

Levy 過程を用いた PT データの補正処理と歩行量推計

近松 京介¹・羽藤 英二²

¹学生会員 東京大学 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: chikamatsu@bin.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学 工学部社会基盤学科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では都市において旅行者が移動する際の歩行量推計を扱う。従前、歩行量推計は、PT 調査データ等を用いて都市交通計画において取り扱われてきたものの、そのアプローチは観測されたデータの集計分析に限定されていた。集計単位である小ゾーンを用いることで、小ゾーン間の移動分析が可能になったといえる半面、情報端末の普及による高精度 GPS データの大量取得等によって、小ゾーン単位による評価の問題も指摘されるようになってきている。高齢者の活動評価や、中心市街地における回遊性向上策の検討に向けて、PT 調査データを補正し、ドットデータ化する手法が必要とされているといえよう。但し、一定範囲を周遊するマイクロな行動と、PT 調査によって観測可能な地下鉄等の公共交通機関を用いたマクロな行動は互いに影響しあっている。本研究ではこのような空間選択の階層性に着目した補正手法を提案する。突発的な Jump を含む Levy 過程を二次元平面上に拡張した Levy Walk を用い、階層性を含んだ交通行動を疑似的に発生させ、PT 調査データと組み合わせることでデータの補正を試みる。

Key Words : 歩行量推定, パーソントリップ調査, Levy 分布, データ補正

1. はじめに

(1) 研究背景

昭和 40 年代から始まった我が国のパーソントリップ調査(以下 PT 調査)は、都市圏に住む人々の日々の行動を詳細に把握するためのアンケート調査であり、主に土木計画分野において都市圏レベルでの都市交通計画や鉄道網計画、防災計画、新規路線等の需要予測等に用いられている¹⁾。これまで各地で延べ 90 回以上実施され、都市交通計画を行う上で重要な役割を果たしてきた。調査票等の調査手法はほぼ確立されたものとなっているものの、一方で調査項目の増加や、それに伴う調査対象への負担、調査費用の増大等の問題、更にはゾーン単位での起終点に関する調査であるため、詳細な行動データを把握することができないといった大きな問題が存在している。

交通計画及び分析の場面で歩行者の交通特性の分析のため、詳細な行動データが必要となることは少なくない。特に近年では、中心市街地の空洞化および活性化の課題、及び健康増進を主目的とした「歩いて暮らせるまちづくり」の重要性が議論²⁾されるようになり、それに伴い中心市街地での歩行者の回遊行動調査や住居区別の歩行量調査が重視され、各地でさまざまな調査が実施されるようになってきた。ただし、市街地や住宅地での歩行のようなマイクロ(下位層)な行動と、地

下鉄等の公共交通機関を用いたマクロ(上位層)な行動は互いに影響しあっている。住宅地と公共交通サービスの連絡や市街地とそれに付属するモビリティが歩行行動に影響を与えることは明白であろう。精緻な歩行行動の理解のために、こうした交通行動の階層性を踏まえたうえでの分析・モデリングが不可欠である。

PT 調査によるデータは、都市・交通計画者にとって比較的利用しやすく、公共交通機関の利用のような上位層行動データが含まれている。下位層行動データを疑似的に生成し、PT 調査によって観測された上位層行動データを内挿することで得られる補正データは、あらゆる計画・研究・分析に有用と考えられる。本研究では、こうした背景のもと、PT 調査によるデータの補正処理手法開発を行う。

(2) 既往研究の整理

a) データの補正

データの補正対象となる主なものとして「時間」「空間」「個人属性」が挙げられる。時間的な補正に関していえば、赤松ら(1998)³⁾の時間帯内静的配分と時間帯間動的配分の組み合わせによる、OD 交通量の時間帯間誤差を補正した配分モデルの研究や、三古ら(2004)⁴⁾の長期の経時分析におけるパラメータの補正の研究が挙げられる。また、Daganzo ら(2007)⁵⁾の Macroscopic Fun-

damental Diagrams(MFD) や, Ben-Akiva ら (2000)⁶⁾ の交通流マイクロシミュレーション (MITSIM) の研究は, 空間行動データを補正しパラメタリゼーションを行っている. 個人属性の補正は, 国内では石田 (1973)⁷⁾ のセグメント分けデータを用いた重点サンプリングの研究や佐々木 (2004)⁸⁾ の潜在クラスを用いた個人属性による重み付け推定によるパラメタ補正の研究が挙げられる. 本研究で取り組むデータ補正は PT 調査のデータに対する擬似行動データの付加であるため, 空間的な補正に属する研究である.

b) PT 調査データ補正手法

PT 調査のデータ補正に係る研究として, PT 調査不能誤差と層別拡大に関する研究⁹⁾, PT 調査データの拡大補正法に関する研究¹⁰⁾, 回答誤差とその発生要因に関する研究¹¹⁾, PT 調査改善のための交通実態調査¹²⁾ 等が挙げられる. いずれの研究も, 回答者にとって手間のかかるアンケート調査によって起こりうるトリップ未記入やうろおぼえ状態での記入といった誤差の大きいデータに基づく OD 表をどのように拡大すべきかを議論するものであり, 本研究が目的とする下位層行動データの追加による補正ではない.

