

時間制約下の遷移確率に着目した 複数目的地選択肢集合の生成手法

福山 祥代¹・羽藤 英二²

¹正会員 独立行政法人都市再生機構 (〒 163-1382 東京都新宿区西新宿 6-5-1)

E-mail: sachiyo.fukuyama@gmail.com

²正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、時間制約下で駅を出発して複数の目的地を訪れ駅に戻る一連の目的地選択について、全体行程の効用を考慮しながら逐次的に選択を行う動的な意思決定過程のモデルを構築するとともに、この場合の選択肢集合について、選択段階の経過に伴う残り時間の減少とこれによる空間的制約条件の変化を考慮した生成手法を提案する。時間制約下での各選択段階におけるトリップの目的地の選択確率は、1つ前のトリップの目的地と残り時間により定まる遷移確率をもつマルコフ連鎖により表され、これを用いて列挙を行う。残り時間の推移を決める移動時間と滞在時間の分布はプローブパーソンデータ等の観測データを用いて設定する。

Key Words: destination choice, trip chain, time-space prism, dynamic structural models

1. はじめに

歩行者の利用を想定する都市空間の整備計画を検討する上で、歩行者の行動特性を客観的かつ具体的に把握し、これに基づき整備目標に対する計画内容の効果を評価することが重要である。しかし、実務においては、歩行スケールの空間整備において定量的な分析・評価を行っている例は少なく、また従来の空間解析手法は近接性や連続性を指標にするものが中心で、人の行動特性との関係が明確になっているものは少ない。都市空間上の歩行者行動に関する数理的な分析と空間評価の手法の整備が必要な状況にある。

一方、歩行者の詳細な行動を分析するためのデータ環境は整いつつある。パーソントリップ (PT) 調査など従来の交通行動調査はゾーン単位で集計されており、通常歩行により移動する 1km 以内程度のスケールでの具体的な行動は把握することができない。このため既往研究における歩行者行動分析は、個別のアンケートや追跡調査、定点カメラでの録画等によりデータ収集を行う場合が大半であり、収集できる行動の量や範囲、移動軌跡の情報に限界があった。しかし現在、GPS 機能付きの携帯端末の普及など、位置情報の取得・記録環境は既に整備されており、今後歩行者行動解析に適用可能なオンラインデータが利用可能になることも予想される。このような状況を踏まえ、個人ごとの移動に関する詳細な位置・時刻を把握できるプローブパーソン (PP) 調査データを用いた歩行者行動分析手法につ

いて提案する。

本研究では、歩行スケールの都市空間での歩行者行動を決める一要素である目的地選択を対象に、行動特性を分析するためのモデルの提案を行う。例えば駅を中心にした市街地の活性化方策を検討するような場合には、駅を起点とする歩行者の活動範囲の広がりやその発生パターンが興味の対象となり、現状の把握に加えて、施策による空間の変化が行動にもたらす変化を予測することが最終的な目標となる。このとき、活動範囲を決定する目的地は、駅を出発してから最終的に駅に戻るまでの間に複数選択され訪問される場合も多く見られる。さらに、散策自体を目的にする場合を除き、前後のスケジュール等により予め決められた制約時間の中で、訪問により達成したい目的を予め設定し、設定した個々の目的が全て達成できることを一連の行動の全体的な目的として念頭におきながら逐次的に選択を行うという行動が多く含まれると考えられる。このような行動は図 1 の (c) のように表現でき、一連の行程に含まれる個々の目的地は、全体の時間制約と他の選択目的地との位置関係等により選択の判断がなされるため、これらの文脈から切り離して個々の目的地を駅に対する空間的分布 (図 1 の (a)) や個別トリップ単位の目的地選択 (図 1 の (b)) として捉えても、モデルの構造や変数が実際の意思決定過程と乖離し、施策の効果の予測に用いても適切な結果が得られない可能性がある。

