相関を用いる自動車の速度測定[†]

井戸川 徹*・渡 正 博**・大 場 良 次*・高 井 信 勝*

Vehicular Speed Measurement by Correlation Techniques

Tohru IDOGAWA*, Masahiro WATARI**, Ryoji OHBA* and Nobukatsu TAKAI*

A new method of vehicular speed measurement is presented. The principle is to determine the transit time, which is required for two points on a motor vehicle to pass over a point on a road surface. Two optical detectors are mounted on a motor vehicle in line, in the vehicle direction. Random signals are obtained from the road surface by the detectors. The relative delay between the signals is determined from their coincidence, by shifting one of them, or from the peak of their cross-correlation function.

The measurement is capable of very high accuracy.

Errors of the speed measurements are studied in detail: The resolution of the delay determination from a single cross-correlation function depends on the sampling interval of the random signals. Statistical error of the measured speed depends on (1) the aperture diameters of the detectors, (2) SNR of the signals and (3) the averaging length required to obtain the cross-correlation functions. The vehicular speed can be determined to an accuracy of 0.7%, for instance, using rectangular apertures of 6×30 mm and an averaging length of 2.20 m.

Advantages over the conventional methods and shortcomings of the new method are described.

1. 緒 言

直進する物体の速度を測定するには、その進路に沿って二つの目印を設定し、物体がその間を通過するに要した時間 t_m を読みとる。この2点間の距離を d とすると、速度 v は d/t_m によって与えられる。この方法は、目印を特に設けることが必要な場合もあるが、簡

単でしかも高精度を期待する基本的な方法である。

相関法を用いると、鉄板¹⁾や紙テープ²⁾の移動速度を非接触で測定しうることが知られている。その測定原理を簡単に述べると、たとえば鉄板については、その表面にある微細な不規則なむらを、鉄板の移動方向に沿って一定の距離 d にある2点で観測する。このとき得られる二つの不規則信号の相互の時間のずれ t_m を、その相互相関関数の最大値が生ずる位置から推定することにより、速度 v を d/t_m から決定する。相関法による速度測定は、最初に述べた二つの目印を用いる方法と等価のものであり、高精度の速度測定が可能である。相関法を用いる速度測定に関しては、流速測定を含め、F. Mesch³⁾らによる総合報告がある。

物体表面にある不規則なむらを利用して速度測定を行なうについては、内藤ら⁴⁾によって提案された空間フィルタを用いる方法がある。内藤らはまた、モデル実験によってその有効性を示した。

自動車の速度測定には、原理的に大別して、従来つぎの3方法が用いられてきた^{5), 6)}。(1)最も簡単には、車輪の回転速度にその円周長を乗じて速度とする。路面とタイヤの間の滑りおよびタイヤの空気圧力変化に伴う実効円周長の変化が誤差の原因となる。(2)超音波や電磁波を用い、Doppler 効果を利用すると、短時間内に測定が可能であるが、精度は $\pm 2\%$ 程度であるといわれている。(3)高精度の測定を行なうには、直線道路を横切って、平行なたとえば2本の細い光束を通し、その間を自動車が通過するに要する時間を読みとる。

自動車の速度測定に相関法あるいは空間フィルタ法を適用して満足すべき結果を得た報告は、著者の知る限りでは従来見当らない。本報告は、路面に自然に存在する微細な濃淡のむらおよび凹凸から得られる不規則信号に相関法を適用して自動車の速度を測定する方法が有用であることを示す⁷⁾。相関法を用いると、道路上に特別な目印を設けることなく、曲線に沿って走行する場合を含め、高精度でしかも非接触で自動車の

[†] 第13回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭49・8)

* 北海道大学工学部 札幌市北区北13条西8丁目

** (株)横河電機製作所 武蔵野市中町2-9-32

* Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo

** Yokokawa Electric Works, Ltd., Musashino

(Received August 16, 1974)

速度測定を行ないうることを以下に明らかにする。一方、相関法による速度測定の欠点は、相関関数の計算に平均操作を伴うので、応答速度が遅いことにあるといわれている。本研究は特にこの点に留意し、相関関数の計算における平均化を行なう時間と速度測定の精度との関係を実験によって明らかにするものである。