薄井ら (2010)¹³⁾ は, PT 調査データの OD を基に最短経路探索を行い, 最短経路による経緯度データを内挿することで, データを空間連続的に補正している. ただし, 補正経路として最短経路を用いているため誤差が生じる. ここで, 戸井田 (2014)¹⁴⁾ は, PT 調査による OD の経路候補を初期値として, パーティクルフィルタを用いたデータ同化によりパラメタを逐次更新することで, より精度の高い OD 間経路をサンプリングする手法を開発した. 一方, これらの手法は, PT 調査データにより与えられる OD 間の経路を予測・表現するものであり, PT 調査結果集計時に既に抜け落ちていると考えられるゾーン内歩行トリップといった下位層行動データに関して補正できていない.

c) トリップの計測漏れ補正

PT 調査データに代表的な問題であるトリップの計測漏れの補正に係る研究として特に Kitamura ら (1987)¹⁵⁾ の時系列トリップデータ間の誤差に着目した研究や, 羽藤ら (2000)¹⁶⁾ の移動体通信システム (プローブパーソン調査) を用いたデータ補正などが挙げられる. プローブパーソン調査 (以下 PP 調査) とは, 携帯通信機等による GPS 情報及び Web ダイアリーによる個人・トリップ属性情報の取得が可能な調査である. いずれの研究も, 観測されたトリップ間に存在する真のトリップ情報に対する研究であるものの, 階層性の整合性を担保できていない課題が残る.

d) 歩行量推計

歩行量を推計する研究は非常に少なく, 国内では谷口ら (2006)¹⁷⁾ の, 万歩計を用いた調査データから単位活動時間当たりの歩行量を計算し, それを PT 調査データに乗ずることで地区別の歩行量を算出し地区別歩行量特性を分析した研究や, 松中ら (2013)¹⁸⁾ の PT 調査の小ゾーン属性を変数として身体活動量を求める構造方程式モデルの研究が挙げられる. いずれの研究も, 先に述べたような PT 調査によるデータの抜け落ちに関しては議論されていない.

海外では, Cao ら (2006)¹⁹⁾ の二項モデルを用いた住宅地と歩行量に関する分析や, Hoback ら (2008)²⁰⁾ のモンテカルロシミュレーションによるバス停までの歩行アクセス経路再現の研究が挙げられる. いずれも下位層の行動のみを抽出した分析であり, 上位層の交通行動と整合性が保証されていない. また, PT 調査データのような実用的なデータから分析した研究例は非常に少ないといえよう.

(3) 本研究の位置づけ

東京のような大都市圏における交通行動の分析を行うためには, 大規模なデータが不可欠である一方, 大規模なデータほど, 下位層の交通行動の抜け落ちが多くなる. 下位層行動のみを取り扱うモデル・研究は多く存在するものの, 下位層行動の諸条件を決める上位層の行動との整合性なしには, 精緻な交通行動分析は成立しない. 以上から本研究では, 交通行動の階層性に着目し, その整合性を担保しつつ, 公共交通機関による移動等の上位層行動データが観測されている PT 調査データに, 下位層行動データを擬似的に生成・付加させることでデータ補正する手法を開発する.

2. 手法

(1) 基本骨子

データの擬似生成において重要となるのは, 母集団に対し担保する分布である. 四段階推定法で用いられる PT 調査の OD データ拡大は, 母集団に対し一定のサンプリング数を確保することで, 中心極限定理に基づき母集団 OD 分布を担保している. 一方, 本研究では擬似データを生成するにあたり, 母集団に対しトリップ長分布を担保する. 下位層の行動においては, 回遊や散策等の行動が多く見受けられ, OD の概念では表現が困難である場合が多い. ミクロな都市計画において重要視されるものが滞在時間や歩行距離であるならば, 担保すべき母集団分布はトリップ長分布であるといえよう. 図 1 は, 本研究の骨子となるトリップ長分布による移動表現のコンセプト図である. 階層性を有する

