

車両感知バイアスのオンライン自動補正

ONLINE AUTOMATIC CORRECTION OF VEHICLE DETECTION BIAS

赤羽 弘和*・越 正毅**

By Hirokazu AKAHANE and Masaki KOSHI

This paper deals with a method of on-line automatic updating of the correction factors for vehicle detection bias. The factors are given for free flow and congested flow individually at each of expressway cross sections based on the traffic data that are obtained from vehicle detectors. This updating method was tested through the use of traffic data that were collected from Tokyo Expressway.

Keywords: vehicle detector, bias correction, traffic control, parameter updating, Kalman filter

1. はじめに

都市高速道路の管制システムにおいては、車両感知器からの情報を処理することにより交通量、速度、時間オキュパンシーなどの交通状態量が算出されている。そして、これらの交通状態量を総合することにより道路網全体の交通状況が把握され、それに基づいて流入制御や交通情報の提供などの交通流制御が実施されている。したがって、交通管制を効果的に行うためには、交通状態量を車両感知器により正確に計測することが必要である。

都市高速道路および一般街路における調査・解析^{1)~5)}によれば、車両感知器による通過車両台数の計数値には、補正を要するほどに大きな偏りが含まれることがある。たとえば、車両が車線変更の際に車線境界をまたいで感知器設置断面を通過することが、偏りの発生要因の1つに挙げられている。この場合、車両感知器の横方向の感知範囲が広い場合には、走行および追越し車線の感知器の双方により、このような車両が重複して感知される度合いが大きくなり、通過台数は実際より過剰に計数され

る。逆に横方向の感知領域が小さい場合には、どちらにも感知されない度合いが大きくなり、過小計数となる。また、同様に車両感知器の感知特性によっては、大型車が感知されなかったり、特殊な形状の車両が2台以上に感知される場合が多くなることなども、偏りの発生要因に挙げられている。

この偏りの大きさや、過剰計数あるいは過小計数になるのかは、感知器自体の特性、その設置状況、あるいは交通状況などに依存する。したがって、偏りを補正するための係数値も、各感知器設置断面ごとに設定する必要がある。また、感知器の特性あるいは交通状況の経年変化に従い、それらの計数値を継続的に更新していくことも必要である。これまでにも目視観測に基づいて補正係数値を設定した例⁶⁾はあるが、都市高速道路には多数の車両感知器が設置されており、補正係数値を各断面ごとに人手によりオフラインで設定あるいは更新することはきわめて困難である。そこで本研究においては、通過台数の計数値を補正する方法を提案するとともに、この補正に用いる係数値を車両感知器データに基づいて自動的に設定・更新するオンラインアルゴリズムを開発した。

2. 車両感知の偏り

本章においてはループ式車両感知器を中心に述べる

* 正会員 工博 千葉工業大学講師 土木工学科
(〒275 習志野市津田沼2-17-1)

** 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所
(〒106 港区六本木7-22-1)

表一 ループ式車両感知器の計数精度

調査	通過 台数 ①	感知器の計数値 (中央走行車 ^{**})		感知器の計数値 (中央走行車以外)		備考
		台数	①に対する 割合(%)	台数	①に対する 割合(%)	
1	2438	34(+) 0(-)	1.4 0.0	2(+) 7(-)	0.1 0.3	単路部
2	2197	29(+) 0(-)	1.3 0.0	2(+) 6(-)	0.1 0.3	
3	2175	61(+) 0(-)	2.8 0.0	0(+) 8(-)	0.0 0.4	トンネル内部
4	3254	19(+) 0(-)	0.6 0.0	0(+) 44(-)	0.0 1.4	
5	1870	16(+) 0(-)	0.9 0.0	3(+) 2(-)	0.2 0.1	合流点直後
6	1341	14(+) 0(-)	1.0 0.0	1(+) 4(-)	0.1 0.3	

注) * : 16mmメモーションカメラによる撮影フィルムを解析した結果。

** : 車線境界をまたいで走行した車両を示す。

(+) : 1台の車両を2台以上に感知する過剰計数を示す。

(-) : 不感知による過小計数を示す。

出典) 首都高速道路協会：交通管制システムの性能実験報告書，1970。

が、これと並んで実用に供せられることの多い超音波式感知器についても状況は同様である。

表一に、ループ式車両感知器による通過車両台数の計数精度に関する調査結果を示す。計数誤差の原因として、以下が挙げられている¹⁾。

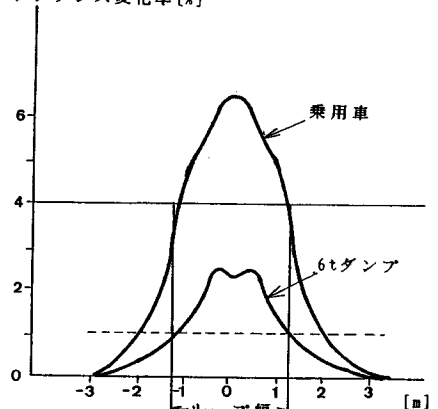
① 車線境界をまたいで走行：表一をみると、車線変更などのために車線境界をまたいで走行する車両（中央走行車）は、すべて走行車線および追越車線の車両感知器の双方により感知されている。したがって、断面通過台数の計数値は、ほとんどの調査断面において常に過剰である。また、中央走行車による計数誤差の大きさは各断面によりかなり異なり、1%未満の断面もあれば3%近い断面もある。

より一般的には、この偏りの大きさや過剰計数になるのかあるいは過小計数になるのかは通行車両の車種、走行速度、走行軌跡などの交通状況と、感知器の設置状況や感度分布に依存すると考えられる。