2. 相関を用いる自動車の速度測定法の概要

舗装道路表面には微細な濃淡および凹凸による不規則なむらがある。一例として、北海道内では標準的とされている密粒度アスファルトコンクリート舗装道路の表面状態の写真を Fig. 1 に示した。走行中の自動車上から、路面の不規則なむらによる不規則信号を検出するには、Fig. 2 に概要を示した検出器を用いた。その構造は、内径が略 40 mm^φ の鋼管の一端に凸レンズを取りつけ、その焦点の位置にフォトトランジスタを固定した簡単なものである。Fig. 3 に示すように、検出器の中心軸が路面に垂直になるように検出器を車体に固定すると、路面から垂直に反射された入射平行光のみがフォトトランジスタに集光される。したがって自動車車体の上下動は、得られる不規則信号に影響を与えない。自動車の車体に、進行方向に沿って 2 本の検出器を固定して走行すると、それぞれの検出器から不規則信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ が得られる。その相互相関関数

$$\phi_{s_1 s_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T s_1(t) \cdot s_2(t + \tau) dt \quad (1)$$

が $\tau = \tau_m$ で最大値をとるとき、検出器間の距離を d とすれば、自動車の速度は d/τ_m である。実験にさいしては、取り付け上の便宜から $d = 20.0$ cm とした。信号 $s_1(t)$ と $s_2(t)$ に相関をもたせるためには、前方の検出器がみて過ぎた路面の部分と、後方の検出器の視野が少なくともある程度重なりあうことが必要である。この条件を満たすためには、自動車が直進するとしても一般に横ゆれを伴うので、検出器の開口径を 10 mm^φ 以上とすることが必要であった。実時間極性相関器を使用すると、車載の速度計を実現しえた。詳細な検討を行なうには、路面から得た信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ を可搬形の磁気テープ記録計に記録し、実験室内で再生し、電子計算機を用いて信号処理を行なった。

3. 路面から得られる不規則信号の自己相関関数

路面のむらから得られる不規則信号の自己相関関数を推定するために、Fig. 1 に示したような路面の写真を、投影器を用いて実物大に投影し、各種の大きさ

の円形開口を通して光電子増倍管によって観測した。そのさい代表的な路面として、密粒度アスファルトコンクリート舗装道路の路面を選んだ。投影器にかけた写真フィルムを一定速度でゆっくり移動させ、光電子増倍管の出力から、路面上の位置 x の関数として不規則信号 $s(x)$ を得た。その自己相関関数は距離 ξ の関数として与えられる。

$$\phi_s(\xi) = \frac{1}{L} \int_0^L s(x) \cdot s(x + \xi) dx \quad (2)$$

この自己相関関数を計算するさいの平均化の長さ L が不足すると、得られる相関関数は滑かな曲線ではなく、変動して波打っている。 L を十分大きくとると、自己相関関数は滑かな曲線となり

$$\phi_s(\xi) = \phi_s(0) \cdot \exp(-|\xi|/a) \quad (3)$$

によって表わしうることが知られた。ここに $\phi_s(0)$ は自己相関関数の最大値、 a は相関長である。多数の測定値を整理した結果、相関長 a と観測用円形開口径 D との関係を示す Fig. 4 が得られた。 $D \leq 0.4$ mm^φ では a は一定値 0.95 mm となった。この値は、観測した密粒度アスファルトコンクリート舗装道路路面における不規則なむら自体の相関長とみなしう。 $D \geq 1.0$ mm^φ のとき、 a は D に依存する。前述のとおり、実用検出器の開口径は 10 mm^φ 以上を必要とした。検出器においては、微細な路面むらをこの開口面積にわたって積分した結果が観測されるので、信号 $s(x)$ の振幅は正規分布をすると仮定して差支えない。実測値からもこのことが確かめられた。検出器の出力信号は、白色正規雑音を低域フィルタに通したものと等価である。密粒度アスファルトコンクリート舗装道路表面から得られる不規則信号の相関長は、実用上は使用する開口径に

Fig. 1 An example of paved road surfaces observed

Fig. 2 Schema of the detector. A phototransistor, located at the focal point of a convex lens, receives vertical light that is reflected at the road surface

Fig. 3 Block diagram of the speed measurement. Random signals were obtained by the optical detectors, which were mounted on a motor vehicle. Tape recorded random signals were analysed in detail using a digital computer. Direct indication of vehicular speed could be achieved using a real-time polarity correlator