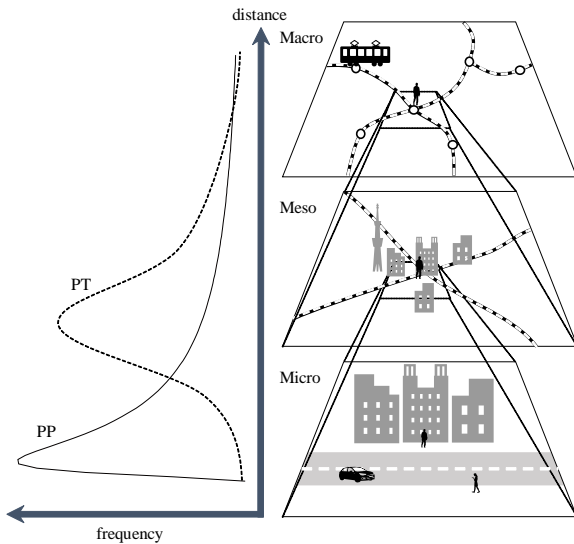


図-1 研究コンセプト

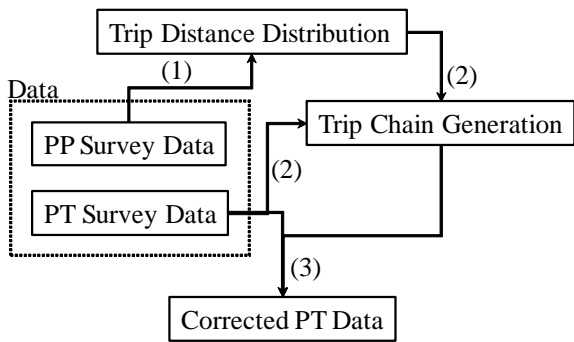


図-2 本研究のモデルフロー

交通行動をモデル化するにあたり、階層間の整合性を保持するためには、各階層を独立した理論で扱うのではなく、共有する性質、若しくは共通の理論で扱うべきである。図1に示すよう、本研究では都市全体・全階層のトリップを同一分布からサンプリングすることによりこの問題を解消する。

(2) モデルフロー

モデル全体の流れを図2に示す。

- (0) インputデータとして、PP 調査及び PT 調査のデータを用いる。PP 調査によるデータは、PT 調査によるデータと比較し精度の高い観測がなされている。
- (1) トリップ長分布を誤差の少ない PP 調査のデータを用いて推定し、トリップ長分布のパラメータを得る。
- (2) (1)で推定された分布を用いて、PT 調査によるデータを境界条件とし、トリップチェーンを発生させる。
- (3) 得られた下位層の行動データを、PT 調査によって

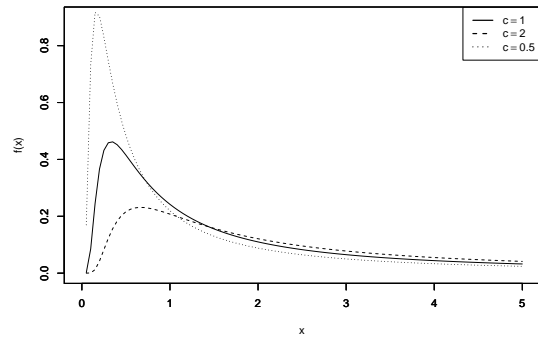


図-3 Levy 分布の確率密度関数

得られている上位層の行動データに内挿し、補正された PT 調査データを得る。

(3) Levy 分布及び Levy 過程の導入

トリップは不連続ではなく連続的である。したがって、一連のトリップ(以下トリップチェーン)を確率過程として記述し、トリップ長分布からの繰り返しサンプリングによりトリップ長の系列データを生成する。ここで、現実世界において観測されるトリップ長の系列データの和(以下トリップチェーン長)の分布は裾の重い分布となる。しかしながら、この手法により得たトリップチェーン長分布は中心極限定理により、正規分布にしたがうため、誤差が生じる問題が発生する。本研究では、安定分布の一種である Levy 分布を用いることで、この問題を解消している。以下、Levy 分布の特性及び Levy 分布を用いた Levy 過程について導入する。

a) Levy 分布

本研究で利用する Levy 分布を導入する。Levy 分布は、安定分布のなかでも解析可能な確率密度関数を有する数少ない分布であり、非不変確率変数に対する裾が重い連続確率分布である。安定分布とは、正規分布や Cauchy 分布を含むより広い概念であり、その確率変数の和は、適切な一次変換によって元の分布になるという特徴をもつ。これはすなわち、安定分布の確率変数の和は、元の分布形状と同形になることを意味する。こうした性質をもつ安定分布は、交通の分野においても適用が見られ、福田²¹⁾²²⁾は、リンク及びネットワーク全体の旅行時間の分布が同形状である点に着目し、リンク旅行時間を経路旅行時間分布に集計化可能にする目的で安定分布を適用している。

一部を除く安定分布の確率密度関数は解析的に書くことはできず、確率密度関数の解析的な式の欠如はパラメータの尤度推定を不可能にするため、安定分布の適応において大きな壁となる。例外として、正規分布、

Holtmark 分布, Cauchy 分布, Levy 分布は確率密度関数の解析式を書き下すことが可能な安定分布である. Levy 分布は確率密度関数を書き下せる安定分布の中で唯一非対称な形状をしており, 小さいほど裾が厚いことを示す特性指数は, 正規分布の 2, Cauchy 分布の 1 と比べ, Levy 分布は 0.5 と小さく, 裾が重い(図 3). Levy 分布の確率密度関数は $x \geq \mu$ に関して以下の式 (1) で与えられる.

$$f(x; \mu, c) = \sqrt{\frac{c}{2\pi}} \frac{e^{-c/2(x-\mu)}}{(x-\mu)^{3/2}} \quad (1)$$

ただし,

μ : 位置パラメータ

c : 尺度パラメータ

また, 累積密度関数は, 以下の式 (2) で与えられる.

$$F(x; \mu, c) = \text{erfc}(\sqrt{c/2(x-\mu)}) \quad (2)$$

ただし,

$\text{erfc}(z)$: 相補誤差関数

また, 正規分布にしたがう確率変数 X に対し, 位置パラメータ $\mu = 0$, 尺度パラメータ c の Levy 分布 ($Levy(0, c)$) と等価な式が次の式 (3) で表される.

$$X \sim N(0, 1/c) \rightarrow X^{-2} \sim Levy(0, c) \quad (3)$$

式 (3) を用いることにより, モンテカルロ法によって Levy 分布から高速にサンプリングが可能である.

b) Levy 過程

Levy 過程とは確率過程の一種であり, 独立増分過程に含まれる. 独立増分過程とは, 独立増分性によって特徴付けられ, 独立増分性は次の条件であらわされる.

