

## 車両感知器データを直接利用したマクロ交通流 シミュレーションの交通状態量の推定精度に関して

Improvement of Traffic Flow Simulation Precision  
by Direct Usage of Traffic Detector Data

中 辻 隆<sup>1</sup>  
加 来 照 俊<sup>2</sup>

by Takashi Nakatsuji  
Terutoshi Kaku

In dynamic traffic Control systems, such as route guidance systems, a traffic flow simulation plays an important role to predict the forthcoming traffic situations. To simulate traffic flows precisely, it is very important to utilize the traffic information obtained by traffic detectors as much as possible. Using a simulation method that was based on the macroscopic traffic flow model and the Kalman filter, the effectiveness of measurement data was investigated for a single road section, which was divided into several segments. It was shown that the Kalman filter was effective to improve the simulation precision and traffic variables, such as density and traffic flow, were better simulated as the number of measuring points was increased.

### 1. まえがき

今日、交通計画や交通管理において交通流シミュレーション解析が重要な役割を果たしていることは論を待たない。交通渋滞を緩和するための方策を検討したり、あるいは各種交通規制が交通流の円滑性や環境の保全に与える影響を定量的に評価するときに不可欠な解析手段となっている（[1] [2]）。さらに、交通渋滞時における経路誘導システムにおいて、誘導後に予想される交通状況を限られた車両感知器データに基づいて的確に予測する必要があるが、シミュレーション技術がその基幹をなしている。

交通流シミュレーションの技法自体はすでに四半世紀に及ぶ歴史を有し、交通流理論の発展やマイクロコンピュータ技術の進歩とともにモデル構造の高度化と表現能力の精緻化が行われてきている。しかしながら、河川や電気の流れのようにその物理的支配法則が明確な流れとは異なり交通流においては、人間の介在等によってその現象が非線形・非定常な特性を示し、再現精度は今なお満足されるべき

段階には至っていない。このような現象を精度良く再現するためには、計測データのもつ情報を可能な限り活用することが必要である。これまでのシミュレーションモデルにおいては、オフラインによる再現を基本とするものが多く、実際に計測された車両感知器情報をそのモデルに直接反映させているものは少ない。すなわち、交通流シミュレーション解析を行う時に、路側上で計測された車両感知器データを入力データとして与えるが、そこでは上流部入口部における交通量のみ与えて、ネットワーク出口部や中間部にある計測データを利用していない場合が多い。出口部や中間部における計測データは、高々シミュレーションの再現性を検証するために利用されているだけである。車両感知器データには、交通量だけでなく時間占有率や平均速度もあり、それらは現下の交通状況に関する情報を含んでいるが、それらの情報は交通状態の再現にはほとんど利用されていないことが多い。

キーワード：交通流シミュレーション、交通制御、カルマンフィルタ、1 正会員 工博 北大助教授 工学部土木工学科  
2 正会員 工博 北大教授 工学部土木工学科（札幌市北区北13条西8丁目）

に拡張カルマンフィルタにおける線形化に伴う解の安定性、入力変量の可制御性、あるいは計測変量の可観測性についての議論を行っている。本論においては、最も単純な単路路を解析例として、Cremerによって提案されたモデルの紹介を行うとともに交通流モデルにおけるパラメータ値がシミュレーションの精度に与える影響、あるいは計測データの増加による精度の向上などについて述べる。

本解析においては、高速道路の交通流モデルとして最初Payne [4] によって提案され、後にCremer [3] によって改良されたマクロモデルを採用した。そこでは、図-1 に示すように、道路区間  $n$  個のセグメントに分割し、各セグメント長を  $\Delta L_j$ 、時刻刻みを  $\Delta t$  とすると、各セグメントにおける交通密度と空間平均速度を状態変量とする状態方程式は以下のように与えられる。

