# 径路誘導システムにおける旅行時間の予測

辻　紘良・高橋理一・川島弘尚・山本芳嗣

## まえがき

工業技術院の大型プロジェクトである「自動車総合管制技術の研究開発」の一環とし，径路誘導システムの開発が行なわれた．このシステムは最適径路情報をドライバーへ伝達し誘導することにより，都市内の交通問題改善を目ざす新しい管制手段であり，各国でも同様なシステムの開発が進められている．交通混雑緩和や事故・大気汚染の低減など目的によって方策が異なるが，情報収集の制約や制御の可能性，誘導効果の点から個々の車の旅行時間を最小にすることによって，交通流の円滑をはかるシステムを設計することが実際的である．

ところで，誘導の正確さを期すためには旅行時間の予測が欠かせない．それは，１つには誘導そのものに由来することであるが，車が情報提供を受けた後経由するであろう径路の交通流変化をあらかじめ誘導情報に織込んでおかねばならないからである．他の１つは，情報処理プロセスの制約によることであるが，情報収集から提供までの間に伝達遅れが生ずることによる．

上記のプロジェクトにおいて，筆者らは予測システムの設計に携わることになったが，その当時は街路における旅行時間の様子があまり知られていなかったことに加え，予測研究はほとんどといってよいほど行なわれていなかった．このため，いくつかの疑問にぶつかりそれらを解明する必要があった．たとえば，旅行時間の予測システムとしてどのような設計方針で望むべきか，どのような予測手法が適するか，誘導システムにとってどの程度の予測精度を出さねばならないか．あるいは現在値の推定とデータ補完をどうするか，などである．また，個々の車の旅行時間は平均値のまわりをある確率分布でバラついているが，予測誤差とあいまって誘導の効果を下げる原因となっている．代替径路間の旅行時間差が大きければ，これらの影響はさほど問題にならないが，実際はあまり大きくないため予測効果を評価するうえで，これらの関連を明らかにする必要があった．

このため，事前に旅行時間調査をくり返し行ないデータを収集し，実態の把握とともに問題の解明に努めた．とくに実験システムの稼動開始後，広域かつ長期にわたり大量の旅行時間データが収集されたことにより，誘導の効果に関することも含めいくつかの解答が明らかにされたので，ここではそれらの概要を紹介することにしたい．

## 1.　旅行時間の推定

予測の入力情報とし旅行時間の現在値を精度よく推定することが先決となる．さいわい，径路誘導システムは車と地上施設間の通信機能を有する

つじ　ひろよし　㈱豊田中央研究所
たかはし　りいち　㈱豊田中央研究所
かわしま　ひろなお　慶応義塾大学
やまもと　よしつぐ　東京工業大学

ため，一対の通信ループ間の旅行時間を収集することが可能である．これはアークコストとよばれていて，街路小区間であるアークの交通流に関する空間情報をもたらすため，渋滞や遅れを端的に推定でき，混雑緩和をはかるうえできわめて有効な情報となる．なおシステムの道路網はアークを最小単位として構成されている最短時間径路が探索される．ODとよばれる出発地 (Origin) と目的地 (Destination) の組合せすべてについて最短径路を求めることは処理時間が大きくなりオンラインシステムでは処理不可能なため，アークの近くは正確に，遠方になるに従い簡略化した道路網構成となる縮退ネットワークが用いられる．これによって解の精度を失わない程度の近似値が求められ，計算時間の短縮がはかられる．