- 任意の $n = 1, 2, \dots$ と $0 \leq t_0 < t_1 < \dots < t_n < \infty$ に対して, $X_{t_0}, X_{t_1} - X_{t_0}, \dots, X_{t_n} - X_{t_{n-1}}$ は独立
ただし,
 t_n : n 期
 X_{t_n} : n 期の確率変数 X

さらに, 独立増分過程であって, 次の条件を満たすとき, その独立増分過程は Levy 過程となる.

- 任意の $s \leq 0$ に対して, $X_{t+s} - X_t$ の分布 t に依存しない
ただし,
 s : 任意の期間

Levy 過程は以上のように定義されるため, Levy 分布と直接的なつながりはない. ただし本研究では, Levy 分布にしたがう確率変数を用いて Levy 過程を発生させるため, 混同には要注意である.

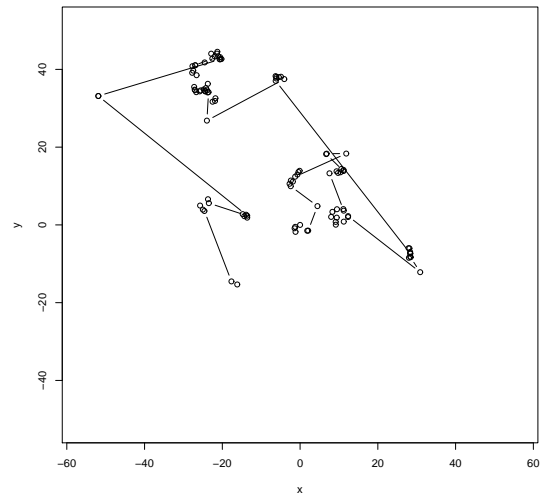


図-4 Levy Walk の例

(4) Levy 過程によるトリップチェーン生成

トリップ長系列データに角度情報を与え, 2次元平面に拡張することでトリップチェーンが表現可能となる. 特に, 裾の重い分布からの繰り返し独立サンプリングによるトリップ長系列データを用いる場合, 得られるトリップチェーンは Levy Walk と呼ばれる. Levy Walk はアホウドリの捕食行動としてモデリングされたことを端緒として研究が進められ, 近年, 人間の行動も Levy Walk にしたがうことが報告されている²³⁾. 一般的に, Levy Walk におけるトリップの角度(以下トリップ角度)はランダムに与えられる. 図 4 に, トリップ長分布として Cauchy 分布(ロケーションパラメータ: 0, スケールパラメータ: 1)を用いた場合の Levy Walk を示す.

PT 調査データにおいて抜け落ちている降車駅と乗車駅間の下位層のトリップチェーンの補完を試みる場合, トリップチェーンの起終点は既に決まっている. こういった空間における接続条件(以下境界条件)を設定した場合, 従来の Levy Walk では, 起点となる位置から Levy Walk を開始することは可能であるものの, 終点となる位置に到達しないという問題が発生する. 本研究では, 従来の Levy Walk のランダムな角度選択に幾何条件による制約を加味することで, 境界条件を満たす Levy Walk の発生を可能とした. 幾何条件の詳細は付録を参照してほしい.

(5) データ補正における条件

擬似生成したトリップチェーンを用いて PT 調査データの補正を行う際, 次の条件に留意する必要がある.

- 境界条件

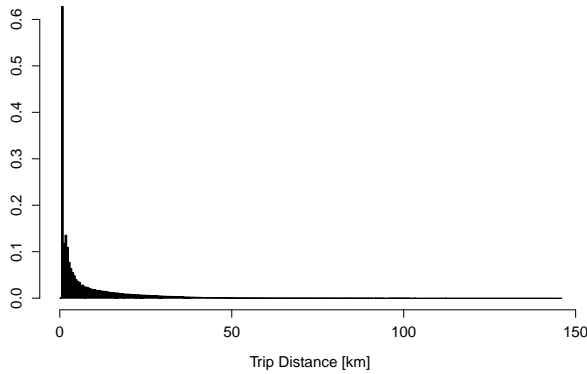


図-5 PT 調査データによるトリップ長のヒストグラム

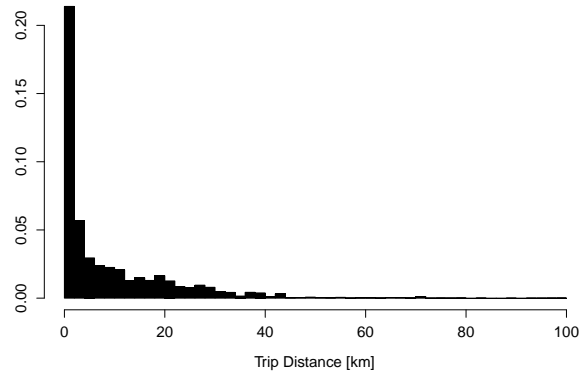


図-6 PP 調査データによるトリップ長の分布

表-1 東京都市圏 PT 調査 2008 の概要

データ取得期間	2008 年 10 月-11 月
調査方法	紙の調査用紙による記入回答
対象	東京都市圏
回答者数	733,534 名
取得トリップ数	1,906,032 トリップ