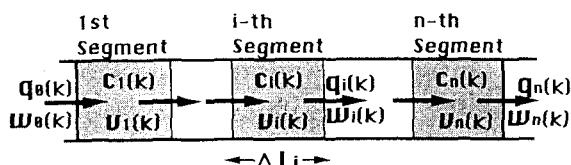


Fig. 1 Schematic Draw of Road Section

$$c_i(k+1) = c_i(k) + \frac{\Delta t}{\Delta L_j} [q_{i-1}(k) - q_i(k)] \quad (1)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{\Delta t}{\tau} [V(c_i) - v_i]_{(k)} + \frac{\Delta t}{\Delta L_j} [v_i(v_{i-1} - v_i)]_{(k)} + \frac{v}{\tau} \frac{\Delta t}{\Delta L_j} \left[ \frac{c_i - c_{i+1}}{c_i + \kappa} \right]_{(k)} \quad (2)$$

$$q_j(k) = \alpha c_j(k) v_j(k) + (1 - \alpha) c_{j+1}(k) v_{j+1}(k) \quad (3)$$

$c_i(k)$  : 時刻  $k\Delta t$ におけるセグメント  $i$  の交通密度 (veh/km)

 $v_i(k)$  : 空間平均速度 (km/h)

$q_i(k)$  : 時刻  $k\Delta t < t < (k+1)\Delta t$  の間にセグメント  $i$  から流出する交通量 (veh/h)

式(1)は、交通状態の連続条件に基づいている。式(2)は、速度に関する経験的・実験的考察によってその補正を行っている。補正項の第1項は、調整項(Anpassungsterm)と呼ばれ、次式によって規定された密度-速度特性に基づいて補正を行う。

$$V(c) = V_f \left[ 1 - \left( \frac{c}{C_{\max}} \right)^l \right]^m \quad (4)$$

ここで、 $V_f$ は自由流速度、 $C_{\max}$ は渋滞密度を表している。  
1と $m$ は追従理論における感度パラメータである

式(2)の第2項は、変位項 (Verschiebungsterm) と言い、直前のセグメントにおける速度の影響を表している。最終項は、密度勾配項 (Dichtegefalleterm) と

呼ばれ、前方のセグメントにおける交通状態による補正を行っている。式(3)に示されているように、セグメント境界地点の交通量 $q$ は、両セグメントにおける交通量 $c \times v$ の重み付き平均によって定義されている。

本モデルは、TRANSYTに代表されるような、1つの交通量に対して2つの交通状態が存在し得る交通量に基づくシミュレーションモデルとは異なり、交通状態に対して一価関数を構成する密度と空間平均速度に基づいているので、定常状態だけでなく非定常状態における表現能力に優れている特色を有している。

### 3. 交通状態の推定

#### 3.1 カルマンフィルタ

式(1) (2) (3) は、交通状態の時間的変化を表現しているので、始端部における流入交通量 $q_0(k)$ と交通状態の初期値 $c_i(0)$ と $v_i(0)$ を与えることによって、逐次密度 $c_i(k)$ と空間平均速度 $v_i(k)$ の変動を求めることができる。ここでは、始端部における交通量 $q_0(k)$ に加え、同部の時間平均速度 $w_0(k)$ 、終端部における $q_n(k)$ と $w_n(k)$ 、さらには中間部における $q_1(k)$ と $w_1(k)$ の計測データが得られている時に、交通状態の推定精度がどの改善されるかの検討を行う。すなわち、カルマンフィルタを導入し計測方程式を形成することによって、状態変数( $c_i(k)$ と $v_i(k)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ )と計測変数( $q_1(k)$ と $w_1(k)$ ,  $i=0, 1, n$ )を関係つける。

まず状態変数を $\mathbf{x}(k) = (c_1, v_1, \dots, c_n, v_n)'$ とベクトル表示し、状態方程式(1) (2)もベクトル表示する。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)] + \mathbf{\Gamma}(k) \boldsymbol{\phi}(k) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{u}(k)$ は入力ベクトルであり、本解析では始端部における流入交通量を表している。また、 $\boldsymbol{\phi}(k)$ は式(3)による交通量の推定から派生する白色雑音であり、 $\mathbf{\Gamma}(k)$ はその係数行列である。

次に計測方程式として、Cremer [3] は次式の提案を行っている。

$$\begin{aligned} q_I(k) &= \alpha c_I(k) v_I(k) + (1-\alpha) c_{I+1}(k) v_{I+1}(k) \\ w_I(k) &= \alpha v_I(k) + (1-\alpha) v_{I+1}(k) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、下添字 $I$ が計測地点を表している。すべての計測変数を $\mathbf{y}(k) = [q_0, w_0, q_1, w_1, q_n, w_n]'$ とベクトル表示することによって次の計測方程式が成立する。

