

個人位置情報を用いた利用経路および交通機関の推定手法に関する研究*

Study of estimation of travelers' modes and routes with personal position information*

井料隆雅**・小根山裕之***・Edward CHUNG****・桑原雅夫*****

By Takamasa IRYO**・Hiroyuki ONEYAMA***・Edward CHUNG****・Masao KUWAHARA*****

1. はじめに

この研究では、PHSなどの位置測定ツールを用いることによって得られた位置情報から、そのツールを所持していた人の利用した経路と交通機関をどのくらいの精度で推定できるのかについて理論的考察を行い、その結果を実際に測定された位置データを用いて確認することを行う。

PHSやGPS内臓型携帯電話などの携帯型の位置測定ツールの普及はめざましいものがある。これらの機器によって被験者の時空間上の物理的な軌跡の情報を直接知ることが出来るが、被験者の利用した交通機関の種類などの物理的位置以外の情報を取得するためには、被験者の軌跡と、各交通機関が時空間上に描く軌跡（交通機関の軌跡）とを比較する必要がある。空間情報を用いて利用経路の推定を行った研究はすでに存在する⁽¹⁾が、この研究では、空間情報に加えて時間情報を活用し、被験者の利用交通機関に関する詳細な情報を得ることを目指している。

交通機関の軌跡と被験者の軌跡を比較する際に問題となるのがこれらの情報のもつ精度である。被験者の軌跡には位置測定時の誤差に由来する空間誤差が存在する。交通機関の軌跡は路線およびダイヤ情報から推測されるが、この際、ダイヤ情報の限界やダイヤの乱れなどによる時間誤差や時間情報の欠落が発生する。この研究では、このような誤差があ

る場合に適するマッチングの方法について提案し、その効果と限界に関する解析を、理論的方法および実測データを用いた実証的方法の両方から行った。

2. 交通機関の推定手法の概要

ここで提案する交通機関の推定方法の基本概念は、交通機関の軌跡と被験者の軌跡との「距離」を定義し、その距離が十分小さい場合に、被験者はその交通機関を使用したとする、というものである。

交通機関の軌跡は、その交通機関がどの位置にいるかがすべての時刻において完全に既知であれば、時空間上の1本の曲線として示される。この軌跡を以降では「計画線」と呼ぶ。

位置測定装置により観測された被験者の軌跡は、一般には時空間上の点の集合として示される。これらの点を「観測点」と呼び、その集合を「観測軌跡」と呼ぶことにする。観測軌跡は被験者1人に対して1組設定される。

計画線と観測軌跡の間の距離を計算する際には、時空間上における点と線の間の距離を定義する必要がある。この研究では、「観測点は時間方向の誤差を持たない」と考え、図1のような「観測点と計画線間の空間方向の距離」を観測点と計画線との距離と定義する。観測軌跡と計画線の距離 d は観測軌跡の中の各観測点 i (N 個存在するとする) における計画線との距離を d_i としたとき、