- 個人・トリップ属性別トリップ長分布条件
- 時空間プリズム制約

境界条件は、トリップ補完の際、起終点を PT 調査データと一致させる条件であり、(4) で示したとおり、角度選択に幾何条件を加えることで条件を満たすことが可能となる。個人・トリップ属性別トリップ長分布条件とは、個人属性やトリップ属性が異なる場合、属するトリップ長分布が異なるため、属性別のトリップ長分布を用いなければならないという条件であり、推定時にセグメント分け、若しくはダミー変数を用いる必要がある。時空間プリズム制約とは、滞在時間と起終点が与えられたとき、滞在時間内に移動可能な空間範囲が限定される条件であり、トリップ長系列データ生成時にフィルタリングを行う必要がある。以上の条件は本研究において実装できていない部分があり、これについては今後の課題とする。

3. 検証・分析

(1) データ概要

a) PT 調査

2008 年の 10 月から 11 月にかけて東京都市圏で行われた第 5 回東京都市圏パーソントリップ調査により得られたデータを使用する。簡単な調査概要を図 1 に示す。調査は東京都市圏(東京都, 神奈川, 千葉県, 埼玉

県, 茨城県南部) に居住する約 1,600 万世帯のうち、無作為に選ばれた約 140 万世帯を対象とし、約 34 万世帯票を回収(有効回収率 約 24%)、回答者数は 733,534 名、抽出率は 2.7%であった。調査方法は、調査対象世帯に対して郵送で調査票を配布し、郵送にて調査票を回収する方法で実施されており、各被験者は調査期間中の 1 日について自身の交通行動を回答している。主なデータ項目として、時間と位置(小ゾーン単位)、1 日のトリップ数、交通手段、使用した駅などのトリップ属性データ、性別、年齢、勤務先などの個人属性データを含む。また、集計単位である小ゾーンとは、夜間人口約 15,000 人を目安としており、地域によってその規模が異なる。

b) PP 調査

横浜市において 2008 年、2009 年、2010 年に行われた PP 調査のデータを統合して利用する。簡単な調査の概要を表 2 に示す。PP 調査は、被験者に GPS 機能を搭載した携帯型端末機またはスマートフォンを用いて行われる。主な取得データは、GPS による位置情報(緯度・経度)及び測位時刻である。近年は携帯端末の発達により、加速度や気圧などのデータも同時取得可能となっている。加えて Web ダイアリー調査により、同時に移動手段・移動目的、出発地・目的地属性、そして被験者の個人属性(年齢・性別・職業)を記録している。

(2) トリップ長分布推定

基礎分析として PT 調査及び PP 調査から得られるトリップ長データの可視化を行う。まず、PT 調査のデータから得たトリップ長のヒストグラムを図 5 に示す。加えて、PP データから得たトリップ長のヒストグラムを図 6 に示す。どちらのヒストグラムもトリップ長が裾の

表-2 PP 調査の概要

調査機関	2008/11/8-12/24 2009/10/29-11/27 2010/7/5-8/11
調査方法	スマートフォンによる GPS 軌跡取得および Web ダイアリーへの記録
対象	横浜市都心部を日常的に利用する人
モニター数	計 283 名 2008 年 138 名, 2009 年 51 名, 2010 年 94 名
取得ロケーションデータ数	計 4,311,362 2008 年 2,920,484, 2009 年 601,814, 2010 年 789,074
取得トリップ数	計 19,929 2008 年 13,808, 2009 年 2,504, 2010 年 3,617
取得ツアー数	計 6,178 2008 年 4,262, 2009 年 760, 2010 年 1,156

重い分布にしたがうことを示している。PT 調査データによるトリップ長ヒストグラムは滑らかな分布を示すものの、トリップ長を OD ゾーン代表点間の距離で近似し与えているうえ、ゾーン内のトリップ距離が欠如しているため、正確な値を与えることができない。したがって、パラメータを推定する際にバイアスが生じる問題がある。一方、PP 調査によるデータは、精度の高い観測がなされているものの、サンプル数が多くないため分散が大きい確率分布の場合、分布形状が安定しないという問題がある。

本研究では、分布の安定性の問題は今後の課題として、PP 調査によるデータを用いて推定を行う。また、中心極限定理及び安定分布の性質確認のため、対数正規分布と Levy 分布を用いて次のような検証を行う。

- (1) 対数正規分布と Levy 分布の推定を行い、分布毎に推定されたパラメータを用いてトリップ長系列データを 10000 個生成する。
- (2) 生成した系列データの系列ごとの要素和を求めることで、10000 の疑似トリップチェーン長データを得る。
- (3) 疑似トリップチェーン長データを用い、再び各分布でパラメータ推定を行う。
- (4) 推定されたパラメータと PP 調査によって得たトリップチェーンデータで各分布を推定したパラメータを比較し、各々の分布の整合性を判断する。