Fig. 4 The correlation length of the random pattern of the paved road surface shown in Fig. 1 was determined to be of 0.95 mm. The correlation length a (mm) of a random signal that is obtained from the detector depends on its aperture diameter ($D \geq 1.0$ mm)

によって決定される。円形開口やあまり細長くない矩形開口を用いたときに、(3)式に従って滑かに減衰する自己相関関数を得るのに必要な平均化を行なう長さ L は、相関長 a の大略 1000 倍とすれば十分であった。つまり開口の面積を S (mm²) として、Fig. 4 の直線から得られる実験式

$$L = 1000a = 1.75D^{0.31} \quad (D \geq 1.0 \text{ mm}) \quad (4)$$

によって、必要な平均化を行なう長さ L の目安を得ることが可能であった。 L を(4)式によって決定したとき、自己相関関数の最大値 $\phi_s(0)$ の誤差は、 $D \leq 4.0$ mm² の場合、12~14% であることが確かめられた。なおこの値には、路面写真の現像条件の不揃に基づく無視しえない誤差が含まれている。本研究における自己相関関数推定の精度は、これで十分である。

4. 相互相関関数の推定と信号の S/N

自動車が走行中に2本の検出器から実際に得られる

信号 $f_1(t)$, $f_2(t)$ は

$$f_i(t) = s_i(t) + n_i(t) + h(t) \quad (i=1,2) \quad (5)$$

によって表わされる。ここに $n_1(t)$, $n_2(t)$ は互いに独立なそれぞれの雑音成分、 $h(t)$ は2本の検出器に共通な雑音成分である。路面のむらによる不規則信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ については、検出器間の距離 d があまり大でなく、速度 v が急激に変化しないものとし、

$$s_1(t-d/v) = s_2(t) \quad (6)$$

なる関係を仮定する。雑音相互間ならびに雑音と信号の間に相関がないとすると、相互相関関数

$$\phi_{f12}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) \cdot f_2(t+\tau) dt \quad (7)$$

は、平均化時間 T が大であるとき、 $\tau=0$ および $\tau=\tau_m=d/v$ に極大値をもつ。 $\tau=0$ においては、雑音 $h(t)$ の自己相関関数 $\phi_h(\tau)$ が最大値をとり、 $\tau=\tau_m$ においては、信号の相互相関関数 $\phi_{s12}(\tau)$ が最大値をとる。 T が十分大でない場合には、 $\phi_h(\tau)$ および $\phi_{s12}(\tau)$ が変動して波打つだけでなく、その上に雑音相互間や雑音と信号間の相関値の零付近での変動分が重ね合わされる。したがって相関関数の推定について論ずるさいには、 S/N に考慮をばらう必要がある。

検出器から実際に得られる信号 $f_1(t)$, $f_2(t)$ からその S/N を計算する方法を以下に述べる。まず

$$c(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [f_1(t) - f_2(t+\tau)]^2 dt \quad (8)$$

は観測値 $f_1(t)$, $f_2(t)$ のみから計算可能である。(8)式に(5)式を代入し、雑音相互間および雑音と信号成分間には相関がないと仮定すれば

$$c(\tau) = \sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2 + \sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 + 2\sigma_h^2 - 2(\phi_{s12}(\tau) + \phi_h(\tau))$$

が得られる。ここに σ_{s1}^2 , σ_{s2}^2 は信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ の分散を表わし、 σ_{n1}^2 , σ_{n2}^2 および σ_h^2 はそれぞれ雑音 $n_1(t)$, $n_2(t)$ および $h(t)$ の分散である。信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ の分散は等しいから σ_s^2 で表わし、さらに、無理のない仮定として $\phi_{s12}(0) \doteq 0$ および $\phi_h(\tau_m) \doteq 0$ を導入すると

$$\sigma_s^2 \doteq \phi_{s12}(\tau_m) \doteq \phi_{f12}(\tau_m) \quad (9)$$

である。これらの関係を用いて

$$c(\tau_m) \doteq \sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 + 2\sigma_h^2 \quad (10)$$

が導出される。そこで S/N を

$$\frac{S}{N} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_{n1}^2 + \sigma_{n2}^2 + 2\sigma_h^2} \doteq \frac{\phi_{f12}(\tau_m)}{c(\tau_m)} \quad (11)$$