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{g}[\mathbf{x}(k)] + \boldsymbol{\psi}(k) \quad (7)$$

$\boldsymbol{\phi}(k)$ は測定誤差であり白色雑音を仮定する。本解析の場合には $\boldsymbol{\phi}(k)$ と無相関である。中間部における計測は1箇所に限らない。複数の計測地点の存在を許容している。式(5) (7)がカルマンフィルタを構成する。関数 $\mathbf{f}$ と $\mathbf{g}$ は非線形関数であるので拡張カルマンフィルタの手法を導入し、推定値 $\mathbf{x}(k)$ の近傍において線形を行うことによって式(5) (7)は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{f}_0(k) + \boldsymbol{\phi}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{g}_0(k) + \boldsymbol{\psi}(k) \end{aligned} \quad (8)$$

なお、カルマンフィルタの基礎、あるいは線形化における係数行列 $\mathbf{A}(k)$ 、 $\mathbf{C}(k)$ の誘導等については、文献〔5〕〔6〕〔7〕に詳しい。

以上の定式化に基づいて、次のアルゴリズムに従い新たな計測値 $\mathbf{y}(k)$ が得られるたびごとにオンラインで状態変数 $\mathbf{x}(k)$ の推定値を求めることができる。

まず $k=0$ とし

- 1) 初期値 $\hat{\mathbf{x}}(0)$ 、 $\mathbf{P}(0)$ の設定
- 2) 係数行列 $\mathbf{A}(k)$ と $\mathbf{C}(k)$ の算定

順次 $k=k+1$ とし、

- 3) 計測値 $\mathbf{y}(k)$ が得られる前の推定値 $\tilde{\mathbf{x}}(k)$ の算定(式(5))
- 4)  $\tilde{\mathbf{x}}(k)$ に対する推定誤差行列 $\mathbf{M}(k)$ の算定(時間更新過程)

$$\mathbf{M}(k) = \mathbf{A}(k-1) \mathbf{P}(k-1) \mathbf{A}'(k-1) + \mathbf{\Gamma}(k-1) \boldsymbol{\Phi}(k-1) \mathbf{\Gamma}'(k-1) \quad (9)$$

- 5) カルマンゲイン $\mathbf{K}(k)$ の算定

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{M}(k) \mathbf{C}'(k) [\mathbf{C}(k) \mathbf{M}(k) \mathbf{C}'(k) + \boldsymbol{\Psi}(k)]^{-1} \quad (10)$$

- 6) 計測値 $\mathbf{y}(k)$ が得られた後の推定値 $\hat{\mathbf{x}}(k)$ の算定

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \tilde{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{K}(k) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{g}(k)] \quad (11)$$

- 7)  $\mathbf{x}(k)$ に推定誤差 $\mathbf{P}(k)$ の算定(測定更新過程)

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{M}(k) - \mathbf{K}(k) \mathbf{C}(k) \mathbf{M}(k) \quad (12)$$

以下手順(2)から(7)までを繰り返せば良い。

### 3.2 数値演算の安定化

実際の計算においては、種々の数値計算誤差のために思わぬ結果を得る場合がある。例えば式(9)の演算において逆行列演算が含まれているが、誤差行列 $\Psi$ の各要素の桁数に大きな違いがあったり、その次数が大きい場合には数値計算誤差の影響が派生してくる。あるいは測定更新過程において、式(11)の右辺が非負定値行列の差として計算されているので桁落ち誤差の影響が懸念される。これらの影響を少なくするための方策として、以下の処置を行った([7][8])。

1) 計測誤差の分散行列が対角であることを利用して、逐次計算法によってスカラー演算によって逆行列とカルマンゲインを求める。

2) 観測更新過程において $P(k)$ をUD分解

$$P(k) = \hat{U}(k) \hat{D}(k) \hat{U}(k)'$$

$\hat{U}$ : 上三角行列、 $\hat{D}$ : 対角行列

3) 時間更新過程において $M(k)$ をUD分解

$$M(k) = \tilde{U}(k) \tilde{D}(k) \tilde{U}(k)'$$

$\tilde{U}$ : 上三角行列、 $\tilde{D}$ : 対角行列

この時、 $\tilde{U}(k)$ と $\tilde{D}(k)$ は、Gram-Schmidt法によって $\hat{U}(k)$ および $\hat{D}(k)$ と関係付けられるので、上三角行列と対角行列のみに基づいて手順(2)～(7)の演算を行うことができる。