このため、本研究では、時間制約により生じる行動

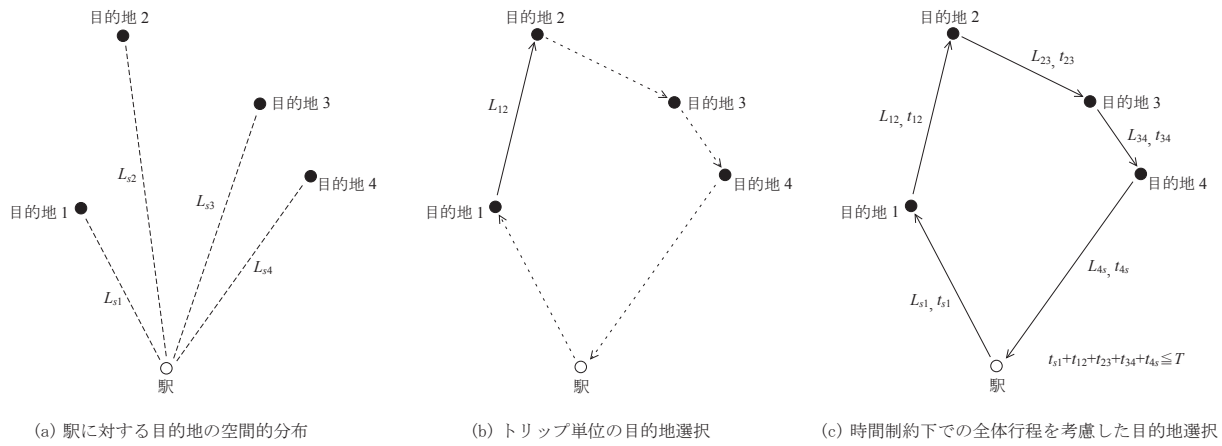


図-1 目的地選択モデルの考え方

範囲の空間的制約の下で、全体行程の完遂を考慮しながら複数の目的地を選択する意思決定過程を表現するモデルを構築する。このような行動では、当面選択すべき目的地の選択において、当該目的地の効用に加えて、その後を選択する一連の行動による効用も考慮に入れる再帰的な選択構造になっていると想定できる。さらには、このような短期間の判断においても、当面の目的にこだわってその後続く行動の重要性を軽く見るような意思決定特性が当てはまる場合も比較的多いと考えられ、これらの点を考慮した動学的な複数目的地の選択モデルを提案する。

また、このときの行動は時間制約により生じる行動範囲の空間的制約の下で行われ、目的地として選択可能な範囲はこの時間-空間上の制約により決まるが、複数ステップの目的地選択においては各選択段階の残り時間と現在位置により空間選択可能範囲が変化する。選択段階に伴い縮小・移動する空間選択可能範囲を基に選択肢集合を形成することで、計算負荷の低減やモデルの精度の向上を図る手法を提示することを、本研究の目的とする。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

既往研究における目的地選択モデルは、自動車交通を前提とした交通調査ゾーン単位での移動を対象とし、Multinomial Logit モデル (MNL) を適用したモデルが提案の主流をなしてきた。これに対し、歩行者行動に関しては、特に一連の買い物行動を記述する上で、複数の目的地を訪れる行動をモデル化する提案がなされている。

Borgers and Timmermans(1986)¹⁾ は、複数目的の買い物行動について、前の目的地から次の目的地への遷移確率を店舗の床面積とリンク間の距離を用いて表したマルコフ連鎖モデルにより定式化している。さら