都市高速道路においては入出路の取付間隔が都市間高速道路と比較して短く、また本線の右側に流出入ランプが取り付けられている箇所もわが国では珍しくない。さらに、インターチェンジの設置間隔も相対的に短い。したがって、交通の流入あるいは分合流に伴う車線変更の発生頻度が、都市間高速道路と比較してかなり多いため、それに起因する通過台数の計数値の偏りも相対的に大きいと考えられる。

② 大型車：図一の例において、乗用車の感知幅をループ幅と等しくするには、同図中に横実線で示すように、約4%以上のインダクタンス変化を検出すればよいが、この感度設定では6tダンプは検出できない。

インダクタンス変化率 [%]



車両中心のループ中心からのずれ

出典) 首都高速道路協会：交通管制システムの性能実験報告書，1970。

図一 ループ式車両感知器の感度分布横断面図

一方、横破線で示すように、感度を約1%にすれば6tダンプの感知幅をループ幅と等しくできるが、こんどは乗用車の感知幅がおおよそ2倍に拡大してしまう。こうなると、隣接車線を走行する車両までも感知してしまうおそれがある。したがって、実際にはあまり高感度にすることはできないため、大型車は乗用車に比べて検出されない可能性が高くなる。

③ 多軸車：多軸車は車体下面と道路面との間隔が大きいうえに、各車軸がループ上を通過するたびに感知出力にピークが生ずる。このため、1台の多軸車が、2台以上に感知されることがある。この過剰計数の発生頻度も、感知器の感度を高めれば低減できる。しかし、②と同様の理由から実際にはあまり感度を高くすることはできない。

④ その他：先行車が感知範囲から離脱する前に後続車が同一感知器の感知範囲にさしかかる場合や、二輪車の走行によっても偏りが発生する場合があることが報告されている。

一般街路に設置された感知器については、以下のような実験報告⁴⁾がある。

① 計数値の偏り（相対誤差）は、ピーク時間帯および日中のオフピーク時間帯とは異なる。

② それぞれの時間帯における偏りの時間変動は、交通量が変動しているにもかかわらず、ごくわずかである。したがって、偏りの発生状況は、交通量の変動にほとんど依存しない。

③ 偏りは、地点によりまちまちである。

両時間帯における偏りが異なるのは、ピーク時間帯における交通密度が相対的に高いことが、主要な原因であると考えられる。これは、交通流の密度が高いときと低

いとときでは、あるいは速度が低いときと高いときでは、車両の走行挙動がかなり異なるからであろう。

画像処理技術などを応用すれば、計数値の偏りがきわめて小さい計数装置を開発することは可能であろう。しかし、すでに設置されている感知器をすべてこのタイプの計数装置に置き換えることは、費用などの面からも難しい。したがって、現用のループ式あるいは超音波式車両感知器の計数値を補正して利用することが、現実的な方策である。

3. 補正係数値のオンライン自動管理の必要性

車両感知器による通過台数の計数値の偏りの発生は、2.において述べたように道路・交通条件に依存する。以下に示すように、これらの条件は路線上の各地点で異なるため、偏りの発生状況も感知器設置断面により異なると考えられる。

① たとえば、車線変更は分流点および合流点の前後において特に多く発生する。その他の車両の走行状況も、地点により異なる。

② 大型車あるいは特殊形状車などの混入率は、各路線上を流れる交通の特性により異なる。

③ たとえば、ループ式車両感知器の感知特性は、路面の摩耗あるいは損傷などの影響を受けて、時とともに変化する。そして、路面状態の変化は地点により異なる。したがって、感知特性には、設置時に適切に調整されていても、時とともにばらつきが生じてくる。

したがって、通過台数の計数値の補正係数値は、各感知器設置断面ごとに設定する必要がある。

偏りの発生状況は、以下に示す原因により経年変動すると考えられる。

① OD パターンは、季節的に変動する。また、道路網の拡張や沿線の開発などによっても変化する。OD パターンが変化すると、各合流部、分流部における車線変更の発生状況、大型車混入率なども変動する。

② 感知器の特性は経年変化する。

したがって、補正係数値は、継続的に見直されていかなければならない。

首都高速道路において昭和 60 年から導入されている新交通管制システム（システム 60）では、最終的に 2 000 か所以上に車両感知器が設置される計画である⁶⁾。このように多数の車両感知器に対して、人手によりオフラインで、しかも個別に補正係数値を設定あるいは更新することはきわめて困難である。したがって、これらの係数値をオンラインで自動的に管理するシステムが不可欠である。

4. 偏りの補正方法

式（1）に示すように、ある感知器設置断面を通過する車両台数の計数値を、渋滞時または非渋滞時用の補正係数をかけて補正することにする。

$$\rho_i(t) = \begin{cases} c_i m_i(t) & \text{[非渋滞時]} \\ d_i m_i(t) & \text{[渋滞時]} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 m は単位時間内の断面通過台数の計数値、 ρ は計数値 m の補正值、 t は時間、 c は非渋滞時補正係数、 d は渋滞時補正係数、そして添字 i は上流から順に附番された断面番号を示す。

補正係数を断面ごとに、かつ渋滞時および非渋滞時の別に設定する必要性は、前章で述べたとおりである。

各出路からの流出台数は本線通過台数の高々数 % とわずかであるため、その計数値は補正しないこととした。

本線料金所および一般入路料金所において計数された流入台数は、料金徴収結果と常に照合され、それに基づいて感知特性が調整されている。さらに、料金所を通過するときの車両の走行軌跡はほぼ一定であり、感知器の感知範囲のほぼ中央を車両が通過している。このため、流入台数の計数値は実用上十分に高精度であり、補正を必要としない。そこで、次の 5. において示すように、流入台数の計数値を補正計数を推定する際の基準値として用いることにする。