によって定義すると、(7)式の T を十分大きくとり、観測値から S/N を計算しう。実際に(11)式を計算するにあたっては、(4)式に得られた結果を参照し、(7)式および(8)式における平均化の時間 T を、

路面上での長さに換算したとき 7~10 m となる値とした。自動車は略直線に沿って走行するときに得られる信号については

$$\frac{S}{N} = 0.8 \sim 1.5 \quad (12)$$

であった。

5. 速度測定とその誤差

本節においては、密粒度アスファルトコンクリート舗装道路上で速度測定を行なった結果について誤差を検討する。誤差は主として、相関関数を計算するさいのサンプリング間隔および平均化時間の不足によって生ずる。

5.1 サンプリング間隔にもとづく誤差: $\varepsilon(\Delta\tau)$

路面から不規則信号を得るための検出器の開口径 D を 15.5 mm^{Φ} とし、自動車が直線に沿って走行するさいに得られる信号 $f_1(t)$, $f_2(t)$ を可搬形カセット磁気テープ記録計に記録した。これを実験室内で再生し、市販のデジタル相関器を用いて相互相関関数 $\phi_{f_1 f_2}(\tau)$ を計算した。そのさいサンプリング周期 $\Delta\tau$ を $200 \mu\text{s}$, 平均化を行なうデータ数を 800 点とした。得られる $\phi_{f_1 f_2}(\tau)$ が, m を整数として

$$m \cdot \Delta\tau \leq \tau < (m+1) \cdot \Delta\tau$$

の区間で一定の極大値をとるとき, 検出器間の距離を d とすると, 速度 v は

$$\frac{d}{(m+1/2) \cdot \Delta\tau} \leq v < \frac{d}{(m-1/2) \cdot \Delta\tau}$$

である。ここでは速度の推定値 $\hat{v}$ を

$$\hat{v} = \frac{d}{m \cdot \Delta\tau} \quad (13)$$

とした。このとき, サンプリング間隔に基づく誤差 $\varepsilon(\Delta\tau) = (\hat{v} - v)/v$ は, $v = d/\tau_m$ であるから, つぎの関係を満足する。

$$|\varepsilon(\Delta\tau)| \leq \frac{\Delta\tau}{2\tau_m} \doteq \frac{1}{2m} \quad (14)$$

実験にさいしては, 同時に車外から速度を測定しておいた。道路を直角に横切って平行な 2 本の細い光束を通し, 自動車がその間を通過するに要した時間を, 電子式計数器で読みとった。2 本の光束間の距離は 20.00 m とした。

上記 2 法による測定結果の例を Table 1 に示して比較した。相関法による測定値は, 車外からの測定値に比較して全般的に大であり, その差は速度が 20 km/h を越えると $-0.3 \sim 1.8\%$ である。速度が 20 km/h 以下では, その差は多くの場合 2% よりも大であった。これらのことは主として自動車が正確には直進し

ていなかったこと, さらに 2 本の検出器がわずかではあるが進行方向からずれて固定されていたことに起因すると考えられる。なお Table 1 に示された結果に含まれる誤差 $|\varepsilon(\Delta\tau)|$ は 0.8% 以下である。

5.2 統計的誤差: $\varepsilon(\tau_m)$

自動車が走行中に得られる不規則信号 $f_1(t)$, $f_2(t)$ の一方に故意に雑音を加えると S/N を任意に調整しうる。自動車が一定速度 38.5 km/h で走行中に得られた信号 $f_1(t)$, $f_2(t)$ を磁気テープに記録し, 実験室内で再生するさいに, 同じ路面の他の部分から得られる不規則信号を雑音として加え, S/N を調整した。その上で電子計算機を用いて多数の相互相関関数を計算した。その極大値が生ずる τ_m から速度を求め, それらの標準偏差と平均値の比を統計的誤差 $\varepsilon(\tau_m)$ とした。

