は難しい。 H が大きすぎれば、 λ^* の近傍ではない、局所解の近傍を解としてしまうという問題もあるためである。なお、線形探索の範囲 α を大きくとらなければ、乱数による改悪を許した移動の影響は小さく、ポテンシャル関数や初期値が同じ場合は同じ選択確率を得られることを数値計算で確認した。

4. おわりに

本研究では、動的な意思決定モデルにおいて、周辺他者の行動が個人の意思決定に影響を与えることを念頭に、他者との相互作用を評価する現実的なモデルを構築した。従来のローカルインタラクションモデルは同時生起確率を用いるため、シミュレーション計算の際のローディングには適用できない。そこで、個人ごとに独立な生起確率を算出できる相互作用の近似モデルを用いて、選択確率を計算するアルゴリズムを示し、実際にアルゴリズムを実装し、解の特性を明らかにした。ただし、課題として、ローカルインタラクションモデルで求めた場合の真の確率との比較や動的な過程で

の解の推移を明らかにする必要がある。また、大規模なネットワークにおける計算適用のためには、高速に $\|f\|$ を最小化する効率的なアルゴリズムが必要である。

謝辞：本研究の一部は、「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発（文部科学省）」の重点課題 (3) 「地震・津波による複合災害の統合予測システムの構築」のサブ課題 B 「統合的予測のための社会科学シミュレーションの開発」の一環として実施された。

参考文献

- 1) 浦田淳司, 羽藤英二, 柳沼秀樹: 将来効用の動学的異質性を考慮した避難開始選択モデルの構築, 土木学会論文集 D3, Vol. 72, No. 4, pp.261-277, 2016.
- 2) 浦田淳司, 羽藤英二: 豪雨災害時の避難開始選択における他者避難と人的ネットワークの影響評価, 土木学会論文集 D3, Vol. 73, No. 1, pp. 24-39, 2017.
- 3) 羽藤英二, 北川直樹, 原祐輔: 移動空間における歩行者と自動車の動的相互作用とそのモデル化, 第 30 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.341-344, 2010.
- 4) 伊藤篤志, 柳沼秀樹, 羽藤英二: 構造推定を援用した車線変更相互作用モデルの推定, 第 34 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 615-620, 2014.
- 5) 力石真, 瀬谷創, 福田大輔: 社会的相互作用に着目したミクロ計量経済分析の展開と土木計画への応用可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol. 53, CD-ROM, 2016.
- 6) Brock, W. A., Durlauf, S. N.: Interactions-based models, Handbook of econometrics, Vol. 5, pp. 3297-3380, 2001.
- 7) Fukuda, D., Morichi, S.: Incorporating aggregate behavior in an individual's discrete choice: An application to analyzing illegal bicycle parking behavior, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, No. 4, pp. 313-325, 2007.
- 8) 力石真, 西川文人, 瀬谷創, 藤原章正, 張峻屹: 近隣住民間の社会的相互作用を考慮した買物目的地選択行動のモデル分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 72(5), pp. I595-I605, 2016.
- 9) Bhat, C. R., Goulias, K. G., Pendyala, R. M., Paleti, R., Sidharthan, R., Schmitt, L., Hu, H. H.: A household-level activity pattern generation model with an application for Southern California, *Transportation*, Vol. 40(5), 1063-1086, 2013.
- 10) 浦田淳司, 河瀬理貴, 井料隆雅: 日間・他者間依存性を考慮した滞在時間分布モデルによる動的交通需要の生成, 第 55 回土木計画学研究発表会, No. 18-01, 2017.
- 11) 田中和之: 確率モデルによる画像処理技術入門, 森北出版, 2006.
- 12) 田中和之: ペイジアンネットワークの統計的推論の数理, コロナ社, 2009.
- 13) 久保幹雄, J. P. ベドロソ: メタヒューリスティクスの数理, 共立出版, 2009.

Development of Numerical Simulation Method for Behavioral Model considering Social Interaction

Junji Urata, Takamasa Iryo