渋滞の有無以外にも、偏りの発生要因は時間変動する。したがって、たとえば大型車混入率や分流比率、合流比率の変動に合わせて、時間帯別に補正係数を設定することも考えられる。そして、それらの補正係数にも、次章以降で述べるアップデイトングアルゴリズムを適用することは容易である。ただし、時間帯別に補正係数を設定することによる効果、あるいは時間帯の設定方法などについては、さらに検討する必要がある。

5. 補正係数のアップデイトング法^{7)~9)}

本章においては、車両感知器データに基づいて、通過台数の計数値の補正係数をオンラインで自動的に更新するアルゴリズムについて述べる。補正係数の初期設定値の精度が多少低くとも、この自動更新アルゴリズムによりその精度を逐次改善していけば、やがては実用上十分な精度が得られ、さらにその精度を維持していくことができる。

(1) 各断面における計数値の比較

図—2 に示すような間に車両の流出入のない 2 断面において、通過車両台数の感知器計数値を比較することを考える。計数開始時と終了時の両断面間（区間内）の車両台数が等しければ、すなわち区間密度が等しければ、その間の区間密度の時間変動にはかわりなく、計数時

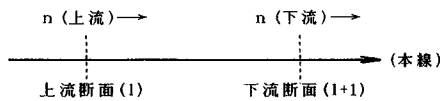


図-2 道路区間

間内にそれぞれの断面を通過する車両台数も等しくなる。したがって、両断面における感知器計数値を直接比較することにより、計数値の偏りの相対的關係が得られる。しかし、一般には計数開始時と終了時とで区間密度は等しくはならないし、また等しくなるように計数時期を調整することも実際には困難である。なぜなら、区間密度あるいは区間内の存在台数を、車両感知器により直接測定することはできないからである。また、図-3は首都高速道路における交通量と交通密度との関係を例示したものであるが、同じ交通量に対しても交通密度は変動する。したがって、交通量を基準にして計数時期を調整しても、計数開始時と終了時とで区間密度を等しくすることはできない。

計数開始時と終了時における区間内の車両台数が異なると、計数時間内に2断面を実際に通過する車両台数にも差が生ずる。この影響をでき得るかぎり小さくするために、以下のような対策をとる。

- ④ 隣接する断面間において計数値を比較する。
- ⑤ 1時間以上連続して計数した通過台数を比較する。
- ⑥ 隣接する2断面間において渋滞が発生していないときに計数を開始する。また、同断面間において渋滞が発生していないときに計数を終了する。

区間密度の変動による通過台数差は区間長に比例するため、なるべく近接した断面間において計数値を比較する必要がある。したがって、実用的には隣接する2断面間において通過台数の計数値を比較することが適当である。

計数時間内の通過台数は計数時間の長さにほぼ比例するから、計数時間を長くすれば区間密度差の影響は相対的に低下する。しかし、オンライン処理においては記憶容量が制限されることや車両感知器の故障などもあるため、所要精度の達成に必要な長時間連続計数を、すべての断面において実行するのは困難である。したがって、最短計数時間を1時間とした。

図-3中の斜線は、自由流と渋滞流の境界を示している。自由流における交通密度は、交通量に応じておおむね0～40台/km/車線の範囲内を変動している。これに対して、渋滞流における交通密度の変動範囲はおおむね30～120台/km/車線であり、変動幅は自由流の2倍以上である。さらに、同じ交通量に対する密度の変動幅も、

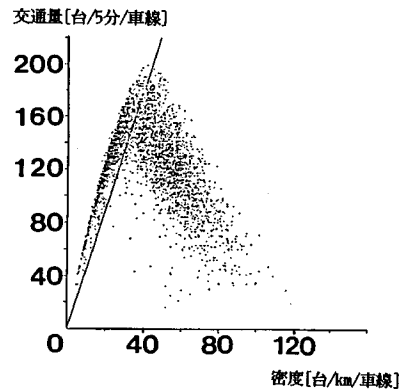


図-3 交通量-密度相関の例（首都高速）

自由流では10台/km/車線程度であるのに対し、渋滞流ではおよそ35台/km/車線にもなる。このような交通流の特性から、交通が渋滞していないときに計数を開始し、かつ交通が渋滞していないときに計数を終了させれば、渋滞時に計数を開始あるいは終了させる場合よりも、計数開始時と終了時との区間密度差を小さくできる。

区間密度差を自由流の密度変動幅40台/km/車線の高々50%、計数時間内の平均交通量を100台/5分/車線（1200台/時間/車線）、区間長を首都高速道路の平均感知器設置間隔である0.6km（データ収集当時）、通過台数の最短計数時間を1時間と仮定すると、両断面における通過台数差、すなわち区間内の車両台数の差が計数時間内の総通過台数に占める割合（相対誤差）は、以下に示すように高々1%となる。

$$\begin{aligned} \text{相対誤差} &= \frac{\text{区間密度差} \cdot \text{区間長}}{5 \text{ 分間平均交通量} \cdot (60 \text{ 分} / 5 \text{ 分})} \\ &= \frac{(40 \times 0.5) \times 0.6}{100 \times 12} = 1[\%] \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

さらに以下のような理由により、実際には相対誤差は1%をかなり下回ると考えられる。

① 後述のように交通データの処理周期を1日としたため、感知器に障害が発生した場合などを除けば、通常は夜間の同一時間帯に計数を開始しかつ終了することになり、両時点における交通量の差はそれほど大きくはならないと期待される。また、通常は24時間連続して計数できる。