に、MNL モデルを用いた経路選択のサブモデルと、リンクの属性及び歩行者量に関連して生じる付帯的な店舗訪問を表すサブモデルを加えて、歩行者量の分布を予測する手法を提示している。Kitamura(1984)²⁾ は、prospective utility という概念を導入し、トリップチェーンを考慮した目的地選択モデルの提案を行っている。目的地の選択において、その先に行われる訪問の効用も含む期待効用を prospective utility とし、目的地に近接する店舗の量など他の機会の大きさの影響や、会社帰りの目的地選択における家の位置の影響など、関係する他の目的地の効用を考慮したモデルが提案されている。Arentze et al. (1993)³⁾ は、Kitamura(1984) のモデルを発展させ、複数目的の買い物行動のモデルを提案している。購入頻度に基づき商品を G 個の順位に分類し、個人が 1 つのトリップで複数の商品を購入することにより移動コストを低減しようとする行動をモデル化している。Zhu et al. (2006)⁴⁾ は、時間の影響を考慮した歩行者の買い物行動のモデルを提案している。MNL モデルを用いて、パラメータを定数と時間に依存する項による線形関数に置き換えて効用関数を定義することにより、時間の経過に伴う効用の変化を表している。

この他、セミマルコフ過程を用いて複数目的地間の遷移確率や期待滞在時間の分析を行った研究として Xia et al. (2011)⁵⁾ がある。また、伊藤・羽藤 (2013)⁶⁾ は、歩行者の時空間上の移動・滞在行動について連続時間マルコフモデルを用いてリンク間遷移として記述し、歩行者流の配分を行うモデルを提案している。

時間制約と空間選択の関係を表す概念として、プリズム制約 (Time-space prism) がある。Time-space prism は、Hägerstrand(1970)⁷⁾ により提案され、Lenntorp(1976)⁸⁾ が発展させた概念であり、活動する場所、関連する場所間の距離、移動と活動に利用可能な時間、移動の速度によって決定される領域によって、

個人が到達可能な時間 - 空間的制約を表現するものである．3次元で表される Time-space prism を2次元の平面に投影したものを potential path area (PPA) と呼び、与えられた時間-空間制約内で利用可能なすべての場所が含まれる領域を表す．

初期のモデルが到達可能な空間の範囲のみを表していたのに対し、均等でない活動機会の分布を考慮した GIS ベースのモデルが Kwan and Hong(1998)⁹⁾、Miller(1991)¹⁰⁾ などによって提案された．また、Weber and Kwan(2002)¹¹⁾ では移動時間の違いや店舗の営業時間を考慮したモデルが提案されている．これらのモデルを発展させ、Kim and Kwan(2003)¹²⁾ は”time window”という概念を導入し、現実的な最低限の活動継続時間と最大限の移動時間を考慮したモデルを提案している．Yoon et al. (2012)¹³⁾ は、以上の手法を用いて、午前のピーク、午後のピーク、その間の日中の時間帯、夜の時間帯の4つを設定して移動時間帯による移動速度への影響を考慮するとともに、就業者の分布と勤務時間からサービスの利用可能時間を想定して目的地選択肢集合を生成し、環境の変動によって選択肢集合が大きく変化することを示している．

以上の既往研究に対し、本研究は、目的地選択におけるトリップチェーンの考慮について、空間的な関係性や一方向的な時間推移の影響だけでなく、時間制約により生じる再帰的な将来効用の考慮を導入した点、またプリズム制約による選択肢集合の変化を動的な目的地選択モデルの選択肢集合生成に導入した点に特徴がある．

3. モデルフレームと定式化

次に、時間制約下で複数の目的地を訪問する行動について、本研究におけるモデルフレームの提示と定式化の説明を行う．

非義務的な買い物行動等の場合、一連のツアーで達成したい目的は予め決めて出発するが、1つの目的地訪問終了の度に、現在地や残り時間などその時点での状況を考慮して、以降の目的地を調整し決定するような行動パターンを考えることができる．このような場合、次の目的地の選択は、それ以降に予定する目的に対して制約時間内で選択可能な目的地の有無やその効用の大きさも考慮に入れてなされると考えられる．移動時間は概ね距離に比例するため、次の目的地への出発地点と残り時間によって、選択可能な目的地の範囲は変化する．本研究では、現在地と残り時間により変化する選択肢集合を前提に、次以降の選択肢の効用も考慮して逐次的に選択を行う目的地選択行動のモデルを提案する．