径路情報は約15分を1周期とし更新され，交通流変化への対応がはかられる．情報収集はこの1周期が最小単位となり，周期内に収集された旅行時間データにもとづいて当該周期の旅行時間を推定する．周期内の交通流変化が小さく，かつアーク走行時間の分散が小さい場合は平均値をもって代表値とみなすことができるが，とくに周期内に収集されるデータ件数の少ない場合は推定の信頼度が下がるため，データの必要個数に対する統計的な評価が必要となる．そこで観測データにもとづき，1周期当りのデータ個数 ($n$) をパラメータにとり乱数抽出し，1日の推定誤差を求めた．その結果ほぼ $1/\sqrt{n}$ に比例することが認められ，統計学でよく知られている結果と一致した．同じ方法により予測誤差を求めると，やはり $1/\sqrt{n}$ に比例する傾向にあるが，周期当り6個以上抽出しても予測誤差の下がらないことが認められ，この程度の個数が収集の目安になると判断される．誘導の効果もデータ個数が増えるに従い上昇し，データが5個収集されれば初期の目標をほぼ達成できることが確認されている．この収集条件を満足するためには，通常の街路交通流において装置搭載車の混入率が右左折アークでは40%以上必要となり，システム普及初期にはソフト処理によるデータ補完かあるいは他のハード手段による補完策を講ずる必要がある．後者については，車両感知器によって収集される交通量または占有率を用いて旅行時間を推定する方法が実際的である．そこで感知器データにもとづいて旅行時間を推定する方法を検討した結果，仮想行列長を求めるモデルや車追従方程式より導かれるモデルにより，都内天現寺→西麻布の実験区間において推定誤差が10%前後とよい精度の得られるモデルの開発が進められた[1]．これを直ちに一般街路へ適用するにはまだ未解決の問題が残されていて不十分だが，将来のシステム設計に際し，データ不足を補なう有効な手段として可能性が開けたものと考えている．

ところで収集されたデータには個々の走行履歴が含まれているため，時によっては異常なデータの混入する場合がある．この原因は走行途中の一時停車や誘導道路網以外の径路を迂回することによる遅れ等が含まれることによるものであって，推定上のノイズとなるためアーク個々の走行特性に応じフィルターをかけて落としておかねばならない．データ件数の少ない場合は，渋滞による遅れか上記原因による遅れかの判別が難しいことが改めて認識されていて，将来は停車時のドア開閉と連動させて渋滞と停車を判別する等ハード的対策を考慮すべきと考えている．

## 2. 旅行時間の実態

実験によって得られた大量データの解析を通して，アークやルートの旅行時間の振舞いに関していくつかの興味ある事実が明らかになった．その中からいくつかの結果を以下に示す．

アークに関しては，その平均旅行時間は約2分，周期内の分散割合は約20%，連続する周期の階差は約20%であって比較的アークコストが小さいのに対し，大きな鋸歯状の時系列パターンになっていることがわかる．日にちの差異による偏差

割合は20%以下のアークが多く，時系列変化に再現性が認められたため，過去統計値を予測の補助情報に用いれば効果があがることが期待される．時系列パターンは業務交通と通勤交通タイプにおよそ分類され，さらに関連するアーク間に相関性が認められるので，道路網の構造を用いた予測も可能であることがわかった．

アークコストの時系列構造は原系列 $A(t)$ の階差をとった時系列の自己相関関数が零に収束し，自己回帰定常過程とみなせるので，もとの $A(t)$ は積分型自己回帰モデル ARI $(M,n)$ であるといえる．

$$Z(t)\equiv\nabla^{M}A(t),\quad Z(t)=\sum_{j=1}^{n}a_j\,Z(t-j)+\varepsilon(t)$$

ただし， $\nabla^{P}A(t)=\nabla^{P-1}A(t)-\nabla^{P-1}A(t-1)$, $\nabla' A(t)=A(t)-A(t-1)$, $\varepsilon(t)$ は白色ノイズ, $M$, $n$ は階差および自己回帰係数の次数である．

径路の旅行時間(径路長5～10km，以後ルートコストとよぶ) については，その分散割合は平均6％であるが，径路長や径路を構成するアーク本数の増加に従い減少する傾向が認められた．そこでアークの本数と分散割合の関係を調べるために回帰分析を行なったところ，つぎのような結果を得た．

$$\tilde{\sigma}_R=\tilde{\sigma}_A/\sqrt{n}=21.4\frac{1}{\sqrt{n}}$$

(寄与率＝0.81，RMS＝4.4)

ただし，$\tilde{\sigma}_R$, $\tilde{\sigma}_A$ はルートコストおよびアークコストの分散割合(％)，$n$ はルートを構成する本数である．上式よりルートコストの分散割合はアークコストのそれの $1\sqrt{n}$ に比例することがわかる．

最短時間径路の変動については，1ＯＤ当たり，第3最短径路までの出現頻度は高いが，同一最短径路の持続性は短く，多くは2～3周期後に最短径路が入れ替る．変更前後の2つの径路が共有しているリンクの割合は約40％であって，比較的径路が分離されている．径路変更に強く影響するアークは主要幹線上の長いアークでしかも直進アークに多くみられた．最短時間径路と最短距離径路はほとんど一致しないが，距離の差は10%増と大きくなく，時間が短縮されたからといって走行距離が大幅に増えることはないこと，などがわかった．