② 車両感知器の設置間隔は現在すでに300mになっており、各区間内の車両台数の変動幅は半減している。

(2) 補正係数の推定問題の定式化

本節では、前節(1)に示した通過台数の計数値の比較法を応用するとともに、オンランプあるいは本線料金所からの流入台数の計数値を基準値として用いることに

より、感知器計数値の補正係数を未知数とする連立方程式を定式化する。

式(1)によりある断面における通過車両台数の計数値を補正したとき、次式が成り立つような補正係数を推定する。

$$n_i(t) = \rho_i(t) + \zeta_i(t) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $n_i(t)$ は単位時間内の断面通過台数の真値であり、 $\zeta_i(t)$ は通過台数の補正誤差である。偏りの期待値は補正係数により補正できるが、その期待値まわりの偶然誤差は車線変更の発生状況などの時間変動、あるいは感知器の特性に依存して補正後も発生する。この補正後も残存する偶然誤差、すなわち補正誤差 $\zeta_i(t)$ を、平均値0の白色雑音であると仮定する。

本線上に隣接する2断面 l および $l+1$ 、そしてこの断面間の流出入路において計数された通過台数について、次の関係が成り立つと仮定する。

$$\sum_{t=s_l}^{u_l} \{n_i(t) - n_{i+1}(t) + i_l(t) - o_i(t)\} + \eta_l = 0 \dots \dots \dots (4)$$

s_l は連続計数開始時刻、そして u_l は連続計数終了時刻、 $i_l(t)$ は断面 $l \sim$ 断面 $l+1$ の入路または本線料金所からの単位時間内の流入台数の計数値、そして $o_i(t)$ は断面 $l \sim$ 断面 $l+1$ の出路からの単位時間内の流出台数の計数値である。 η_l は計数開始時および終了時における区間内の車両台数差、および $i_l(t)$ と $o_i(t)$ の計数誤差に起因する誤差項である。計数開始時刻 s_l および計数終了時刻 u_l は、区間内の車両台数差に起因する誤差がなるべく小さくなるように、前節(1)に示した規準①～③に基づいて決めることとする。そのうえで、誤差項 η_l は平均値0の白色雑音項の和であり、したがって η_l 自体も平均値0の白色雑音であると仮定する。

式(4)に式(1)および(3)を代入して整理すると、次式が得られる。

$$y_l = c_l p_l + d_l q_l - c_{l+1} p_{l+1} - d_{l+1} q_{l+1} + \varepsilon_l \dots \dots \dots (5)$$

ここに

$$y_l = \sum_{t=s_l}^{u_l} \{o_i(t) - i_l(t)\} \dots \dots \dots (6)$$

$$\varepsilon_l = \eta_l + \sum_{t=s_l}^{u_l} \{\zeta_i(t) - \zeta_{i+1}(t)\} \dots \dots \dots (7)$$

である。また、 p は非渋滞時の計数値 m の和、そして q は渋滞時の計数値 m の和である。誤差項 $\zeta_i(t)$ 、 $\zeta_{i+1}(t)$ 、および η_l は互いに無相関であると仮定する。

式(5)を路線上に隣接する各断面における感知器計数値に適用すると、各断面の補正係数 c_l および d_l を未知数とする連立方程式が得られる。式(5)の計数開始時刻 u_l および終了時刻 s_l は、隣接断面のおおの対において任意に定めることができる。したがって、車両

感知器の故障などのために通過台数の計数が一時中断したときには、もし中断時に渋滞していれば渋滞時の計数値を時間的にさかのぼって破棄し、それ以前の連続計数値に対して式(5)を適用すればよい。中断後の計数値の取扱いも同様にすればよい。

式(5)の誤差項 ε_l の分散および共分散は、 $\zeta_i(t)$ 、 $\zeta_{i+1}(t)$ および η_l が互いに独立な白色雑音であるとの仮定と、式(5)および式(7)とから、以下のように評価できる。

$$E\{\varepsilon_l^2\} = E\{\eta_l^2\} + \sum_{t=s_l}^{u_l} [E\{\zeta_i^2(t)\} + E\{\zeta_{i+1}^2(t)\}] \dots \dots \dots (8)$$

$$E\{\varepsilon_{l-1}\varepsilon_l\} = E\{\varepsilon_l\varepsilon_{l-1}\} = -\sum_{t=s_l}^{u_l} E\{\zeta_i^2(t)\} \dots \dots \dots (9)$$

$$E\{\varepsilon_{l-m}\varepsilon_l\} = E\{\varepsilon_l\varepsilon_{l-m}\} = 0, \quad m \neq 0, 1 \dots \dots \dots (10)$$

となる。ここに E は期待値を示す。さらに、 S_l および U_l は、断面 $l-1$ および l における計数時間と、断面 l および $l+1$ における計数時間とに重複がある場合に、その重複の開始時刻および終了時刻とをそれぞれ示す。

各誤差項について、以下のように仮定する。

① 補正誤差 $\zeta_i(t)$ は、計数値 $m_i(t)$ に比例する。

② 区間内の車両台数差による誤差 η_l は、下流断面における計数開始時および終了時の計数値 $m_{i+1}(t)$ の差に比例する。

これらの仮定から、式(8)および(9)は計数値 m により次式のように表わせる。

$$E\{\varepsilon_l^2\} = \alpha^2 \{m_{i+1}(s_l) - m_{i+1}(u_l)\}^2 + \beta^2 \sum_{t=s_l}^{u_l} \{m_i^2(t) + m_{i+1}^2(t)\} \dots \dots \dots (11)$$

$$E\{\varepsilon_{l-1}\varepsilon_l\} = E\{\varepsilon_l\varepsilon_{l-1}\} = -\beta^2 \sum_{t=s_l}^{u_l} m_i^2(t) \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 α および β は比例定数である。