現時点の効用だけでなく将来的な期待効用を考慮に加えて意思決定を行う動的な離散選択モデルは、構造推定的手法により定式化及び推定が行われる．以下、Aguirregabiria and Mira (2010)¹⁴⁾ に基づき、本研究で扱うモデルを定式化する．

個人 i が1ツアー内で訪問する目的地数を K とし、出発地もしくは前の目的地から次の目的地まで移動しそこで滞在するトリップを1期間とする． k 期において、個人 i は状態変数 s_{ik} を観測し、次式で表される期待効用を最大化するよう選択肢 $a_{ik} \in A$ を選択すると仮定する．

$$E\left(\sum_{j=0}^{K-k} \beta^j U(a_{i,k+j}, s_{i,k+j}) \mid a_{ik}, s_{ik}\right) \quad (1)$$

$\beta \in (0, 1)$ は時間割引率、 $U(a_{ik}, s_{ik})$ は k 期の効用を示す．ベルマンの最適性原理 (Bellman, 1957)¹⁵⁾ より、この DP 問題の価値関数 $V(s_{ik})$ は次式で表される．

$$V(s_{ik}) = \max_{a \in A} \{U(a, s_{ik}) + \beta \int V(s_{i,k+1}) dF(s_{i,k+1} \mid a, s_{ik})\} \quad (2)$$

ここで、 $F(s_{i,k+1} \mid a, s_{ik})$ はマルコフ遷移確率分布関数を示す．このときの最適決定ルールは $\alpha(s_{ik}) = \arg \max_{a \in A} \{v(a, s_{ik})\}$ となる． $v(a, s_{ik})$ は次式で定義される選択肢別価値関数である．

$$v(a, s_{ik}) \equiv U(a, s_{ik}) + \beta \int V(s_{i,k+1}) dF(s_{i,k+1} \mid a, s_{ik}) \quad (3)$$

状態変数 s_{ik} のうち観測可能なものを x_{ik} 、観測できないものを ε_{ik} とし、誤差項 ε_{ik} に i.i.d. を仮定し、かつ次期の観測可能な状態変数 $x_{i,k+1}$ が今期の誤差項 ε_{ik} に依存しないと仮定すると、 ε_{ik} の分布に対する価値関数の期待値が次式で表される．

$$\bar{V}(x_{ik}) = \int \max_{a \in A} \{u(a, x_{ik}) + \varepsilon_{ik}(a) + \beta \sum_{x_{i,k+1}} \bar{V}(x_{i,k+1}) f_x(x_{i,k+1} \mid a, x_{ik})\} dG_\varepsilon(\varepsilon_{ik}) \quad (4)$$

G_ε は ε_{ik} の分布関数を表す．このとき、式 (3) の選択肢別価値関数は静的なランダム効用モデルと同様 $v(a, x_{ik}) + \varepsilon_{ik}(a)$ と分解でき、 $v(a, x_{ik})$ は次式となる．

$$v(a, x_{ik}) = u(a, x_{ik}) + \beta \sum_{x_{i,k+1}} \bar{V}(x_{i,k+1}) f_x(x_{i,k+1} \mid a, x_{ik}) \quad (5)$$

$u(a, x_{ik})$ は選択肢別効用関数、 f_x は x に関する遷移確率密度関数を示す．

ε_{ik} に i.i.d. ガンベル分布を仮定すると、 \bar{V} 及び選択

確率は次式のように記述できる．

$$\bar{V}(x_{ik}) = \log \left(\sum_{a=0}^J \exp\{u(a, x_{ik}) + \beta \sum_{x_{i,k+1}} \bar{V}(x_{i,k+1}) f_x(x_{i,k+1} | a, x_{ik})\} \right) \quad (6)$$

$$P(a | x_{ik}, \theta) = \frac{\exp(v(a, x_{ik}))}{\sum_{j=1}^J \exp(v(j, x_{ik}))} \quad (7)$$