対数正規分布は安定分布には属さないため、トリップ長系列データ生成時、中心極限定理が作用し、トリップチェーン長分布の分散が小さくなり、分散パラメータが過小評価されると考えられる。

トリップ長に関する対数正規分布、Levy 分布の推定パラメータ、および疑似トリップチェーン長と実トリップチェーン長に関する各分布の推定パラメータを表 3 に示す。
ただし、

表-3 対数正規分布と Levy 分布のパラメータ推定値の比較

	Log-Normal		Levy($\mu=0$)
	μ	σ	c
Trip Distance	0.915	1.636	0.690
Synthetic Trip-chain Distance	2.796	0.963	4.705
Trip-chain Distance	2.299	4.705	4.790

μ : 対数平均

σ : 対数標準偏差

表 3 が示すように、仮説通り対数正規分布の疑似データによる分散パラメータの推定値は過小評価されていることが確認できる。また、トリップチェーン長の推定結果に関して、疑似データを用いたものと PP 調査によるデータを用いたもので比較を行うと、対数正規分布のパラメータは小数点第 1 位で値が異なっている一方、Levy 分布は少数点第 1 位の値まで一致しており、本研究における Levy 分布の有用性が確認できる。

(3) PT, PP 調査データと補正データの比較分析

PT 調査と PP 調査、及び本研究の手法で得たトリップ長データの比較分析を行い、補正効果を確認する。図に各調査及び補正されたデータを用いて可視化したトリップ長分布を示す。PP 調査におけるトリップ長分布のピークは 0 1km の範囲にある一方、下位層の行動データが抜け落ちている PT 調査のトリップ長分布は 2km 付近にピークがあり、PT 調査によるトリップ長分布は母集団の真の分布に対し歪んでいることが確認できる。ここで、PT 調査の補正データを確認すると、PT 調査のみのトリップ長分布と比較し、分布のピークが PP 調査によるトリップ長分布に近づいている。ただし、分布形状が歪んでおり、2km 付近においても小さなピークがある。これは、PT 調査データのトリップ長を OD 代表点間の距離で近似しているためであると考えられる。本来は、補正をする際 PT 調査に含まれる駅利用

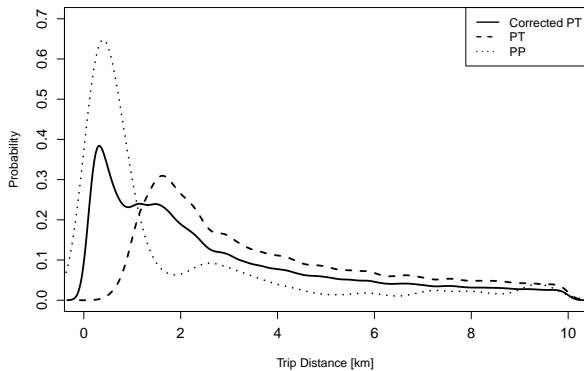


図-7 各調査及び補正データによるトリップ長分布

情報から、上位層行動のトリップ長を算出する必要があるが、これに関しては今後の課題とする。

4. まとめ

(1) 本研究の成果

本研究では、近年の都市計画における詳細な行動データの需要に対する、PT 調査における詳細な行動データの抜け落ち問題を取り上げ、行動データの擬似生成によるデータ補正処理手法開発を行った。この際、擬似生成する下位層行動と PT 調査から得られる上位層行動の相互作用に着目し、補正処理内で交通行動の階層性を考慮できるよう工夫した。

データの擬似生成において重要となるのは、母集団に対し担保する分布であり、PT 調査では OD 分布を担保する代わりに母集団トリップ長分布の担保ができていないことを指摘した。下位層の行動において重要となるのは OD 分布ではなくトリップ長分布であることから、本研究では擬似データを生成するにあたり、都市全体・全階層のトリップを同一分布からサンプリングすることによりトリップ長分布を担保し、補正を行っている。

トリップ長分布からの繰り返しサンプリングによりトリップチェーンを確率過程として記述する際、安定分布を除く統計分布では中心極限定理により正規分布に収束するという不都合が発生するため、本研究では、安定分布の一種である Levy 分布を用いることで、この問題を解消している。また、データを用いてこの Levy 分布の効果を検証し本研究における Levy 分布の有用性が確認した。

最後に、PT 調査と PP 調査、及び本研究の手法で得たトリップ長データの比較分析を行った。分析の結果、補正前の PT 調査データによるトリップ長分布の真の母集団分布に対する歪みが、補正により真の分布に近

づくことを確認した。

(2) 今後の課題

今後の課題としては次のような課題が挙げられる。

- 個人・トリップ属性別の Levy 分布推定
 - 時空間プリズムを考慮した Levy Walk 生成
 - PT 調査の駅利用情報を利用したデータ補正の実装
- 特に、個人・トリップ属性別の Levy 分布推定に関しては PP 調査のサンプル数の問題もあるため、簡単ではない。この問題に対し、サンプル数の少ない PP 調査とサンプル数の多い PT 調査を融合した形で Levy 分布の推定を行う手法について考える必要がある。