### 4. 数値解析

#### 4.1 実測データに基づく分析

実際の片側2車線の高速道路上の単路区間で実測されたデータに基づき、モデルパラメータ値の影響について分析を行った。当該単路区間は、5つのセグメント(セグメント長500m×2と550m×3)から構成され、両端部と1中間部(始端より1000m地点)において交通量が10秒ごとに累計され、地点平均速度が1分ごとに平均されて計測が行われている。計測時間は60分で、この間に毎分数十台の自由走行状態から、毎分400ないし500台の交通量で時速数km/hという渋滞状態へ、そして再び毎分数十台の交通状態へと交通状態が推移している。図-2は、交通流モデル中のパラメータの内 $\alpha$ と $\mu$ の値を変化させた時に、中間部の交通量 $q_I$ と平均速度 $w_I$ について、両端の計測値を用いてカルマンフィルタによって補正された交通状態量に基づく推定値と実測値との間のRMS(Root Mean Squared)誤差がどのように変化するかを示したものである。細線が始端の交通量のみ、太線がそれに加えて始端部の平均速度と終端部の両変量も計測変量とした場合を表している。交通状態の推移が大きいために未だ大きな推定誤差が残留しているが、計測データの増加によって $q_I$ や $w_I$ の推定精度が向上すること、およびパラメータ値の適切な選択が重要であることが示されている。他のパラメータ $\tau$ や $\kappa$ においても同様の傾向が見られている。