目的地選択に影響する主な要素として，目的地での滞在による効用と目的地までの移動による不効用が考えられる．目的地での滞在による効用は，目的地の魅力度が高いほど大きい．また，長く滞在できるほど効用は大きくなるが，効用の増分は低減していくものと考えられる．移動による不効用としては，移動時間が長くなることによる滞在時間の減少や，長い距離を移動することによる体力的，精神的負担などが想定され，移動時間に比例するものと仮定できる．以上を考慮し，選択肢別効用関数 u を次式で表す．

$$u(a, x_{ik}) = \theta_{u1} q_a * \exp(-\theta_{u2} t_{s_{ik}}) + \theta_{u3} L_k + \theta_{u4} d_{ik} \quad (8)$$

q_a は目的地 a の魅力度， $t_{s_{ik}}$ は個人 i の k 期における期待滞在時間， L_k は k 期の目的地までの移動距離を表す．また， d_{ik} は残り時間内に到達できる目的地がある場合は 0，ない場合は 1 をとる変数とする．これらが個人 i の k 期における状態変数となる． θ_u はパラメータとする．

移動距離 L_k は k 期のトリップの出発地点と目的地候補 a の間の最短経路長さにより定義することとし，一つ前の状態（現トリップの出発地点）によって決まるマルコフ連鎖を形成する．期待滞在時間 $t_{s_{ik}}$ は，観測データから分布関数を求め，これに基づき確率的に与えられるものとする．また，滞在時間の長さによる効用の低減を指数関数により表すこととする．目的地の魅力度 q_a には多様な形成要因が考えられるが，目的地を街路ネットワークのノードとし，魅力度をノードに接続するリンクの店舗立地状況を表す指数の平均値で表すことなどが考えられる．この値は時間によらず目的地ごとに一定とする． d_{ik} は，残り時間内に目的地に到達できない場合の不効用を表す．

状態変数のうち時間に伴って変化するのは，期待滞在時間を決める変数とした残り時間 T_{ik} である． $k+1$ 期の残り時間 $T_{i,k+1}$ は， k 期の残り時間 T_{ik} と移動時間 tm_{ik} ，滞在時間 $t_{s_{ik}}$ により次式のように定まる．

$$T_{i,k+1} = T_{ik} - (tm_{ik} + t_{s_{ik}}) \quad (9)$$

移動時間 tm_{ik} は目的地間の最短経路長さに比例するものと仮定し，滞在時間 $t_{s_{ik}}$ の分布には指数関数を仮定して，観測データを用いて係数を推定する．

4. 選択肢集合の生成

選択候補となる目的地は， k 期の出発時点での制約時間内で到達可能な範囲にあることが条件となる．また，本研究では駅を出発して最終的に駅に戻る行動を対象としているため，目的地訪問後に駅に戻る時間 t_{st} を確保する必要がある．以上のことから，各期における目的地選択肢集合は，各期の出発地点を起点として $T_{ik} - (tm(a_{i,k+1}, a_{ik}) + t_{st}(a_{i,k+1}))$ で表される時空間範囲内にあるものとし，これ以外の目的地の選択確率は 0 とする．

移動時間 tm は k 期のトリップの出発地点と目的地候補 a の間の最短経路長さに比例するとしたことから，各期ごとの選択可能範囲を決める変数はいずれも一つ前の状態（現トリップの出発地点）によって決まるマルコフ連鎖を形成する．これにより，出発地から順に選択肢集合の列挙を行う．