参考文献

- 1) 中野敦. 都市圏 pt 調査データの整備と活用. 土木計画学研究・講演集, Vol. 25, .
- 2) James F Sallis, Lawrence D Frank, Brian E Saelens, and M Katherine Kraft. Active transportation and physical activity: opportunities for collaboration on transportation and public health research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 38, No. 4, pp. 249–268, 2004.
- 3) 赤松隆, 牧野幸雄, 高橋栄行. 時間帯別 od 需要とリンクでの渋滞を内生化した準動的交通配分. 土木計画学研究・論文集, Vol. 15, pp. 535–545, 1998.
- 4) 三古展弘, 森川高行. 世帯単位で見た居住地・自動車保有・自動車旅行距離の関係の経時分析. 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, pp. 523–530, 2004.
- 5) Nikolas Geroliminis and Carlos F Daganzo. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 42, No. 9, pp. 759–770, 2008.
- 6) Qi Yang, Haris Koutsopoulos, and Moshe Ben-Akiva. Simulation laboratory for evaluating dynamic traffic management systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1710, pp. 122–130, 2000.
- 7) 石田徳孝. 層別サンプリング設計上の最適問題について. 松山商大論集, Vol. 24, No. 1, pp. 21–41, 1973.
- 8) 佐々木邦明. Stated choice と態度指標を統合した意識構造のモデル化とその比較検証. 土木学会論文集, No. 765, pp. 29–38, 2004.
- 9) 山形耕一. パーソントリップ調査における調査不能誤差と層別拡大に関する研究. 土木学会論文報告集, Vol. 1984, No. 343, pp. 121–129, 1984.
- 10) 花岡和聖. 焼きなまし法を用いたパーソントリップ調査データの拡大補正法に関する研究: 平成 12 年度京阪神都市圏パーソントリップ調査データを用いて. 都市計画. 別冊, 都市計画論文集= City planning review. Special issue, Papers on city planning, Vol. 41, No. 3, pp. 91–96, 2006.
- 11) 名取義和, 谷下雅義, 鹿島茂. パーソントリップ調査における回答誤差とその発生要因. 土木計画学研究・論文集, Vol. 17, pp. 155–162, 2000.
- 12) 柴谷大輔, 中野敦, 森田哲夫, 本田肇, 石田東生. パーソントリップ調査改善のための実験的な交通実態調査. 土木計画学研究・講演集, Vol. 28, p. 97, 2003.
- 13) 薄井智貴, 関本義秀, 金杉洋, 南住孝, 柴崎亮介. 5 都市圏パーソントリップデータの比較と時空間内挿処理の実現. 土木計画学研究・論文集, Vol. 27, No. 3, 2010.

- 14) 戸井田亮祐. 時空間メッシュ集計データを用いた同化手法による人の流れの推定に関する研究. PhD thesis, 2014.
- 15) Ryuichi Kitamura and Piet HL Bovy. Analysis of attrition biases and trip reporting errors for panel data. *Transportation Research Part A: General*, Vol. 21, No. 4-5, pp. 287-302, 1987.
- 16) 羽藤英二, 朝倉康夫. 時空間アクティビティデータ収集のための移動体通信システムの有効性に関する基礎的研究. *交通工学*, Vol. 35, No. 4, pp. 19-27, 2000.
- 17) 谷口守, 松中亮治, 中井祥太. 健康まちづくりのための地区別歩行喚起特性. *地域学研究*, Vol. 36, No. 3, pp. 589-601, 2006.
- 18) 松中亮治, 大庭哲治, 中川大, 井上和晃. 都市内の小地域特性を考慮した交通身体活動量の経年変化とその要因分析. *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol. 69, No. 3, pp. 216-226, 2013.
- 19) Xinyu Cao, Susan L Handy, and Patricia L Mokhtarian. The influences of the built environment and residential self-selection on pedestrian behavior: evidence from austin, tx. *Transportation*, Vol. 33, No. 1, pp. 1-20, 2006.
- 20) Alan Hoback, Scott Anderson, and Utpal Dutta. True walking distance to transit. *Transportation planning and technology*, Vol. 31, No. 6, pp. 681-692, 2008.
- 21) 福田大輔. 旅行時間変動の価値付けに関する研究展望とプロジェクト評価への適用に向けた課題の整理. *土木計画学研究・論文集*, Vol. 27, No. 3, pp. 437-448, 2010.
- 22) Daisuke Fukuda and Mogens Fosgerau. Characteristics of the distribution of travel times on an urban road. In *European Transport Conference 2008*.
- 23) Injong Rhee, Minsu Shin, Seongik Hong, Kyunghan Lee, Seong Joon Kim, and Song Chong. On the levy-walk nature of human mobility. *IEEE/ACM transactions on networking (TON)*, Vol. 19, No. 3, pp. 630-643, 2011.