検出器の開口は, 直径 40 mm $^{\Phi}$ の円形あるいは $6 \times 30 \text{ mm}$ の矩形とした。矩形開口を使用する場合には, その短い辺が自動車の進行方向に平行になるように装着した。信号 $f_1(t)$, $f_2(t)$ の S/N を 1.2, 0.7, 0.2 に調整した場合の平均化の長さ誤差の関係を Fig. 5 に示した。Fig. 5 は多数の実験結果全体の傾向を示すために選んだ少数例である。相関関数の計算にはサンプリング周期を $300 \mu\text{s}$ (路面上では 3.2 mm) とした。誤差 $\varepsilon(\tau_m)$ は, 平均化を行なう長さ L が 0.96, 1.6, 2.2 および 3.2 m の場合, それぞれ 20, 12, 8 および 6 個の速度測定値から計算した標準偏差である。なおこの場合, 誤差 $|\varepsilon(\Delta\tau)|$ は約 0.7% である。

統計的誤差 $\varepsilon(\tau_m)$ と平均化を行なう長さ L の関係における特徴を以下に列挙する。(1) 矩形開口 ($6 \times 30 \text{ mm}$) を用いる場合: $S/N=1.2$ のとき, $L \geq 1 \text{ m}$ であれば, $\varepsilon(\tau_m) < 0.7\%$ であった。 $L=3.2 \text{ m}$ とすると, $S/N=1.2 \sim 0.2$ について, 極性相関関数を用いても, 上記 6 個の速度測定値間に差が認められなかった。(2) L が小であるとき $\varepsilon(\tau_m)$ を増加させる原因は, 開口径が大であること, S/N が小であること, 極性相関関数を用いることにある。(3) $L=3.2 \text{ m}$ とした場合: 開口径を 40 mm $^{\Phi}$ とし, $S/N=0.7$ の信

Table 1 Comparison of the speeds determined from cross-correlation functions with those obtained by the parallel beam method. The distance between the parallel beams was 20.00 m

Speeds (km/h) obtained by	
cross-correlation	Parallel beam method
19.5	19.0
28.2	27.7
35.3	35.4
38.7	38.7
45.0	44.3
46.2	45.5
53.7	53.7

Fig. 5 Statistical error $\varepsilon(\tau_m)$ of the speed determination against averaging length L to obtain the cross-correlation function. The error depends also on the S/N of the random signals. Apertures used to obtain the random signals: circular apertures of 40 mm²; rectangular apertures of 6×30mm, whose shorter sides were parallel to the direction of the vehicle

Fig. 6 Statistical error $\varepsilon(\tau_m)$ of the speed determination against averaging length L/a . The S/N of the random signals were about 1

号について極性相関関数を用いても、 $\varepsilon(\tau_m) < 0.7\%$ であった。

Fig. 6 は、 $S/N \approx 1$ の場合について、統計的誤差 $\varepsilon(\tau_m)$ と平均化を行なう長さとの関係を示したものである。平均化の長さは相関長 a を単位として表わした。Fig. 6 の直線は、実験式

$$\varepsilon(\tau_m) = 0.094(L/a)^{-0.5} \quad (S/N=1) \quad (15)$$

によって与えられる。 $S/N \approx 1$, $L > 150a$ のとき、

$\varepsilon(\tau_m) < 1\%$ としてよいであろう。

6. 長所と欠点

本測定方法は、きわめて高精度の自動車の速度測定値を与えるものであり、他の測定法の基準となりうるものである。直線進路上に二つの目印を設ける方法に比して、本方法は、曲線に沿った走行時にも適用可能である点ですぐれている。また進路に沿って特別な装置を設ける必要もない。

検出器は簡単かつ堅固であり、しかも検出される不規則信号が自動車車体の上下動の影響を受けない構造をもっている。路面の不規則なむらを利用する点では同様な空間フィルタを用いる速度測定法においては、直接観測されるのは路面の像である。この像を得るための光学系の倍率の誤差は、そのまま速度測定の誤差となる⁴⁾。

検出器には矩形開口を用い、その長い辺を自動車の進行方向と直角にするのが実用上有利である。円形開口に比して、曲線走行にさいして S/N の低下を少くし同時に得られる不規則信号の相関長を短かく保ちうるからである。

本方法の測定時間は、主として、相互相関関数の計算にさいして必要な平均化を行なう長さによって定まる。路面から得られる不規則信号の S/N が 1 のとき、速度測定値の誤差を 1% 以下とするには、平均化を行なう長さを、得られる不規則信号の相関長の略 150 倍以上とすればよい。つまり、相関関数自体の推定はかなり粗いもので十分である。その結果、本方法の測定時間はそれほど長いものではない。空間フィルタを用いる速度測定法の応答速度も測定値に要求される精度によるが、文献 4) に示されているモデル実験の 1 例によれば、その応答速度は本論文に示した測定時間に比して必ずしも速いとはいえない。しかし速度がきわめて低い場合には、空間フィルタを用いると、得られる信号の中心周波数を任意に調節しうる可能性がある点で有利であろう。