なお、インターチェンジにおける分流部および合流部についても、本節と同様に定式化することができる。

(3) アップデイティング・アルゴリズム

本節では、車両感知器からの交通データを1日分記憶しておき、これを夜間に1日1回の割りで処理し、補正係数値を推定・更新するアルゴリズムを導く。交通データの処理周期をこのように定めたのは、以下のような理由による。

① 各車両感知器の偏りの時間変化は緩やかであると考えられるから、それほど頻繁に補正係数値を更新する必要はない。

② 交通データの処理周期をあまり長くすると、所要データ記憶容量が増大し、オンライン処理に適さなくなる。

③ 交通現象の再現周期と交通データの処理周期を一

致させることにより、補正係数値の推定精度を改善できる。

④ 夜間は管制用計算機システムの負荷が比較的軽い。

通常用いられる最小二乗法についても、算法を工夫することにより、逐次処理アルゴリズムが導かれている。したがって、それを連立方程式(5)に適用して計数値を1日1回ずつ処理し、補正係数 c_i および d_i の値を漸化的に改良していくこともできる。ただし、この方法は補正係数が常に一定の値をとることを前提としている。一方、3.において述べたように、補正係数値は実際には経時変化するものとみなす必要がある。これに対応するためには、補正係数 c_i および d_i の推定誤差共分散行列の要素の値を定期的に調整するなどの補助的操作が必要となる。このような操作はオンライン処理には必ずしも適してはいない。そこで、ここでは時系列解析法の1つであるカルマン・フィルタリング・アルゴリズムを適用し、補正係数値の経時変化に対応でき、かつオンライン処理にも適した推定・更新アルゴリズムを導く。

離散時間カルマンフィルタは、次式のように差分式で表わされるシステムの状態の最小二乗推定量を与え^{10), 11)}。

$$x(k+1) = F(k)x(k) + G(k)w(k) \quad (13)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + v(k) \quad (14)$$

ここに、 k は時間、ここでは特に日を示すものとする。また、 $x(k)$ はシステムの状態を示す n 次元ベクトル、 $y(k)$ は p 次元の計測値ベクトル、 $w(k)$ および $v(k)$ は白色雑音ベクトル、そして $F(k)$ 、 $G(k)$ 、 $H(k)$ は要素の値が既知の係数行列である。式(13)の状態ベクトル $x(k)$ は直接には計測できない。しかし、式(14)に示されるように、 $x(k)$ の線形変換である $y(k)$ は、計測誤差を伴うものの直接計測することができる。

更新開始日から k 日後までの計数値 $y(0)$ 、 $y(1)$ 、 $\dots$ 、 $y(k)$ が得られたときの、システムの k 日後の状態 $x(k)$ の最小二乗推定量を、 $\hat{x}(k/k)$ で示すことにする。推定量 $\hat{x}(k/k)$ は不偏であり、かつ推定誤差共分散行列 $P(k/k) = E\{[x(k) - \hat{x}(k/k)][x(k) - \hat{x}(k/k)]^T\}$ を最小化する。更新開始日から $k-1$ 日後までの計数値 $y(0)$ 、 $y(1)$ 、 $\dots$ 、 $y(k-1)$ に基づく、 k 日後の状態 $x(k)$ の推定量 $\hat{x}(k/k-1)$ は、 k 日後に得られる計数値 $y(k)$ により、次式のように改良することができる。

$$\begin{aligned} \hat{x}(k/k) = & \hat{x}(k/k-1) \\ & + K(k)[y(k) - H(k)\hat{x}(k/k-1)] \quad \dots\dots (15) \end{aligned}$$

ここに係数ベクトル $K(k)$ はカルマンゲインとよばれ、この要素の値はカルマン・フィルタリング・アルゴリズムにより与えられる。

ここで、更新開始日から k 日後の補正係数値、1日分

の計数値、あるいは誤差項などを、以下のように置き換える。

$$x(k) = \begin{bmatrix} \vdots \\ c_i \\ d_i \\ c_{i+1} \\ d_{i+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$H(k) = \begin{bmatrix} \vdots \\ h_i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} \vdots \\ y_i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$v(k) = \begin{bmatrix} \vdots \\ \varepsilon_i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに

$$h_i = (0 \dots 0 \quad p_i \quad q_i \quad -p_{i+1} \quad -q_{i+1} \quad 0 \dots 0) \quad \dots\dots\dots (20)$$

である。このとき連立方程式(5)は

$$y(k) = H(k)x(k) + v(k) \quad \dots\dots\dots (21)$$

と表わせる。さらに、補正係数値が毎日少しずつ変化していくものと仮定し、それを次式で表わす。

$$x(k+1) = x(k) + w(k) \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 $w(k)$ は補正係数値の日変動幅を規定する項であり、白色雑音要素からなるベクトルである。

式(22)は、式(13)において $F(k)$ および $G(k)$ を単位行列に置き換えたものである。また、式(21)は、式(14)とまったく等しい形をしている。したがって、式(21)および(22)にカルマン・フィルタリング・アルゴリズムを適用することにより、補正係数の値をシステムの状態変数として、毎日逐次的に推定・更新することができる。