誘導マージンとよばれる代替径路間の旅行時間差は，システムの可能利得を表わすためその大小がシステムにとって最大の関心事となる．実測データを用いていくつかのＯＤについてマージンを求めてみると，第1と第2の最短時間径路のマージンはＯＤ距離が長くなるに従い単調に減少することがわかった．そこで，個々のアークコストが一様分布に従うネットワークにおいて，第1と第2径路のマージンの期待値を推定する確率モデルをたてると次式となり，出発地から数えて第1径路上の何番目のノードであるかを示す数 $n$ が大きくなるに従い，マージンの期待値は減少することが示された．

$$E(\delta(n))\leq\varepsilon+(\Delta-\varepsilon)\,p^{n}[X>\varepsilon]$$

$\delta(n)$：出発地から第 $n$ 番目のノード $D_n$ までの第1と第2最短径路のマージン

$E$：期待値

$X_i$：$D_{i-1}$ から $D_i$ へいたるマージン

$p[X>\varepsilon]$：$X$ が $\varepsilon$ より大なる確率

$\Delta$：$X$ のとり得る上界

これは遠方になるに従い代替径路の本数が増えることによるもので，道路網が密な都市内では強い減少の傾向にあることを示す．ただし，実環境におけるマージンは非誘導車の情報不足が手伝って必ずしも上記のように減少はせず，マージンが大き目に現われるとみてよい．

## 3. 旅行時間の予測

交通流状態を予測する方法には大別して，道路網構造を加味し交通量やＯＤ量からシミュレータを用いて決定論的に求める方法と，単にアークの過去データから時系列的に求める方法とがある．前者は車の流れの因果関係を追跡するため予測精

度を上げ得る可能性があるが，情報収集が多岐にわたり処理が複雑になるため都市街路の予測システムには向かないと判断し，後者を中心に研究を行なった．

交通流は輻輳する社会現象を反映するため，多様な変化を呈するが，それらは大まかにつぎのように分類される．

a. 道路環境による変動（通勤，業務交通等）

b. 周期的な変動（曜日，祝祭日，五十日，盆暮，2月，8月等）

c. 特異変動（事故，工事，催物，交通スト，天候異変等）

これらの要因の因果関係を定量的に捉えるには相当の期間データを蓄積しなければならない．そこで，旅行時間の時系列変化をつぎのように単純化して考えることにした．

$$旅行時間時系列=\begin{cases}定常パターン+誤差項\\非定常パターン+誤差項\end{cases}$$

定常パターン　：道路環境，周期的変動によるもの

非定常パターン：特異変動によるもの

誤差項　　　　：車の挙動によるゆらぎや観測誤差等統計的法則をもった誤差

統計処理が可能な定常変動の場合は時系列解析によってさらに構造を分析し，前記の ARI$(M,n)$ で表わされることを明らかにした．実際には2回階差をとれば十分定常過程とみなせることがわかっている．そこで，時系列パターンへの適応性を比較するため，ARI 予測の他，パターン認識予測，適応型指数平滑予測をつぎに示す理由から選択した．

ARI 予測：時系列構造による．

パターン認識予測：パターンの再現性より，代表的なパターンをいくつか用意すれば，当日値に適合できる．

適応型指数平滑予測：当該周期の特異変動に適合できる．

パターンに再現性があるから，当日値に加え過去情報を補助情報とすれば効果を上げられると期待される．そこで，当日値と過去統計値の差を偏差と定義し，この時系列を予測する方法と，生情報から直接予測する方法を比較検討した[4]．偏差や階差の大きさにより当日値を分類し，これと各手法との関係を調べたが差は認められず，むしろ手法そのものに差があり，ARI 予測が最もよいことがわかった．ARI 予測では時系列手法の欠点である時間遅れを避けることはできないが，過去統計値を用いた偏差予測を行なえば改善することができる．この方法による2周期先きの予測誤差はアーク平均で21.2%となった．しかし特異変動が発生する場合は時系列予測では限界があるので，偏差量を判定閾値とし，この値によっては現在値をそのまま予測に用いる方法を考えた．シミュレーションによって検討した結果，偏差量が小さい場合は過去統計値を用いたほうが誤差が小さく安定する傾向があり，効果が上がることが確認された．この方法を組合せた予測システムを設計すれば，2周期先の予測誤差は20%になるものと推定している．アークコストの分散割合が20%であるから，誤差20%は一種の予測限界であると考えられる．一方，非定常の場合こそ予測が必要であるという認識から，道路網構造の連関性から予測を行なうなど，いくつかのアプローチを試みたが，今のところ肯定的な解答を得ていない．

