

高速道路における旅行時間予測に関する研究*

A Study on the Travel Time Prediction for Expressway*

若尾 将徳** 谷口 綾子*** 中辻 隆****
By Masanori WAKAO**, Ayako TANIGUCHI*** and Takashi NAKATSUJI****

1.はじめに

近年、情報通信技術の高度化により、VICS などに代表される高度交通情報システム (ITS) が注目されている。その主な役割の一つが、旅行時間に代表される動的交通情報の提供である。適切な動的交通情報の提供は、高速道路利用者の経路選択、走行計画の変更、調整を容易にし、また交通管制上から、渋滞の緩和や高速道路網の効率的運用、安全で快適な走行につながると期待されている。しかし、現在の旅行時間予測は同時刻における旅行時間をただ単に加算しただけのものであるため、渋滞の延伸、減少時において時間遅れを伴うことが指摘されている。

本研究では、事前に入手した旅行時間データをもとにモデルの同定を行ったのち、観測値として車両感知器で得られた地点平均速度によってフィルタリングを行い旅行時間をリアルタイムに予測することを試みた。

2. モデルの概要

2. 1 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは、時系列 $\{x(0), x(1), \dots, x(k)\}$ が直接正確に測定することができないときに、 $x(k)$ の何らかの関数である測定値 $\{y(0), y(1), \dots, y(k)\}$ を用いて $x(k)$ を推定する手法である。信号 x が時系列であるとする。いま、時点は $k = 0, 1, 2, \dots$ と進み、時点 k における n 次元ベクトル値をとる信号を x_k で表す。ここでは信号 x_k が線形の差分式

$$x_k = A_{k-1}x_{k-1} + v_{k-1} \quad (1)$$

で支配されている場合を考える。式(1)はカルマンフィルタの状態方程式と呼ばれる。 A_k は $n \times$

n の確定行列である。ここに v_k は時刻 k の誤差ベクトルである。

信号 x_k は直接測ることができないが、次のような測定機構を通してえられる出力 y_k (n 次元ベクトル) が式

$$y_k = C_k x_k + w_k \quad (2)$$

のように測れるものとする。式(2)は、カルマンフィルタの観測方程式と呼ばれる。ここに C_k は $m \times n$ の確定行列であり、 w_k は時刻 k の誤差ベクトルである。

カルマンフィルタ理論より、信号 x_k の最小二乗推定量は

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \tilde{x}_k + P_k C_k' W_k^{-1} \{y_k - (C_k \tilde{x}_k + \bar{w}_k)\} \\ \tilde{x}_k &= A_{k-1} \hat{x}_{k-1} + \bar{v}_{k-1} \end{aligned} \quad (3)$$

と求めることができる。ここで、 $\tilde{x}$ はフィルタリング前の推定値、 $\hat{x}_k$ は最も良い推定値である。ここで、初期条件を与えると、順々に測定値 y_k を得るごとに共分散行列 P_k を求めながら $\hat{x}_k$ を求めることができる。こうして、式(3)は信号 x_k の最適フィルタを形成している。

行列 A_k と行列 C_k は以下のような手法を用いて推定している。

2. 2 モデルの同定

(1) A_k の同定

自己回帰モデルは、時系列ベクトル $\{x(0), \dots, x(i), \dots, x(k)\}$ を定義するときそれが、適当な次数の自己回帰過程に従うものと仮定した過去のベクトル $\{x(0), \dots, x(i), \dots, x(k-1)\}$ と現在のベクトル $x(k)$ にどのような関係をもっているのかを推定する手法である。基本式

$$x_k = A_1 x_{k-1} + A_2 x_{k-2} + \dots + A_m x_{k-m} \quad (4)$$

(2.4)式は、「時刻 k の時のベクトルが時刻 $(k-m)$ 間で関係している」ということを表している。本研究においては、 $m=1$ とすることにした。

*キーワード：交通流、交通情報、カルマンフィルタ、旅行時間

**学生員 北海道大学大学院
(札幌市北区北13条西8丁目)

TEL011-706-6215 FAX011-706-6216)