$$d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (1)$$

と定義される。この距離を以降では「平均距離」と呼ぶ。計画線が時間方向に有限の範囲にしか存在しない場合は、計画線が存在する時間帯に存在する観

*キーワード：PHS、位置情報、位置測定

**正員，博士（工学），神戸大学工学部建設学科
（神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL:078-803-6360，
E-mail:iry@kobe-u.ac.jp）

***正員，工修，国土交通省国土技術政策総合研究所

****正員，Ph.D.，東京大学国際・産学共同研究センター 客員教授

*****正員，Ph.D.，東京大学生産技術研究所 教授

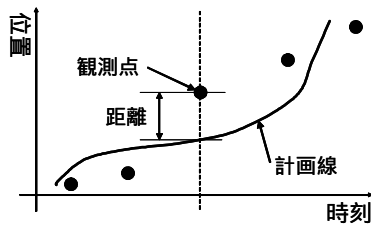


図1 計画線と観測点の間の距離

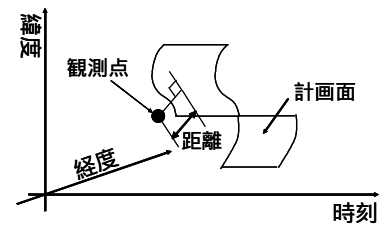


図2 計画面と観測点の間の距離

測点のみを計算の対象とする。また、観測軌跡と計画線が時間軸方向に全く重複しない場合には、これらの間の平均距離を無限大とする。

ここで定義した「平均距離」は、計画線と観測軌跡が一部でも乖離すると大きい値をとる。よって

- ・ 平均距離が短い 被験者は計画線が示す交通機関の「全区間」を利用した。
- ・ 被験者は計画線が示す交通機関の「一部区間」しか利用していない 平均距離が長い。

となることに注意する必要がある。

「計画線」にある程度の自由度を持たせたものが「計画面」である。多くの交通機関については、正確な計画線の情報を得ることができない事態がしばしば発生する。鉄道の場合、通常の情報源から知ることができるのは各停車駅における出発時刻のみであり、駅間の軌跡を正確に決定することは困難である。「計画面」は、計画線が通過する可能性のある領域をすべてカバーする面であり、時空間上の平面として、たとえば図2のように設定する。観測点と計画面との距離は、計画線の時と同様に点と面との空間距離として定義される。

ある計画線（面）が実際に観測軌跡を生成した被験者によって利用されたか否かの判断の境界となる平均距離のしきい値は、観測機器の特性や計画線（面）の正確度によって変動する。このため、このしきい値は各測定に対して予備測定を実施することにより決定する必要がある。

3. 推定手法の理論的解析による評価

ここでは、前節で示した推定手法がどの程度の効果を持つのかについて、簡単なケースを理論的に考えることにより評価することを行う。

計画線と観測軌跡の間に有限の距離が設定されるのはこれらが時間的に重複している場合のみである。

そこでここでは、移動速度 v のサービス1と移動速度 u のサービス2が全く同じ時間帯（時刻 T から時刻 $T + \Delta T$ まで）に近接して存在し、被験者はそのうち一方を利用した、という状況を考える。そして、各サービスに対応する計画線と観測軌跡を考え（図3）、それらの間の平均距離を観測機器のもつ測定誤差を考慮した上で計算することを行う。なお、位置測定は時刻 T から時刻 $T + \Delta T$ までの間に測定間隔 Δt で N 回（ $\Delta T = N\Delta t$ ）行われるとし、 i 番目の測定回での誤差を e_i で示す。なお e_i は確率変数であり、その期待値は0であるとする。

観測軌跡と計画線の平均距離を求める。いま、被験者が図3の計画線1で示されるサービスを実際使用していたとする。このとき、この被験者の観測軌跡と計画線との平均距離の二乗 d^2 の期待値は

$$E(d^2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(e_i^2) \quad (1)$$

と示される。一方、この被験者の観測軌跡と計画線2との間の平均距離の二乗 D^2 の期待値は、サービス間の速度差 $\Delta v = u - v$ を考えて、

$$\begin{aligned} E(D^2) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E\left(\left((i-1)\Delta t\Delta v + e_i\right)^2\right) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (i-1)^2 (\Delta t\Delta v)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(e_i^2) \\ &= (N-1)(2N-1)(\Delta t\Delta v)^2 / 6 + E(d^2) \\ &= (\Delta T\Delta v)^2 / 3 + E(d^2) \end{aligned} \quad (2)$$