なお，ARI 予測の基礎となる，係数パラメータの推定に関しては新しいアルゴリズムを開発し，計算量を減少させることができた[5]．また ARI 過程の次数決定には予測平方和(Prediction Sum of Squares)を使って行ない，時系列の構造を決定する作業を自動化するまでになった[6]．

## 4. パイロット実験結果

前記の背景と本実験以前に得られた結果をもとに，つぎに示すフレームワークのもとで実験システムの予測方式を設計した．情報収集の可能性お

(偏差割合判定)── $\tilde{D}_t > \tilde{h}_2$ ────→現在値予測

(偏差割合判定)── $\tilde{h}_2 > \tilde{D}_t > \tilde{h}_1$ ──(偏量トレンド判定)── $\rho_1 \leqq |\rho_t|$ ──→線形回帰予測

(偏差割合判定)── $\tilde{h}_2 > \tilde{D}_t > \tilde{h}_1$ ──(偏量トレンド判定)── $\rho_1 > |\rho_t|$ ──→2次指数平滑予測

(偏差割合判定)── $\tilde{D}_t \leqq \tilde{h}_1$ ────→過去統計値予測

**図 1　パイロット実験システムの予測方式**

よび処理時間の制約を配慮し簡単なシステムとした．設計後の各種要請に対応し得ることと，アーク個々の特性にマッチし得ることをねらいとし，いくつかのパラメータを設け仕様に柔軟性をもたせた．収集データの数不足が予見されていたのでソフト的な対応に加え感知器情報を用いたデータ補完策を講じた．また異常データの除去処理に配慮した．予測アルゴリズムは時系列法を用いた偏差予測としたが，偏差の大小や傾向によって予測手法を使いわけることをねらい，評価量の判定閾値を用いて組み合わせた予測システムとした．これをわれわれは適応判別型予測システムとよんでいる(図1)．予測システムの供用に際しては，実測データにもとづき各種パラメータを全面的に更新した．

その結果誘導実験における予測誤差ならびに誘導の効果は，データ件数が5個と比較的多く収集された場合は表1に示すようであり，プロジェクトの初期の目標を達成することができた．

なお実験によってはじめて，ルートコストの相対予測誤差はルート距離やルートを構成するアーク本数の増加にしたがって減少するという興味深い事実が得られた．アークコストの予測値が真値のまわりにランダムに分布していると仮定し，前述の分散について行なったのと同様な推論を立てることによりアークとルートの予測誤差の関連を定式化できる．ルートを構成するアーク本数を変

**記号**　$\tilde{D}_t$：第 $t$ 周期の偏差割合
$\tilde{h}_1, \tilde{h}_2$：偏差割合判定閾値 ($\tilde{h}_1 < \tilde{h}_2$)
$\rho_t$：偏量トレンド（偏差コスト時系列の相関）
$\rho_1$：偏量トレンド判定閾値

数にとりアークコストの予測誤差とルートコストのそれについて，実データを用いて回帰分析を行なうとつぎに示す結果が得られ，ルートコストの予測誤差はアークコストのそれの $1/\sqrt{n}$ にほぼ比例することが認められた．

$$\tilde{\delta}_R = \tilde{\delta}_A / \sqrt{n} = 26.2/\sqrt{n}$$

（寄与率＝0.37, RMS＝9.6）

$\tilde{\delta}_R$, $\tilde{\delta}_A$：ルートコスト，アークコストの予測誤差(%)