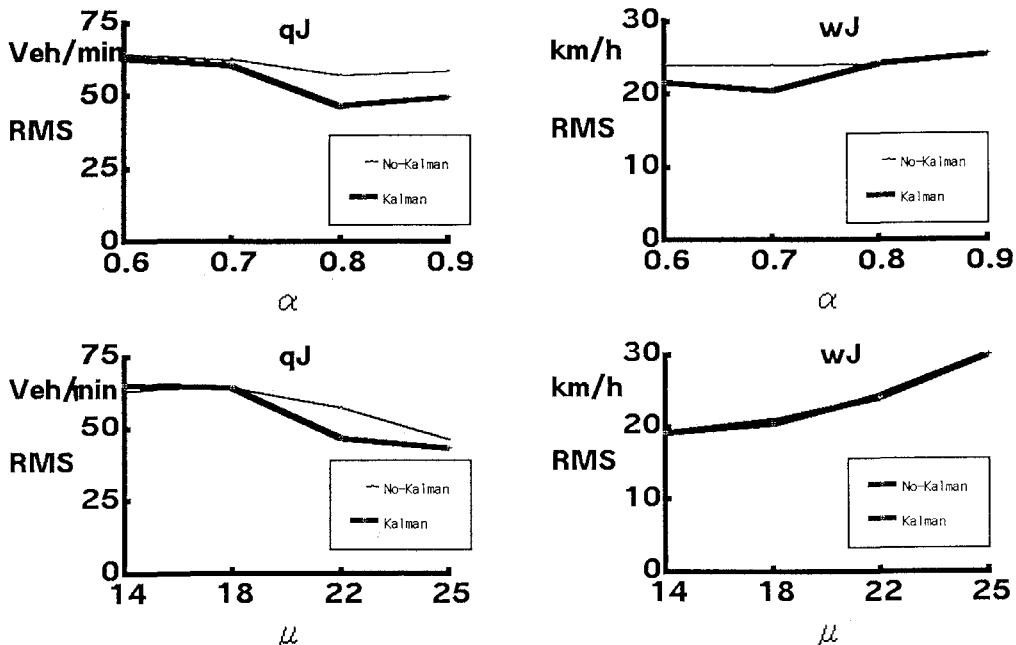


Fig. 2 Effects of Model Parameters on Traffic Flow Simulation

#### 4.2 仮想データに基づく分析

前節における結果をより広範な計測条件で行うために計算機上で状態方程式(1)(2)に基づくシミュレーションを行い、いくつかの中間地点で交通量と平均速度を求め”計測データ”とした。すなわち、交通流モデル中で用いられているいくつかのパラメータの値が不適切である状況を想定し、カルマンフィルタの導入が推定精度の改善にどの程度影響を及ぼすかについての検討を行うために、仮想計測データの作成を行った。具体的には、長さ500mのセグメント10個から構成されている単路区間において、表-1の上段に示したパラメータ値と始端部における流入交通量を与えて式(1)(2)によるシミュレーションを行い、各セグメントにおける状態量を求めた。さらに、予め設定された”計測地点”における交通量と平均速度を求め”計測データ”とした。この時、始端部の時刻 $k \Delta t$ における流

入交通量は、次式で与えられるものと仮定した。

$$q_0(k) = ax \sin(\pi k / N + \theta) \quad (13)$$

ここで、 $0 \leq \theta \leq 2\pi$  の一様乱数であり、シミュレーション時間は  $T = N \Delta t$  である。

一般的に”計測データ”のみが得られている時、その背景となっているモデル構造とその中のパラメータ値を適切に推定することは厄介なことである。ここでは、表-1の()内に示すように、 $\tau$ 、 $\mu$ 、 $\gamma$ 、 $\alpha$ 、および $\varepsilon$ の値が、元の値からランダムに5割増減して推定されているとする。ただし $\alpha$ については0.95を上限としている。当然のことながら、それらの値を用いてシミュレーションを行うと先に求めたのとは異なる交通状況が推定される。カルマンフィルタに基づく”計測データ”の活用によって、こうした誤推定の影響が緩和されることを示す。

Table-1 Model Parameters for Traffic Flow Simulation

| $V_f$<br>km/h | $C_{max}$<br>veh/km | $l$ | $m$ | $\tau$<br>veh/km | $\mu$<br>$km^2/h$ | $\gamma$<br>sec | $\alpha$       | $\varepsilon$  |
|---------------|---------------------|-----|-----|------------------|-------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 122.4         | 200                 | 1.4 | 0.8 | 20<br>(10)       | 21.6<br>(32.4)    | 34<br>(17)      | 0.80<br>(0.95) | 0.50<br>(0.25) |

図-3は、1) 始端部のみ1箇所、2) 始端部と終端部の2箇所、3) 両端部に加えセグメント5-6の境界部の3箇所、および4) 両端部とセグメント3-4と7-8の境界部計4箇所、で計測が行われている場合について、各セグメントにおける密度と空間平均速度、そして各セグメント境界における交通量と地点平均速度のRMS誤差をそれぞれの較差(最大値-最小値)で無次元化し百分率表示した結果を示している。計測地点数0はシミュレーションのみを行ったことを表している。密度において、計測データなしの場合に8.7%の推定誤差が、計測地点の増加とともに減少し、4地点計測によって2.7%にまでに減少している。空間平均速度、交通量、および地点平均速度においても若干の例外もあるが、計測地点数の増加によって推定精度が改善されていることがわかる。

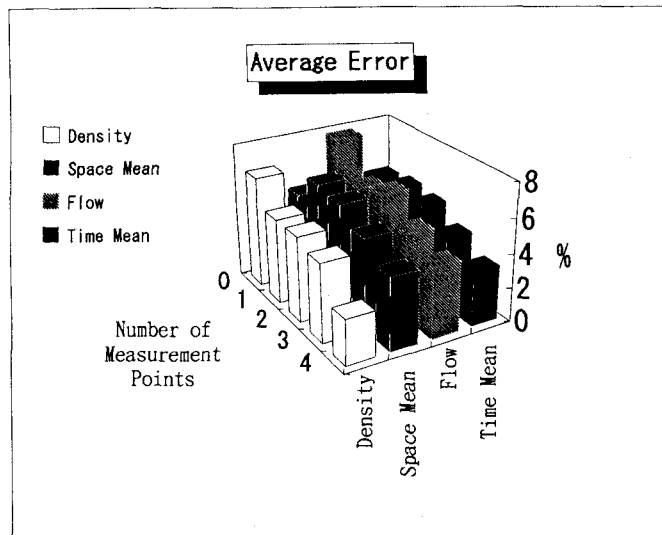


Fig. 3 Improvement of RMS Errors on Traffic Variables with increasing Measurement Points