と示される。

この2つの距離の差が十分大きいとき、すなわち

$$(\Delta T\Delta v)^2 \gg E(d^2) \quad (3)$$

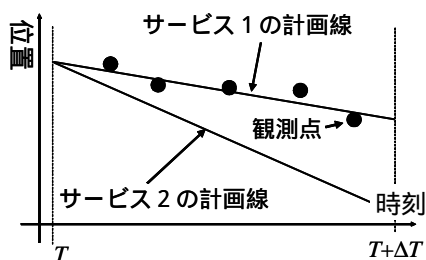


図3 速度の異なる2つの計画線

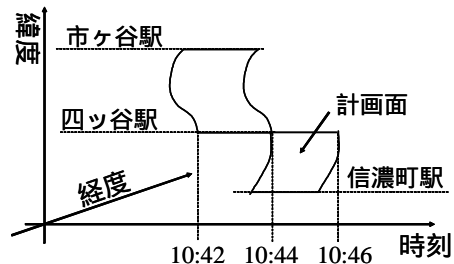


図4 中央線の列車の計画面の例

が成立する時には、被験者が利用したサービスの計画線と、そうでないサービスの計画線とでは、平均距離が大きく異なってくるので、平均距離を用いて被験者の利用した交通サービスを特定することが可能になる。式(3)の両辺の平方根をとることにより、最終的に

$$[\text{計画線の長さ}] [\text{速度差}] \gg [\text{測定誤差}] \quad (4)$$

という関係を、平均距離を用いて被験者の利用した交通サービスを正確に特定するための条件として得ることができる([計画線の長さ] = [計画線の時間方向の長さ] の意味)。

4. 推定手法の実証データによる検証

前節で示した推定手法の性能を検証するために、この研究では、実際に位置測定装置を用いた実証試験を行った。

実証試験はJR中央線の御茶ノ水から新宿の間で行った。被験者は位置測定装置を所持し、あらかじめ指定された計画に従って当該路線を走行する緩行列車および快速列車、また中央線に平行して走行する地下鉄南北線(飯田橋~四ッ谷)に乗車した。実験は平成15年3月に行った。のべ被験者人数は7名であり、その結果7本の観測軌跡が取得された。総実験時間は列車待ち合わせおよび休憩時間を含めてのべ42時間であった。

位置測定装置として今回は(株)都市交通計画研究所のPEAMON(PHSを用いた位置測定システム)を用いた。測定間隔は15秒おきに設定した。

実験対象時間帯にJR中央線を走行する全列車サービス(緩行および快速)を示す計画面を作成した。計画面は御茶ノ水駅から新宿駅までの各駅について、

互いに隣接する駅の位置と出発予定時刻を囲む四角い面が連続したものと作成した。図4にこの例を示す。この図には市ヶ谷駅を10時42分に出発し四ッ谷駅を10時44分に出発する電車の計画面が含まれているが、この計画面は、市ヶ谷駅を10時42分から44分に出発し四ッ谷駅に10時42分から44分に到着する鉄道路線上に存在するすべての計画線を含んでいる。すなわち、この電車の駅間の加減速度や四ッ谷駅での停車時間がどのようなものであっても、すべてこの計画面によって表現することが可能である。

各電車の出発予定時刻は市販の時刻表を用いて、御茶ノ水から新宿までの各駅について分単位で設定した。快速の通過駅における通過時刻については、快速の停車駅間の所要時間を駅間距離で比例配分して計算された通過駅間の所要時間を用いて推定した。

この実験により測定された全観測軌跡の空間分布図を図5に示す。各観測点は列車の線路から数10~数100m程度の幅をもって分布していることが分かるので、各観測点の測定誤差は100mのオーダーであると推測することができる。

式(4)を検証することにより、今回の実験において被験者が利用した列車が正確に特定できるかどうかを確認しよう。いま、計画線の長さ(御茶ノ水新宿間の所要時間)が約10分、緩行と快速の速度差は約20km/hであり、この積は3.3kmであるので、式(4)より測定誤差がkmのオーダーに比べて十分小さければ今回の方法で被験者の利用した列車を正確に特定できることがわかる。今回の測定誤差は100mのオーダーであり、kmのオーダーに比べて1つ桁が小さいので、今回の実験ではある程度は被験者が利用した列車を特定できることが期待される。