路面に自然に存在する不規則なむらを利用する測定法は、路面から不規則信号が得られない場合は使用不可能である。以下には、路面に関して知り得た事実を列挙する。

本論文においてすでに示した結果は、すべて密粒度アスファルトコンクリート舗装道路表面が乾燥した状態で行なった実験に基づくものである。道路の舗装方法は多様であるが、著者の行なった測定によれば、路面むらの自己相関関数の相関長は、通常検出器の開口径に比して短い。この場合、得られる信号の相関長は

開口径によって定まる。したがって通常の道路においてはこれまでに示した結果と同様な成果を期待する。砂利道の路面から得られる不規則信号には周期成分が多く含まれるので、相関関数を計算するさいに平均化の長さを大きめにとる必要がある。

舗装道路が湿って肉眼には黒ずんで見える場合にも、また降雪後凍結した路面についてもある程度の交通量のある道路では、不規則信号が得られた。路面が冠水している状態では不規則信号は得られないが、それが浅い場合には、タイヤが通過した直後に路面の露出した部分があり、不規則信号が得られると考えられる。

簡単な増幅器で安定した不規則信号を得るには、夜間と同様に、検出器の視野となる路面の部分の照明するのがよい。そのためには懐中電燈による程度の照明で十分であった。路面がぬれている場合には検出器が汚れやすい。乾燥舗装道路上での実験においては、検出器は長時間の使用に耐え、特に問題はなかった。

7. 結 語

本報告は、相関を用いる新しい自動車の速度測定法を示し、その有用性を明らかにした。本方法によれば、道路上に特別な目印を設けることなく、曲線に沿って走行する場合を含め、高精度でしかも非接触で速度測定を行ないうる。

本測定法における誤差の主なるものは、実用上、相関関数を計算するさいの、サンプリング間隔に基づく誤差 $\varepsilon(\Delta\tau)$ および平均化時間の不足による統計的誤差 $\varepsilon(\tau_m)$ である。 $\varepsilon(\tau_m)$ をたとえば1%以下にするためには、 $S/N \approx 1$ のとき、平均化を行なう長さを、路面から得られる不規則信号の相関長の約150倍とすればよいことが、実験結果として得られた。換言すれ

ば、速度測定を目的とする場合、相関関数自体の推定はかなり粗いもので十分であり、したがって測定時間は、直観的に予想されるよりも短いことが確かめられた。 S/N の計算法も示した。

本方法は、路面の状態が、不規則信号の検出が可能である場合に適用可能である。乾燥した舗装道路上における速度測定については、まったく問題はなかった。路面から不規則信号が得られ、その相関長が検出器の開口径によって定まる場合には、(ほとんどの舗装道路についてこの条件は満される)、本報告に示した結果と同程度の成果を期待しうる。本速度計の積算値を用いると、実際に走行した距離を示す、高精度の距離計を実現しうる可能性がある。

実験にさいしては、北海道大学工学部加来教授、開発局木土試験所高橋室長にご援助を頂き、多数の学生諸君の協力を得た。検出器は小野測器製作所に製作して頂いたものである。厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) M.H. Butterfield et al.: A new method of strip-speed measurement using random-waveform correlation, Trans. Soc. Instr. Technology, **13**, 111/123 (1961)
- 2) 柏木, 片岡: 相関を用いる速度計測(I), 計測と制御, **2-1**, 41/46 (1963)
- 3) F. Mesch et al.: Geschwindigkeitsmessung mit Korrelationsverfahren, I, II, Messtechnik, **7**, 152/157, 163/168 (1971)
- 4) 内藤, 狼, 小林: 空間フィルタによる速度計測, 計測と制御, **7-11**, 761/772 (1968)
- 5) D.E. Cleveland: *Manual of Traffic Engineering Studies*, p. 32, Institute of Traffic Engineers (1964)
- 6) 松長, 金泉: 交通調査用機器, p. 22, 技術書院(1966)
- 7) 井戸川 他: SICE 学術講演会予稿集, 第10回 (1971), 第12回 (1973), 第13回 (1974)