## 5. 誘導システムにおける予測の評価

システムの効果を表わすものには，誘導精度と旅行時間短縮率の両者がある．前者は誘導車が非誘導車に比べ何割の台数が目的地へ早く到着するかを示す値で，誘導性能を表わす尺度となる．後者は誘導車が非誘導車に比べ何割だけ旅行時間が短縮されたかを表わす尺度で，誘導効果を表わす尺度となる．これら尺度は，径路間の誘導マージンと誤差要因である予測誤差ならびに走行分散の値がわかれば推定可能となる．一般に誘導マージンが大きければ誤差要因はとりたてて問題にならないが，誘導実験の結果からマージンはさほど大

**表 1　予測誤差と誘導効果**

| アークコスト予測誤差 | ルートコストの予測誤差注1) | 誘導精度注2) | 旅行時間短縮率 |
|---|---|---|---|
| 23.8% | 9.8% | 84% | 11% |

注1）予測誤差は2周期先きの誤差，4ODに関連する全アークの平均を示す．
注2）誘導精度は2台を1チームとし同時にスタートさせ誘導車が非誘導車より早く目的地へ到着した割合を示す．

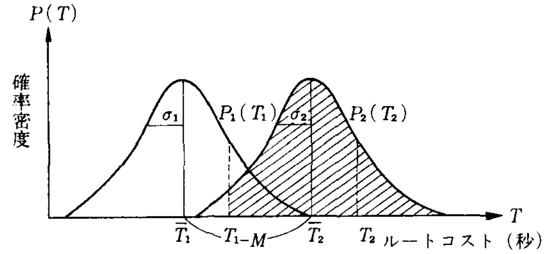


図 2　ルートコストの分布

きくないことが知られたため，これらの関係を定式化し説明づけることが懸案の課題となった．そこでつぎの考え方により簡単な推定モデルを作成し検討を行なった[7]．

車1台1台の旅行時間は平均値のまわりをある確率分布に従ってランダムにばらついている（図2参照）．また予測値もある平均値のまわりに分布する確率変数の実現値と考えることができる．そこで，両方の確率変数を同時に考慮したときの誘導精度($\gamma$)を次式によって定義することにした．

$$\gamma=PQ+(1-P)(1-Q)$$

$$P=\iint_{T_2\geq T_1} p_1(T_1)p_2(T_2)\,dT_1dT_2$$

$$=\int_0^\infty p_1(x)[1-F(x)]dx$$

ただし，$F(x)=\int_0^x p_2(T_2)dT_2$

$$Q=\iint_{\tau_2\geq\tau_1} q_1(\tau_1)q_2(\tau_2)d\tau_1 d\tau_2$$

上式の$\gamma$はいわゆる誘導の勝ち割合を表わしており，$1-\gamma=\bar{\gamma}$は誘導誤差を表わしている．この$\gamma$により，たとえば正しく最短経路を誘導したにもかかわらず走行分散のため他の径路を走行した車のほうが早く目的地へ到着した場合や，またその逆の場合等をすべて含めた誘導精度を求めることができる．旅行時間短縮率についても，両者が確率分布をなすことを前提に次式により求められることが示される．

$$\beta=1-\left\{QT_1E\left(\frac{1}{T_2}\right)+(1-Q)T_2E\left(\frac{1}{T_1}\right)\right\}$$

ただし，$E\left(\frac{1}{T_i}\right)=\int_0^\infty\left(\frac{1}{T_i}\right)P_i(T_i)dT_i \quad (i=1,2)$

記号

$P_i(T_i)$：第$i$最短径路のルートコストが$T_i$であるときの確率密度関数

$q_i(\tau_i)$：第$i$最短径路のルートコスト予測値が$\tau_i$であるときの確率密度関数

$\bar{T}_i$：第$i$最短径路のルートコスト平均値

$M$：誘導マージン($=\bar{T}_2-\bar{T}_1$)

$\sigma_i$：第$i$最短径路のルートコスト分散

誘導マージンは車の径路選択率が求められないと決まらないが，一般的には測定できないため，ここでは誘導実験結果を参考に仮に15％と設定し，誘導実験データにもとづいて上記推定式の検証を行なった．なお予測値とルートコストの分布はともに正規分布を仮定し計算した．この結果，$\gamma=84\%$（実際値84％），$\beta=10\%$（実際値11％）と比較的計算値が実際値によく一致したので，モデルの妥当性があると考えている．これまでに述べた推定モデルを用いることにより，アークコストの分散割合や予測誤差が与えられればルートコストの分散割合や予測誤差が推定でき，さらに誘導マージンを与えることにより誘導精度や旅行時間短縮率が推定できる．その結果，たとえば予測精度の向上が誘導効果の改善率にどう影響するかを推定できることになる．