***正員 工修 日本データサービス

****正員 工博 アジア工科大学

(2) C_k の同定

重回帰モデルは、変数 y_k が説明変数 x の重ねあわせで表わされるときに用いられる手法である。式

$$y_k = C_k x_k + w_k \quad (5)$$

は重回帰の基本式であるから、このまま C_k を推定した。

(3) オンライン同定

時刻 $k = N - 1$ までの測定値を得たときの推定量 A_{N-1} が定まっているとき、時刻 $k = N$ における測定値 x_N を得たときの A_N を次の式でオンライン的に求めることができる。

$$A_N = A_{N-1} - \frac{[A_{N-1} z_N - x(N)]}{1 + z_N' P_{N-1} z_N} z_N' P_{N-1} \quad (6)$$

ここで

$$P_N = (Q_N Q_N')^{-1}$$

$$Q_N = \begin{pmatrix} x(n-1) & x(n) & \cdots & x(N-1) \\ x(n-2) & x(n-1) & \cdots & x(N-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(n-m) & x(n-m+1) & \cdots & x(N-m) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$z_N = [x(N-1), x(N-2), \dots, x(N-m)]$$

とおく。

3. 旅行時間の推定アルゴリズム

本研究においては、信号 x_k を旅行時間 (分)、計測値 y_k を地点平均速度とした。

カルマンフィルタによる旅行時間の推定は以下に示すフローに従って、新たな計測値 y_k が得られる度ごとにリアルタイムで状態変数 x_k の推定値を求めることができる。

- (1) 自己回帰モデルの式(4)を使って A_k を算定し状態方程式とする。
- (2) 重回帰モデルの式(5)を使って C_k を算定し観測方程式とする。
- (3) カルマンゲイン K_k を算定する。
- (5) 式(3)から $\hat{x}_k$ と $\hat{\dot{x}}_k$ を算定する

これらの計算を $k=1$ から逐次行い $\hat{x}_k$ を算定する。

本研究では信号 x_k に旅行時間、計測値 y_k は地点平均速度を用いた。

4. 観測データ

4. 1 実測による観測データ

12月9日、11日の午前6:00~午後6:00に札幌南~登別室蘭(102.7km)に出入したすべての車の流入時刻と流出時刻を調べた。また地点速度のデータはこの区間につけられている3カ所の車両感知器から得られた。(図1参照)。シミュレーション対象区間は、道央自動車道の札幌南 I.C から、登別室蘭 I.C の交通量の多い10区間の OD 区間を用いた。

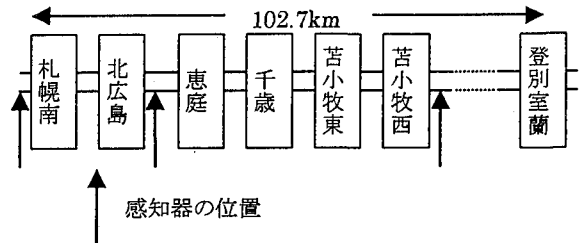


図1 対象区間

4. 2 シミュレーションによる仮想データ

12月9日と11日の2日間いずれも渋滞は出現していなかったため、ここでは米国連邦道路庁で開発されたシミュレーションモデル(FRESIM)を用いて渋滞時を仮定した観測データを作成した。

仮想の観測データは以下の4ケースについて作成した。

- 現状の交通量 (CaseA)
- 現状の1.5倍の交通量 (CaseB)
- CaseBの交通量で感知器の位置をずらす (CaseC)
- CaseBの交通量で感知器の位置を増やす (CaseD)

CaseAにおいて、実測データと全く同じデータを入力データとして、FRESIMモデルでシミュレーションを行い、その出力結果を実測のデータとの比較を行い、FRESIMモデルの検証を行った。

CaseBからCaseDにおいては渋滞時の交通データを作成するために、流入交通量の増加と部分的な車線閉塞を想定した。CaseBは、実測データから得られた12月9日と11日における札幌南と各オンランプの流入交通量を単純に1.5倍に

するとともに7:00~8:00に北広島から9.9km下流の1.5km間を図2のように1車線規制するものとした。CaseCとCaseDはOD交通量に比べ、旅行時間が車両感知器データにより密接に関係していると予想されることから、車両感知器の設置位置と設置数の影響を調べたものである。