図 2 に，目的地の静的な空間分布に着目した目的地選択肢集合（図 2(a)）と，本研究で提案する目的地選択肢集合（図 2(b)）の概念図を示す．駅周辺に分布する目的地について，選択対象範囲を限定する上では，例えば駅からの徒歩圏と考えられる範囲を，規範的もしくはデータから得た分布状況に基づき，駅を基点とした一定距離などにより設定することが考えられ，これが図 2(a) の状況である．目的地が 1 か所の場合の駅との往復行動であればこの設定に妥当性があるが，複数目的地を順次訪問する場合は，制約時間の減少に伴い選択可能範囲は選択段階ごとに狭まっていく（図 2(b)）．本研究ではこの点を考慮し，現実的な空間範囲に選択肢集合を限定することで，モデルの精度向上を図ることとする．

選択肢集合の範囲は出発地点及び残り時間ごとに異なるため，各期のトリップごとに出発点に対する選択肢集合を列挙する．さらに， k 期のトリップの選択において $k+1$ 期以降のトリップの効用も考慮されることから， k 期の条件において $k+1$ 期以降に選択可能なトリップの列挙も行う．

大規模商業集積地などでは，目的地の種類によっては代替選択肢が多数に上るため，計算負荷の低減及び現実的な選択行動との整合の観点から選択肢のサンプリングが必要となる．このような場合，代替選択肢が 5 個を超える場合は 5 個をサンプリングし，これに実際選択された目的地を加えて選択肢集合とすることが考えられる．サンプリングによるバイアスへの対応に関する検討については今後の課題としたい．

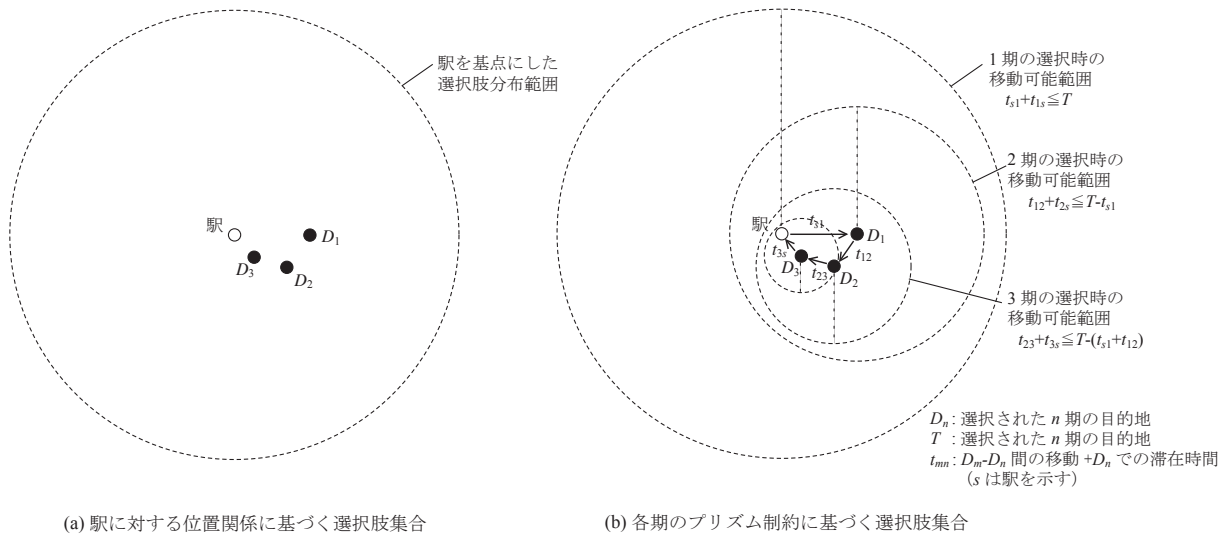


図-2 選択肢集合の考え方

5. 推定データの検討

以上のようなモデリングに対応したデータとして、プロパーソン (PP) 調査データがある。

PP 調査は、携帯電話など GPS 搭載の移動体通信とウェブダイアリーを用いて、人の移動行動を記録する調査である。位置データは秒単位で自動的に記録され、加えて出発地・到着地や出発時間・到着時間は被験者が携帯電話上でボタンを押すことにより記録される。また、移動目的、目的施設、交通手段等の情報を、ウェブダイアリーを用いて被験者が入力することにより取得する。