そこで，予測精度が限界と思われる20%を達成した場合の誘導効果を，予測を行なわない場合，つまり現在値をそのままシフトし予測をする場合の効果を基準にして比較すると表2に示す結果となった．少ないとはいえ予測により誘導精度が5％改善できることがわかる．逆に言えば，シフト予測によってもかなり誘導の効果が得られることから，ともかく精度よく現在値を収集することが先決であり，ついで誘導マージンが大となる非定常渋滞発生時における精度のよい予測手法の開発が重要な課題になると考えられる．一方，最良予測の誘導精度は90％であるが，今までの考察からこの値が実験システムにおける上限ではないかと思われる．

**表 2** 予測の効果推定

| | 予測誤差 | | 分散 | | 誘導効果の指標 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | アークコスト | ルートコスト(推定値) | アークコスト | ルートコスト(推定値) | 誘導精度 $(\gamma)$ | 旅行時間短縮率 $(\beta)$ |
| ①最良予測 | 20 | 6.3 | 20 | 6.3 | 90 | 11.4 |
| ②シフト予測 | 27 | 8.5 | | | 85 | 10.2 |
| 予測の効果 ①−② | −7 | −2.2 | —— | | 5 | 1.2 |

注1) 誘導マージンは15%とした.

注2) ルートを構成するアーク本数は10本(平均トリップ長8 km/平均アーク長800 m)とした.

なお,誘導精度や旅行時間推定モデルに関しては任意本数の径路への拡張や,車の径路選択率を取り入れて一般化したモデルを作成し,実験データを用いて検証を行なっているが,これについての紹介は別の機会にゆずりたい.今後,誘導マージン推定の研究が進めば,システムを導入する際に,これらの推定モデルを使って適正規模の見積りや事前の効果評価が可能になると思われる.

## あとがき

以上に述べた都市内の実験や大量データの解析を通して,将来の実システムへ向けての旅行時間予測システムの設計指針と径路誘導システムにおける予測の意義を明らかにできたものと考える.今後の課題としては,非定常状態の予測手法の開発が重要となる.このためには,時系列予測では限界があり,道路網の連関性をとらえた予測の可能性追求が有効になると思われる.また今回は検討しなかったが,将来普及率が上がればシステム自体の制御の影響を予見できるため,OD配分アルゴリズムを加味して予測を行なう等により精度を上げ得ると考えられる.

旅行時間情報そのものは,街路の渋滞や遅れを的確に反映しているため,信号制御への入力情報とし活用されれば効果を上げ得ると期待される.また可変情報板による渋滞迂回案内のための入力情報ともなり得る等多くの可能性を秘めていて,現在関係省庁にて検討が進められている.すでに成田・京葉道路においてリムジンバスを用いた旅行時間情報の収集実験が行なわれている等の動きがあり,将来各所で実用化が進められてゆくものと期待している.

## 参考文献


[1] 高橋理一,辻 紘良,川島弘尚:車両感知器を用いた市街路旅行時間の推定方式,土木学会第34回年次学術講演会概要集,第4部 132-133(1979)

[2] 辻 紘良,鈴木雅博,山本芳嗣:径路誘導システムにおける代替径路間の等時間性,OR学会中部支部,事例研究発表会 (1979, 10)

[3] G. E. D. Box and G. M. Jenkins : Time Series Analysis-Forecasting and Control, Revised Ed. Holden Day (1976)

[4] 辻 紘良,鈴木雅博,川島弘尚:街路におけるアークコストの予測,交通工学研究会研究発表論文集 4, 65-67 (1978)

[5] H. Kawashima : Parameter Estimation of Autoregressive Integrated Processes by Least Squares, Annals of Statistics, 8(2) (1980)

[6] 川島弘尚:改良PSSによるARI型時系列の次数決定について,第11回確率システムシンポジウム講演論文集,99-102 (1979)

[7] 辻 紘良,高橋理一,川島弘尚:誤差要因を考慮したときの径路誘導システムの性能および効果の推定方法,土木学会第34回年次学術講演会概要集,第4部,130-131 (1979)