各観測軌跡と各計画面との間の平均距離を計算し、その平均距離に対してしきい値を設定し、そのしきい値以下の平均距離を持つ列車を被験者が利用した

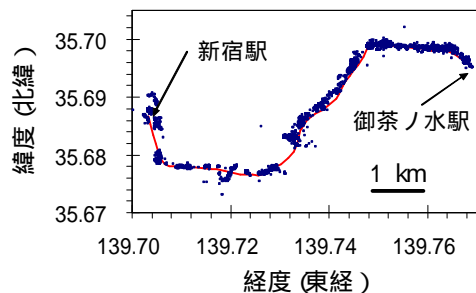


図5 観測軌跡の空間分布

列車として抽出した。理想的な状況であれば、適切なしきい値によって、「被験者が利用した列車（利用列車）」は総て抽出され、「被験者が利用しなかった列車（非利用列車）」は全く抽出されなくすることが可能であるはずである。しかし、実際には誤差の存在により、どのようなしきい値を設定しても「利用列車を100%抽出できていないにも関わらず、抽出した列車の中に非利用列車が混入してしまっている」という状況になってしまう。そこで、各しきい値における抽出の正確性を示す指標として、そのしきい値によって総利用列車の何%の利用列車を把握できたか（把握率）と、全抽出列車の中の何%が利用列車であったか（正答率）の2つを計算した。図6に今回の実験における把握率と正答率の値を示す。これより、しきい値を適切に設定すれば、把握率80%で正答率85%を確保できることがわかる。

測定誤差が低下したときの抽出の精度の低下はどうなるだろうか。このことを調べるために、各観測点の空間座標に乱数で人為的に誤差を加えた後に抽出処理を行い、把握率80%の際の正答率を調べた。結果（図7）を見ると、3 km程度以上の誤差が加わると急に正答率が下がることが確認された。

以上により、理論式の結果から期待されたように、今回の実験の条件で、被験者が利用した列車をある程度把握できることと、測定誤差がより悪化した際に推定精度がどう下がるかを確認できた。

5. まとめと展望

この研究では、位置測定装置から得られる情報と、予め知られている交通機関の運行予定を用いることにより、位置測定の被験者が利用した列車など

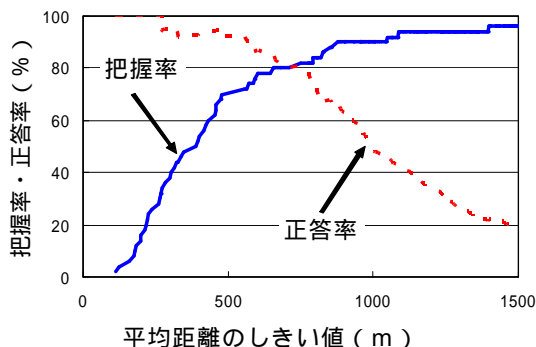


図6 しきい値と把握率・正答率の関係

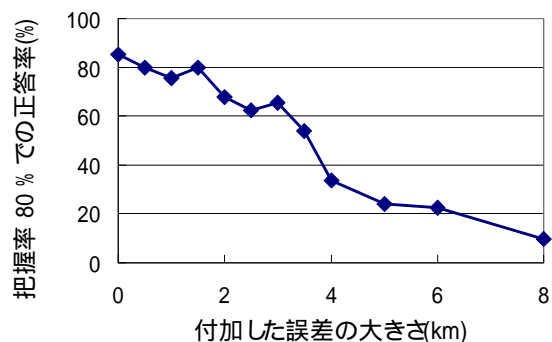


図7 付加誤差の大きさと正答率の関係

の交通サービスを特定する方法について提案し、その精度について理論的解析および実データによる検証を行った。その結果、JR中央線における例では、位置測定精度数100m程度という位置測定装置を用いることにより、ある程度の精度で利用された列車を特定することが可能であることを理論的解析から予測し、その予測が正しいことを実データで確認することが出来た。

今後の課題としては、自動車などの運行予定の存在しない交通機関に対する手法の構成と、精度の悪い抽出結果しか得られなかった場合に、被験者の行動の連続性を考慮して不明な部分を補完していく手法の構成とが挙げられる。

参考文献

- 1) 朝倉康夫, 羽藤英二, 大藤武彦, 田名部淳: PHSによる位置情報を用いた交通行動調査手法, 土木学会論文集, Vol. IV-48号, pp. 95-104, 2000