PP 調査の特徴の一つとして、個人ごとの移動に関する精度の高い位置・時刻データが得られることが挙げられる。複数の目的地を訪れる回遊行動において、各目的地の位置に加えて移動及び滞在に関する時間・時刻が観測できることにより、本研究で提示するようなモデルの適用が容易に行えるようになる。

2005/11/19(土) から 2ヶ月の期間で実施された渋谷地区を対象とする PP 調査では、駅を出発して複数目的地を訪れた後に駅に戻る行動に関する位置・時刻及び目的施設等のデータが取得されており、このデータを用いて本研究で提案したモデルの検討を行うことができる。

分析に用いるデータとして、この他に街路ネットワークデータ及び目的地の属性データが必要となる。対象地区の街路ネットワークは、Google Earth からノード座標データを抽出して作成する。PP データの精度を考慮し、街路は 1本の街路を 1本のリンクとして扱い、片側 2車線以上の街路のみ両側の歩道をリンクとして設定する(図3)。また、目的地の魅力度を表すために用いるリンクの店舗立地状況を表す指数については、住

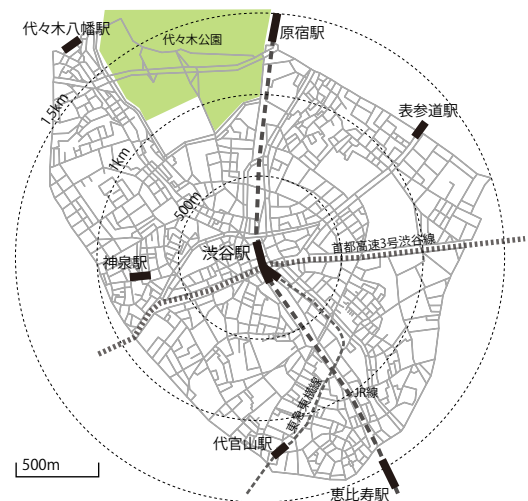


図-3 渋谷地区の街路ネットワーク

宅地図を基にリンクに面する建物における店舗の割合を指数化するなどの方法で設定することができる。

6. モデル推定手法

3において定式化したモデルは、以下の方法で推定できる (Aguirregabiria and Mira, 2010)。

誤差項 ε_{ik} の i.i.d. の仮定及び次期の観測可能な状態変数 $x_{i,k+1}$ の今期の誤差項 ε_{ik} に対する独立性の仮定

により，対数尤度関数は次式で表すことができる．

$$L(\theta) = \sum_i \sum_{k=1}^{K_i} \log P(a_{ik}|x_{ik}, \theta) + \sum_i \sum_{k=1}^{K_i-1} \log f_x(x_{i,k+1}|a_{ik}, x_{ik}, \theta_f) + \sum_i \log Pr(x_{i1}|\theta) \quad (10)$$

$Pr(x_{i1}|\theta)$ は x_i の初期条件を示し，最尤推定上は無視されることが多い．式 (10) に対して，Rust(1987)¹⁶⁾ により簡易化した推定法が提示されており，まず各状態変数 x について $\sum_i \sum_{k=1}^{K_i-1} \log f_x(x_{i,k+1}|a_{ik}, x_{ik}, \theta_f)$ を最大化する θ_f を推定し，これを用いて式 (10) を最大化する θ を求める．

時間とともに変化する状態変数として，式 (9) で定義した残り時間 T_{ik} があり，これを求めるための移動時間 tm_{ik} と滞在時間 ts_{ik} の算定式を PP データを用いて推定する．以上により設定した残り時間の遷移式を用いて，パラメータ θ を推定する．推定結果は発表会にて報告する予定である．