カルマンフィルタの基本アルゴリズムには、白色雑音ベクトル $v(k)$ の共分散行列 R の逆行列演算が含まれる。感知器設置断面数を r とすると、共分散行列 R の寸法は少なくとも $r \times r$ となるから、道路網全体ではかなり大きくなる。そのうえ、行列 R は非対角行列であるため、基本アルゴリズムをこの問題にそのまま適用すると、計算時間や計算精度の面で実用上の支障が生ずる可能性もある。しかし、この逆行列演算を基本アルゴリズムの小改修により避け得ることが、すでに示されている¹¹⁾。

6. 渋滞の検出方法

前節の方法により車両感知器の補正係数を推定するに

は、各車両感知器設置断面において渋滞を検出する必要がある。

渋滞検出法の1つとして、自由流と渋滞流との境界領域における交通状況の発生頻度が、そのほかの領域における発生頻度比べてかなり小さいという特性¹²⁾を応用する方法がある。すなわち、交通データを蓄積して自由流と渋滞流の境界領域において出現頻度が最小の速度（たとえば45 km/時）を求め、それより高速の流れを自由流、低速の流れを渋滞流とする方法である^{9), 13)}。また、この渋滞検出のための閾値を車両感知器データに基づいてオンラインで自動的に更新するアルゴリズムも、著者が提案している⁹⁾。本研究では、この渋滞検出法を採用している。

7. 適用結果

補正係数のアップデイトング・アルゴリズムを、首都高速道路3号上り線に適用した。使用した感知器データの詳細を表-2に示す。

5.(1)に示した通過台数の計数規準①～③を満足する計数値の組は、各隣接断面の対において表-3に示すように得られた。

表-3の計数値に、以下に示すような条件で補正係数のアップデイトング・アルゴリズムを適用した。

- ① 補正係数の初期値は、すべて1.0とした。
- ② 補正係数の推定誤差分散の初期値は、すべて1.0とした。

表-2 感知器データの仕様

測定項目	交通量 空間平均速度または時間オキュパンシー
集計時間単位	5分
収集時間	6:00～17:00
収集期間	1982年11月1日～12月12日 (11月8日～11月22日は欠測)

表-3 補正係数の推定に使用した計数値の組

断面 番号	車両感知器番号		計数値 の組数	連続計数時間[時間]		
	走行 車線	追越 車線		平均	最大	最小
1	T-32*		43	5.4	11.0	1.0
2	643	644	40	4.9	11.0	1.2
3	633	634	26	4.2	11.0	1.0
4	625	626	22	5.4	11.0	1.2
5	623	624	20	3.0	11.0	1.3
6	613	614	18	3.6	11.0	1.2
7	607	608	25	8.1	11.0	1.0
8	603	604	16	7.6	11.0	1.5
9	595	597	18	7.8	11.0	2.0
10	589	590	28	6.1	11.0	1.1
11	124	125	19	7.2	10.9	1.0
12	133	134				

注) T-32*: 本線料金所(用賀)のトラフィック・カウンター

③ 区間内の車両台数差による誤差を、計数開始時と終了時における計数値の差の20%と仮定し、式(11)において $\alpha=0.2$ と設定した。

④ 補正誤差を計数値の10%と仮定し、式(11)および(12)において $\beta=0.1$ と設定した。

⑤ データ収集期間が約4週間と短いので、この期間中には補正係数は変動しないものとみなし、式(22)において補正係数の日変動を示す項 $w(k)=0$ とした。

②～⑤については必ずしも実際の値を与える必要はなく、その相対的大小関係を適切に設定すればよいことが示されている¹⁴⁾。したがって、収束速度を多少犠牲にしても、これらに大きめの値を与えて推定値の急激な変動を抑えることが、実用的な方策であると考えられる。また、パラメーター値の長期変動を追跡していくことがアップデイトングの目的であるから、特に高い収束速度は必要ない。このため、②～④における設定値も、実際の値よりも多少大きめにした。

図-3に示す自由流側の交通量-交通密度相関を直線で近似すると、交通量の変動1に対する密度の変動はおおむね0.2と見積られる。したがって、平均区間長を首都高速道路の平均感知器設置間隔(データ収集当時)である0.6 kmとすると、交通量の変動1に対する区間内車両台数の変動は $0.2 \times 0.6 = 0.12$ と見積られる。これに加えて交通量が同じであっても密度が変動することも考慮し、区間内の車両台数差による誤差を、計数開始時と終了時における計数値の差の20%と仮定した。

図-4は、各断面の渋滞時用の補正係数値が更新された過程を示している。更新されるにつれて係数値の動きも安定し、後半ではほぼ一定値に収束している。また、初期から変動が小さい係数と、値の正負を問わず変化の大きい係数に大別できる。後者の変動の理由は、該当する断面において推定初期に有効な計数値が十分に得られ

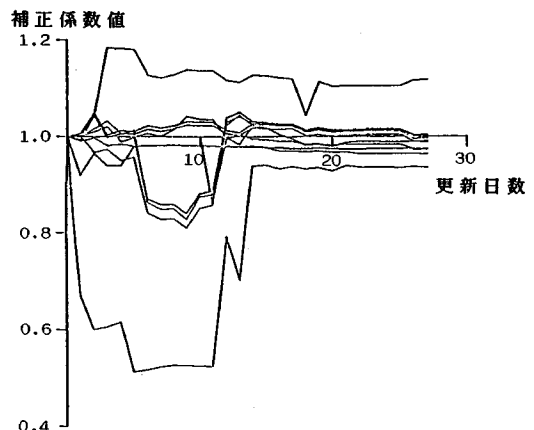
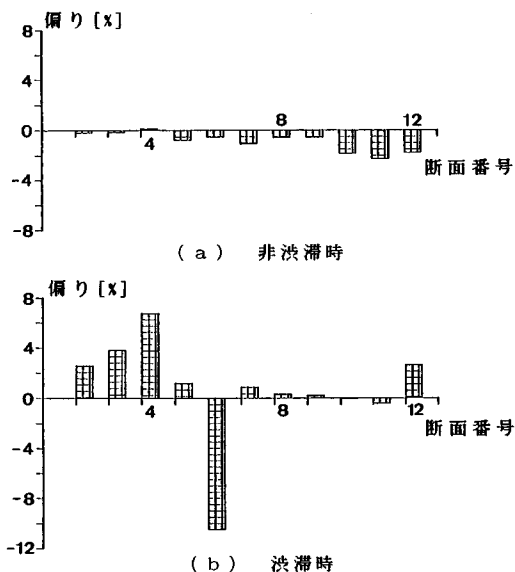