CaseCは、交通条件はCaseBと同じであるが、車両感知器の位置のみを図2の点線の矢印で示す通り、閉塞区間により近づけた。

CaseDは、交通条件はCaseBと同じであるが、車両感知器の位置をCaseC同様ずらすとともに、1車線規制の下流に、図2の太線の矢印で示す通り、新たに車両感知器を増やした。

CaseAでシミュレーションモデルの有効性が証明できたので、旅行時間推定はCaseB、C、Dについて行うものとした。

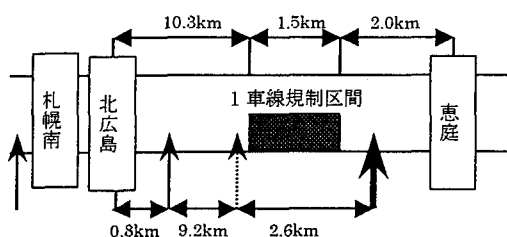
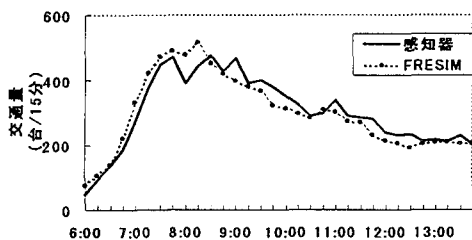
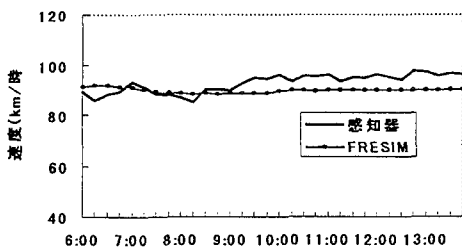


図2 感知器の位置と規制区間



(1) 交通量



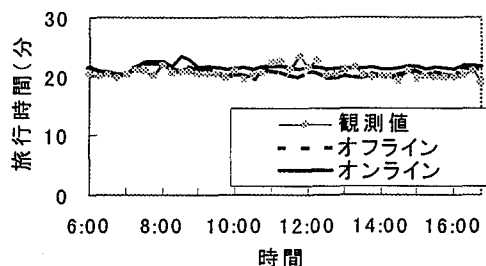
(2) 地点平均速度

図3 CaseAによる北広島-恵庭の検証

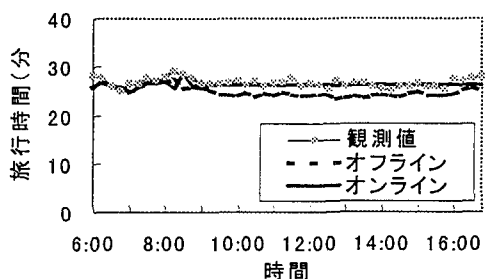
5. 推定結果

5. 1 実測による観測データにおける推定結果

図4はオンライン同定用いていない推定値（オフライン）とオンライン同定を用いた推定値と観測値との比較である。(1)が札幌南-千歳、(2)が札幌南-苫小牧東に対する結果である。図4での12時付近での旅行時間増加はSA・PAでの休憩時間が含まれているからだと思われる。観測データの変動が乏しかったためモデルの有効性は確認できなかったが、オンライン、オフラインともに観測値に近い値となっていたが若干オンラインによる推定のほうが制度が良くなっていた。また推定結果が観測値の動きに追従せず、観測値より小さい値をとっているのは、観測値の旅行時間にSA・PAでの休憩時間が含まれているからと思われる。