7. まとめ

本研究では，時間制約下での複数目的地選択について，全体行程の効用を考慮しながら逐次的に目的地選択を行う動的な意思決定過程のモデルを構築するとともに，この場合の選択肢集合について，選択段階の経過に伴う残り時間の減少とこれによる空間的制約条件の変化を考慮した生成手法を採用することで，この先徐々に絞り込まれていく行動範囲を見越して各段階の選択がなされる状況を表現することを試みた．これにより，1km 圏程度の歩行スケールの都市空間における歩行者行動について，現実的な意思決定過程に沿った詳細な行動記述が可能となり，ここで提案したようなモデルに必要な個人ごとの詳細データ利用の環境が整備されていく中で，本モデルを用いた検討の機会も高めていくことができると考える．

今後の課題として，先に挙げた選択肢集合のサンプリングバイアスの補正方法の検討に加えて，本研究では単純化して扱っている移動時間と滞在時間について，精度の高い観測データが得られていることを活用したより詳細なモデル化の検討が必要である．

参考文献

- 1) Borgers, A.W.J., Timmermans, H.J.P. (1986), A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas, *Geographical Analysis* 18(2), pp. 115-128.
- 2) Kitamura, R. (1984), Incorporating trip chaining to analysis of destination choice, *Transportation Research Part B* 18, pp. 67-81.

- 3) Arentze, T., Borgers, A., Timmermans, H., (1993), A model of multi-purpose shopping trip behaviour, *Papers in Regional Science* 72(3), pp. 239-256.
- 4) Zhu, W., Timmermans, H., Wang, D. (2006), Temporal variation in consumer spatial behavior in shopping streets, *Journal of Urban Planning and Development* 132, pp. 166-171.
- 5) Xia, J., Zeephongsekul, P., Packer, D., Spatial and temporal modelling of tourist movements using Semi-Markov processes, *Tourism Management* 32, pp. 844-851, 2011.
- 6) 伊藤創太，羽藤英二 (2013)，時空間上の遷移確率に基づく歩行者流配分モデル，土木計画学研究・講演集，Vol. 48, CD-ROM.
- 7) Hägerstrand, T. (1970), What about people in regional science? *Papers and Proceedings of Regional Science Association* 24, pp. 6-22.
- 8) Lenntorp, B. (1976), Paths in space-time environments, A Time-Geographic Study of Movement Possibilities of Individuals, In *Lund Studies in Geography*, No.44, Royal University of Lund.
- 9) Kwan, M., Hong, X. (1998), Network-based constraints-oriented choice set formation using GIS. *Geogr. Syst.* 5, pp.139-162.
- 10) Miller, H. J. (1991), Modeling accessibility using space-time prism concepts within geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 5, pp.287-301.
- 11) Weber, J., Kwan, M.-P. (2002), Bringing time back in: a study on the influence of travel time variations and facility opening hours on individual accessibility, *Professional Geographer* 54(2), pp. 226-240.
- 12) Kim, H.-M., Kwan, M.-P. (2003), Space-time accessibility measures: a geocomputational algorithm with a focus on the feasible opportunity set and possible activity duration, *Journal of Geographical Systems* 5, pp. 71-91.
- 13) Yoon, S.Y., Deutsch, K., Chen, Y., Goulias, K.G. (2012), Feasibility of using time-space prism to represent available opportunities and choice sets for destination choice models in the context of dynamic urban environments, *Transportation* 39, pp. 807-823.
- 14) Aguirregabiria, V., Mira, P. (2010), Dynamic discrete choice structural models: a survey. *Journal of Econometrics* 156 (1), pp. 38-67.
- 15) Bellman, R. (1957), *Dynamic Programming*. Princeton University Press, Princeton.
- 16) Rust, J. (1987), Optimal replacement of GMC bus engines: An empirical model of Harold Zurcher, *Econometrica* 55, pp. 999-1033.

(2014. 4. 25 受付)