図-4 渋滞時補正係数の更新過程

なかったためであると考えられる。同じデータを繰り返しアップデイト・アルゴリズムに適用し、各回において $y(k) - H(k)x(k)$ のユークリッド・ノルムを前回と比較することで、各回における収束度を判断できる¹⁰⁾。2回目の1回目に対するユークリッド・ノルムの減少率は各断面において0.1%未満であり、初回ではほぼ収束しているとみなせる。

図—5には、この補正係数の収束値の逆数から1を差し引くことにより、各断面における偏りを渋滞時および非渋滞時の別に計算した結果を示す。渋滞時と非渋滞時とは、偏りの発生状況が、明らかに異なっている。非渋滞時には、各断面でほぼ共通して過小計数となっているが、偏りの大きさそのものは各断面において高々2%程度である。渋滞時には、断面6（車両感知器番号613、614）を除くと、各断面でほぼ共通して過剰計数となっている。そして、非渋滞時と比べてかなり偏りが大きく、10%を越える断面もみられる。

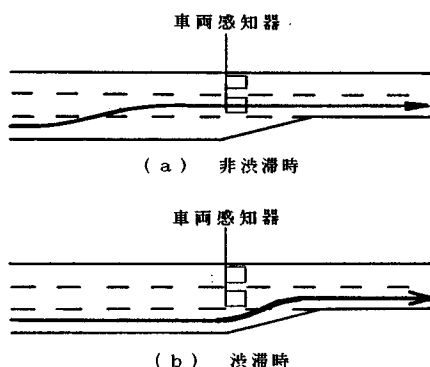
図—6に、断面6における車両感知器の設置状況と、車線変更車両の走行軌跡の概念図を非渋滞時および渋滞時の別に示す。非渋滞時には、走行速度が比較的高くかつ車両間に合流に適した間隙が相対的に多いため、車線が3車線から2車線に絞られる地点のかなり手前から車線変更が開始される。逆に渋滞時には、走行速度が低くかつ車両間に合流に適した間隙が少ないため、車両感知器が設置された地点を越えてから、かなり急な角度で車線を変更する車両が多くみられる。このような車両が車両感知器に感知されないことが、渋滞時の断面6におけるかなり大きな過小計数の原因であると考えられる。



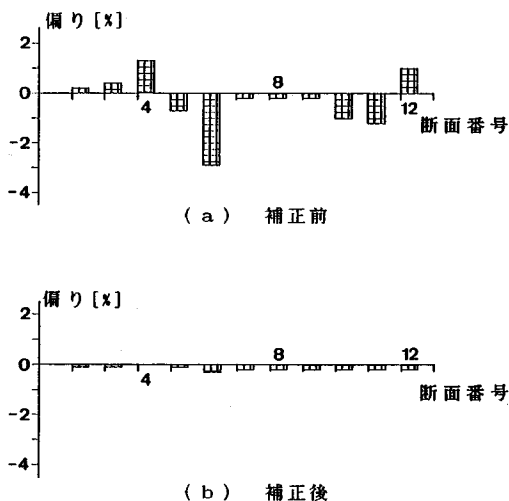
図—5 補正係数値に基づいて計算した各断面の偏り

渋滞時および非渋滞時の区別をしなければ、上下流断面における計数値を順次掛け合わせていくことにより、各断面における偏りを推定できる。このとき、本線料金所における計数値の偏りは、零と仮定する。図—7は、このようにして推定した偏りを、補正前と補正後とについて示したものである。

補正の効果は明らかであり、実用上十分な精度が得られている。しかし、各断面において補正後に-0.2%程度の偏りがほぼ共通してみられる。これは、本線料金所においても、±0.3%程度の誤差は許容されており、実際にも偏りがあることが、主な原因であると考えられる。補正係数を推定するときには、本線料金所における計数誤差分散を大きめに設定することにより、上記の程度の偏りは補正できていると考えられる。しかしながら、本推定法からは補正した値を直接に求めることができないこと、およびこの例と後出の図—8に示す例とを比較する必要があることから、ここでは本線料金所における偏りを零と仮定した結果を図示する。



図—6 断面6付近における車線変更車両の走行軌跡



図—7 補正前後における偏りの比較

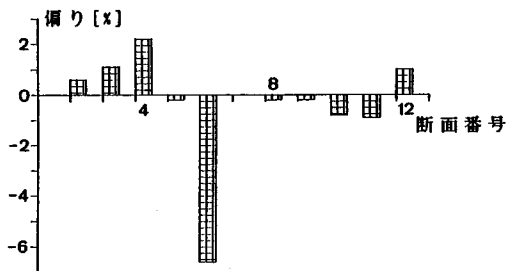
表—4 検証用感知器データの仕様

測定項目	交通量 空間平均速度または時間オキュパンシー
集計時間単位	1分(5分単位に集計して使用した。)
収集時間	6:00~19:00
収集期間	1982年12月20日~12月30日 (12月22日と12月27日は欠測)