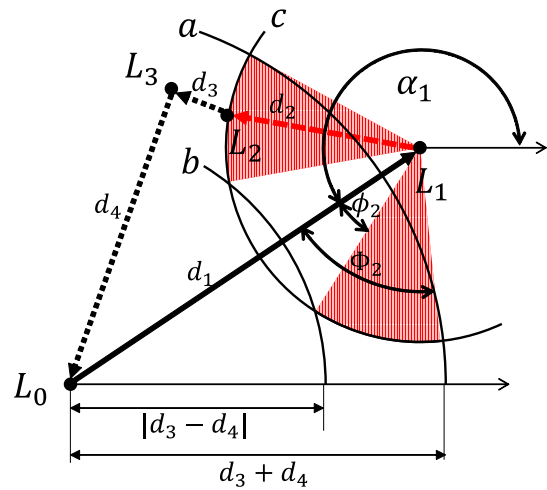


図-8 幾何条件の導出

を参照のもと説明し、その後一般化する。図 8 では、トリップ長の配列 $\mathbf{d} = \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ が与えられ、2 回目のトリップの際の角度 θ_2 を決める段階である。このとき、**a** の条件は、 L_2 が L_0 を中心とし、 $d_3 + d_4$ を半径とする円 **a** の内側になければならないことを意味する。また、**b** の条件は、 L_2 が L_0 を中心とし、 $|d_3 - d_4|$ を半径とする円 **b** の外側になければならないことを意味する。ここで、現地点 L_1 を中心とし、半径をトリップ長 d_2 とした円 **c** を描くと、角度の制約条件は、図中赤の斜線で表される範囲で与えられる。 L_1 から L_0 に向かう角度を α_1 、 L_0 と L_1 の距離を D_1 とし、**a** の条件によって定まる α_1 を中心とした選択可能最大角度を Φ_2 とし、**b** の条件によって定まる選択可能最小角度を ϕ_2 とする。このとき、 Φ_2 は円 **a** と円 **c** の関係から、 ϕ_2 は円 **b** と円 **c** の関係から、余弦定理を用いて導出可能であり、以下の式 (I.1),(I.2) によって表される。

$$\Phi_2 = \arccos \frac{d_2^2 + D_1^2 - (d_3 + d_4)^2}{2 \cdot d_2 \cdot D_1} \quad (I.1)$$

$$\phi_2 = \arccos \frac{d_2^2 + D_1^2 - |d_3 - d_4|^2}{2 \cdot d_2 \cdot D_1} \quad (I.2)$$

また、 α_1 、 Φ_2 、 ϕ_2 を用いて θ_2 の制約条件は次の式 (I.3) で表される。

$$\alpha_1 + \phi_2 \leq \theta_2 \leq \alpha_1 + \Phi_2, \alpha_1 - \Phi_2 \leq \theta_2 \leq \alpha_1 - \phi_2 \quad (I.3)$$

ここで、 k 番目のトリップ角度の制約条件に使われる $k + 1$ 番目から n 番目までのトリップ長の和を R_k 、 $k + 1$ 番目から n 番目までのトリップを折りたたんだ最小の長さを r_k とし、式 (I.1), (I.2), (I.3) を一般化すると、以下の式 (I.4),(I.5),(I.6) が

付録 I 幾何条件による角度制約

Levy Walk の角度選択時に加味した幾何条件について詳細を記す。

- ① Levy Walk を生成する初期地点 L_0 を与える。
- ② トリップ長系列データを生成する。この際、起終点の距離よりトリップ長系列データが短い等の系列データを生成しないよう留意する。
- ③ 1 回目 (k 回目) のトリップにおける角度 $\theta_1(\theta_k)$ を決める。このとき、 θ_k の制約条件が次の 2 つの幾何条件から導かれる。
 - a) k 番目のトリップは、初期地点を中心とし、半径が残りのすべてのトリップ ($k + 1$ 番目から n 番目) の和である円より外側にはいってはならない。
 - b) k 番目のトリップは、初期地点を中心とし、半径が残りのすべてのトリップ ($k + 1$ 番目から n 番目) を折りたたんだ最小の長さである円より内側にはいってはならない。

この幾何条件から導かれる制約条件式は余弦定理から簡単に導くことができる。簡単のため、図 8

導ける.

$$\Phi_k = \arccos \frac{d_k^2 + D_{k-1}^2 - R_k^2}{2 \cdot d_k \cdot D_{k-1}} \quad (\text{I.4})$$

$$\phi_k = \arccos \frac{d_k^2 + D_{k-1}^2 - r_k^2}{2 \cdot d_k \cdot D_{k-1}} \quad (\text{I.5})$$

$$\alpha_{k-1} + \phi_k \leq \theta_k \leq \alpha_{k-1} + \Phi_k, \alpha_{k-1} - \Phi_k \leq \theta_k \leq \alpha_{k-1} - \phi_k \quad (\text{I.6})$$

以上の定式化によって, k 番目トリップの角度の制約条件を決め, その範囲内で角度をランダムに選択する.

④ $d_1(d_k)$, $\theta_1, (\theta_k)$ を用いて $L_1(L_k)$ を決定する.

⑤ ③,④を繰り返し L_{n-1} が決定次第終了.

以上のアルゴリズムに示される幾何条件の適用により, 境界条件を満たす Levy Walk の生成が可能となる.

Walking Volume Estimation and PT Data Correction Processing based on Levy Process

Kyosuke CHIKAMATSU and Eiji HATO