(1) 札幌南-千歳



(2) 札幌南-苫小牧東

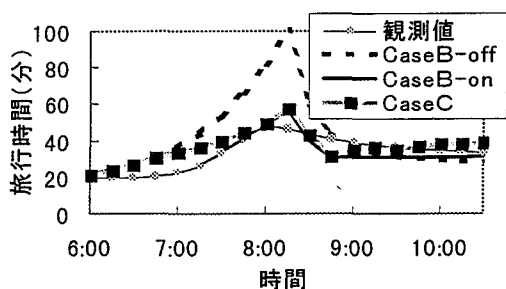
図4 実測データの推定結果

5. 2 仮想データにおける推定結果

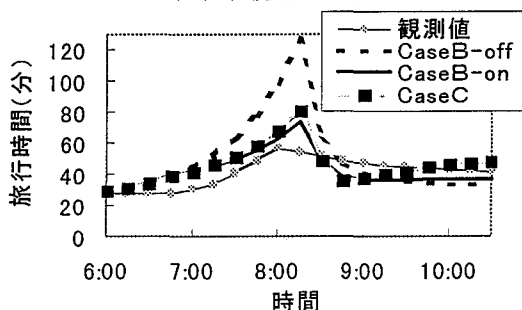
① 感知器の位置の違いによる推定結果

図5は、感知器の位置を現状に即した上で、オフライン (CaseB-off) とオンライン (CaseB-on)、さらに図2のように閉塞区間に感知器を近づけてオンラインによって推定した CaseC による推定値と観測値の比較した結果である。(1)が札幌南-千歳、(2)が札幌南-苫小牧東に対する結

果である。全時間帯で CaseB-off がピーク時に過大な推定を行っているのに対し、CaseB-on においては精度の良い結果を与えている。これは、前の日のデータで決めた状態方程式の係数 A_k が、急激な旅行時間の変化のため大きくなりすぎたのが原因だろうとおもわれる。CaseC においては、ピーク時までは CaseB-on と殆ど変わらないがピーク時を過ぎると、若干 CaseC のほうが観測値に近づいている。これは、渋滞直前の感知器のほう渋滞に敏感に反応しているからではないかと思われる。またどの区間の旅行時間でもピーク時において、15 分の時間遅れがある。



(1) 札幌南-千歳



(2) 札幌南-苫小牧東

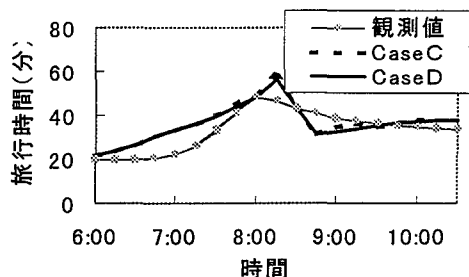
図5 感知器の位置の違いによる推定結果

② 感知器の数の違いによる推定結果

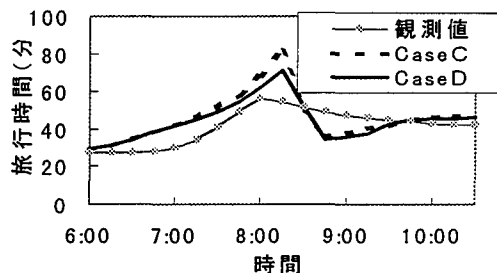
図6は、閉塞区間に感知器を近づけてオンラインによって推定した CaseC と、閉塞区間の後に新しく感知器を設置してオンラインによって推定した CaseD によって推定された旅行時間を観測値との比較した結果である。ピーク時までの時間帯は CaseC と CaseD はほとんど変わらないが、ピーク時後に若干の違いが見られる。

感知器の数を増やした有効性は確認できなかったが、これは増やした感知器の位置が自由流であ

ったため、渋滞部分でない所の感知器は意味がないのかもしれない。



(1) 札幌南-千歳



(2) 札幌南-苫小牧東

図6 感知器の数の違いによる推定結果

6. おわりに

本研究では、実測データ、シミュレーションによる仮想データを基に構築したモデルによって旅行時間を推定しその比較を行ったが、モデルの有効性を確認するには、渋滞流におけるさらなる検証が必要である。また仮想データを基にした推定では感知器の位置をずらしたり、感知器の数を増やした推定を行ったが、それぞれ 1 つの場合しか行わなかったためいろいろな条件によって推定していくことも必要である。

今後は、時間遅れをなくするためにマクロ交通流モデルを組み込んで出発時に旅行時間を推定し、その推定値でオンライン推定を行い、カルマンフィルタの係数 A_k, C_k の推定を更新する予定である。

参考文献

- 1) 有本 卓 : カルマンフィルタ、産業図書
- 2) K.Ashok and M.E.Ben-Akiva : Dynamic Origin-Destination Matrix Estimation and Prediction for Real-Time Traffic Management Systems, MIT Summer Professional Program 1.10s. 1996
- 3) Iwao Okutani : The Kalman Filtering Approaches in Some Transportation and Traffic Problems, Transportation and Traffic Theory, pp.397~416.1987