表—5 補正係数の検証に使用した計数値の組

断面番号	車両感知器番号		計数値の組数	連続計数時間[時間]		
	走行車線	追越車線		平均	最大	最小
1	T-32*		18	3.9	12.5	1.3
2	643	644	18	3.5	13.0	1.0
3	633	634	14	4.5	13.0	1.1
4	625	626	12	5.3	13.0	1.0
5	623	624	7	5.8	12.9	1.0
6	613	614	5	8.4	12.9	1.3
7	607	608	7	8.3	12.9	6.3
8	603	604	8	9.3	13.0	6.5
9	595	597	8	9.4	13.0	6.4
10	589	590	6	8.7	13.0	4.9
11	124	125	4	7.6	12.8	1.0
12	133	134				

注) T-32*: 本線料金所(用賀)のトラフィック・カウンター



(a) 補正前



(b) 補正後

図—8 補正前後における偏りの比較(検証用データ)

図—8には、表—2および表—3に示すデータに基づいて決定した補正係数値により、表—4および表—5に示す異なる時期に収集された計数値を補正し、図—7と同じ方法により各断面における偏りを推定した結果を示す。補正することにより、各断面において偏りを高々1%程度には抑えることができる。各断面において補

正後に+0.3%程度の偏りがほぼ共通してみられる原因は、図—7の場合と同様であると考えられる。

表—2および表—3に示した首都高速道路3号上り線の約4週間分のデータを処理するのに要した時間(cpu time)は、東京大学生産技術研究所電子計算機室のFACOM M-380 Q上で約8秒と十分短く、都市高速道路網における実用化が十分に可能であると考えられる。

8. ま と め

本研究では、車両感知器により計数された通過車両台数の偏りを補正するために、最適係数値を推定・更新する計算機アルゴリズムを開発した。本アルゴリズムの特徴は以下のようにまとめられる。

(1) 車両感知器データに基づいて、各感知器設置断面ごとに、かつ渋滞時および非渋滞時の別に最適な補正係数値を与える。

(2) 補正係数の初期設定値の精度が多少低くとも、その精度を逐次改善することにより実用上十分な精度を達成し、さらにその精度を維持することができる。

(3) 渋滞検出の結果を利用して、推定精度を向上させている。

(4) 車両感知器データを逐次処理する方式であるため、計算時間および所要主記憶容量は十分に小さく、都市高速道路網におけるオンラインでの実用化が可能である。

このアルゴリズムを首都高速道路3号上り線に適用した結果、通過車両台数を実用上十分な精度で補正することができた。また、偏りの発生状況について、以下が推定された。

(1) 偏りは感知器設置断面ごとにより異なる。

(2) 非渋滞時には、各断面でほぼ共通して過小計数となっているが、偏りの大きさそのものは各断面において高々2%程度である。

(3) 渋滞時には、各断面でほぼ共通して過剰計数となっている。非渋滞時と比べてかなり偏りが大きく、2%を越える断面が数か所みられた。

画像処理技術等を応用した新しいタイプの交通流センサにより、本線上の断面においても通過車両台数を高精度に計数することができる可能性がある。いくつかの断面において高精度の計数値が得られれば、それらを料金所における計数値とともに本アルゴリズムにおける基準値として用いることにより、より高い精度の補正係数値を与えることができると考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたり首都高速道路公団から車両感知器データの提供、その他の協力を得たことを記し、謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) 首都高速道路協会：交通管制システムの性能実験報告書，1970.
- 2) 井上廣胤：車両感知器とその評価，交通工学，Vol. 2, No. 3, pp. 1~7, 1967.
- 3) 池之上慶一郎・松永典照・渡辺正己：車両感知器による交通流計測の評価について，科学警察研究所報告，Vol. 12, No. 1, pp. 1~12, 1971.
- 4) 松永典照・岩本三郎・笹島喜雄：栃木県警察本部交通管制システムのパイロット実験報告，科学警察研究所報告，Vol. 13, No. 1, pp. 61~70, 1972.
- 5) 中辻 隆・加来照俊：区分的な定常性を考慮した都市内街路の交通状態の予測について，土木計画学研究，No. 4, pp. 101~108, 1986.
- 6) 首都高速道路公団，交通工学研究会：首都高速道路の将来管制システムに関する研究（その3），1984.
- 7) 赤羽弘和：都市高速道路管制システムのパラメータ・アップデイトング，東京大学学位論文，1986.
- 8) Akahane, H. and Koshi, M. : Sort-term Prediction of Inflow Volumes of Urban Freeways, Proceedings of I. E. E. Second International Conference on Road and Traffic Control, pp. 35~38, 1986.
- 9) Akahane, H. and Koshi, M. : Updating of Volume Density Relationships for an Urban Expressway Control System, Proceedings of the Tenth International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 339~356, 1987.
- 10) Kalman, R. E. : A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Trans. ASME, J. of Basic Eng., Vol. 82 D, No. 1, pp. 35~45, 1960.
- 11) 片山 徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，1983.
- 12) 越 正毅・岩崎征人・大蔵 泉・西宮良一：渋滞時の交通流現象に関する研究，土木学会論文報告集，No. 306, pp. 59~70, 1981.
- 13) 越 正毅・岩崎征人・大蔵 泉：高速道路における渋滞検出精度の改善に関する研究，土木学会論文報告集，No. 330, pp. 121~127, 1983.
- 14) 砂原善文編：確率システム理論Ⅲ応用編，朝倉書店，1982.

(1988. 8. 15・受付)