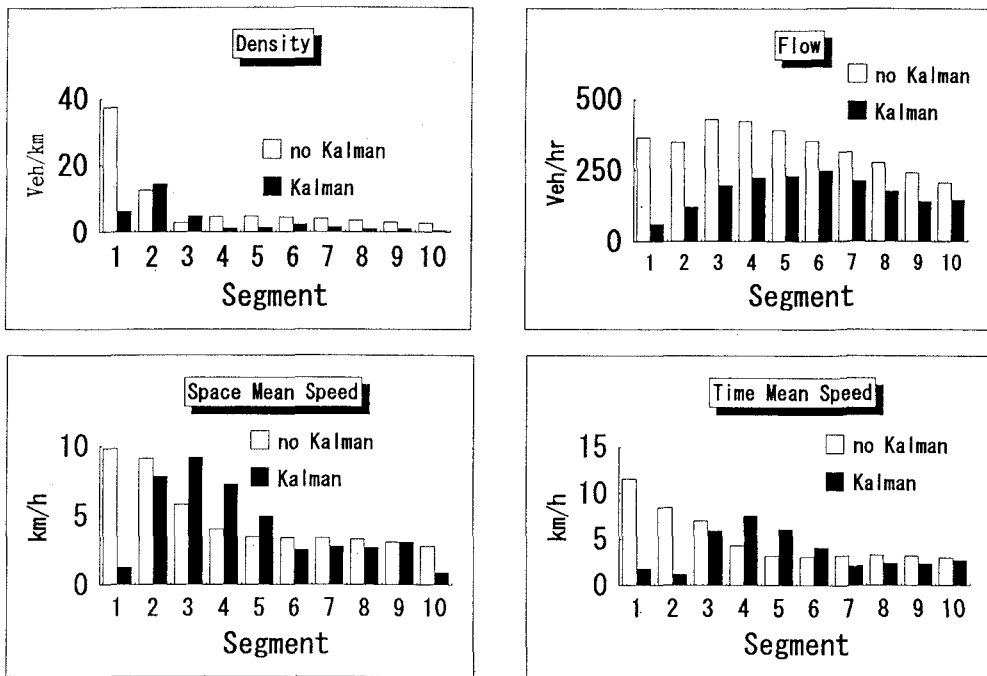


Fig. 4 Improvement of RMS Errors on each Segment for Traffic Variables

図-4は、4地点において計測データが得られた場合の各セグメントと密度と交通量のRMS誤差値を無計測の場合(No Kalman)比較したものである。密度においては2セグメントを除き、交通量においては全てのセグメントにおいて誤差の減少が見られている。密度、および交通量ともに第1セグメントにおける効果が図-2に示した全体的な誤差の減少に寄与していることが分かる。

## 5. あとがき

最も単純な単路区間を解析対象として、Cremerによって提案された手法に基づいて、計測データの増加によってシミュレーション精度が向上することを定量的に示した。今後、実測されたデータに基づいて検証を行うとともに、高速道路においてはいくつかのランプやジャンクションを含んだ、あるいは街路においてはいくつかの交差点を含んだ道路ネットワークにおいて検証を行う必要がある。さらには逆に、所要の推定精度を得るのに必要とされる車両感知器の配置密度について検討を加えて行きたい。なお、本研究は、筆者(中辻)がハンブルグ工科大学の M. Cremer教授の元で行った研究成果に基づいている。記して謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) TRANSYT-7F User's Manual, FHWA, 1984
- 2) TRAF-NETSIM User's Manual, FHWA, 1989
- 3) M. Cremer: Der Verkehrsfluß auf Schnellstraßen, Springer-Verlag, 1979
- 4) Payne, H. J.: Models of Freeway Traffic Control. in Mathematical Models of Public Systems, Simulation Council Proceedings, Vol. 1, pp. 51-61, 1971
- 5) 有本: カルマン・フィルター、産業図書、1977
- 6) Nahi: Estimation Theory and Application R. E. Krieger, 1969
- 7) 片山: 応用カルマンフィルタ、朝倉書店、1983
- 8) Bierman et al: Numerical Comparison of Kalman Filter Algorithms, Orbit Determination Case Study, Automatica, Vol. 13, pp. 23-35, 1977