北海道大学工学部研究報告
第 74 号 (昭和 49 年)

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University, No. 74 (1974)

相関法による自動車速度計の誤差と応答速度

渡　正博** 井戸川　徹*

(昭和 49 年 7 月 25 日受理)

Errors and Response-Time of Vehicular Speed Measurement by Cross-Correlation Techniques

Masahiro WATARI** Toru IDOGAWA*

(Received July 25, 1974)

Abstract

The speed of a vehicle may be determined from the cross-correlation function of random signals which are obtained from a road surface by simple optical detectors. This paper presents an experimental method to estimate errors of the speed measurement. The error depends on (1) the aperture diameters of the signal detectors, (2) the averaging length of the cross-correlation functions, and (3) the *S/N* ratio of the random signals whose cross-correlation function is to be determined. An expression of the *S/N* ratio is also introduced. This evaluation can be performed from the random signals given by the detectors. Generally speaking, an extremely long averaging length is required to estimate the correlation functions; on the basis of the experimental results, however, it was shown that short averaging lengths are sufficient to determine the speed accurately. It is expected from the experimental results that the speed can be determined to an accuracy of 0.5%, using for instance a rectangular aperture of 6×30 mm and an averaging length of 2.5 m.

1. 緒　　言

相関法を用いる速度測定に関しては既に多数の報告があり[1]，たとえば鉄板表面の微細な凹凸[2]，紙の厚薄のむら[3]から得られる不規則信号を利用することにより，鉄板や紙の移動速度を測定しうることが知られている。相関法を用いると，一般に雑音の影響を除きうるので，高精度の測定が可能であり，速度測定に応用すると，非接触測定が可能であると言う利点がある。一方，相関函数の計算には平均操作を伴うので，変化の速い速度測定には適用し難いと言われている。しかし相関法を用いる速度測定に関する従来の報告には，相関函数の計算に必要な平均長と速度測定の誤差の関係についての明確な論議が見当らない。

著者は，路面の微細な濃淡のむらから得られる不規則信号を利用して，自動車の速度を測定

*　応用物理学科応用計測学講座
*　現在，横河電機製作所に勤務
*　Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Hokkaido University.
*　Yokogawa Electric Works, Ltd.

する実験について報告して来た[4]。本論文は，その自動車の速度測定に関連して，速度測定の誤差と相関函数の計算に必要な平均長の関係を明らかにする。

相関函数の推定に必要な平均長は，対象とする不規則信号の性質，たとえばその信号の周波数帯域に依存する。相関法の速度測定への適用の可否は，測定に要求される精度および応答速度と，利用する不規則信号の性質との，相対的な関係によって定まる。さらに，速度測定に際しては，相関函数そのものの推定ではなく，速度測定に要求される精度にもとづいて平均長を定めるべきである。

速度測定に必要な平均長は，相関函数の推定に必要な平均長に比較して，極めて短いことを本報は明らかにする。その際用いる誤差の推定法および得られる結果は，相関法による速度測定一般に応用可能である。

2.　路面から得られる不規則信号

舗装道路表面には微細な濃淡のむらあるいは凹凸があり，Fig. 1 に示すような写真が得られる。投影器を用いて路面の写真を実物大に投影し，各種の大きさの開口を通して光電子増倍管によって観測した。投影器にかけるフイルムを一定速度で移動させ，光電子増倍管の出力として得られる不規則信号 $s(t)$ を磁気テープに記録した。磁気テープを再生して得られる信号 $s(t)$ を A/D 変換し，電子計算機を用いてその自己相関函数 $\phi_s(\xi)=\overline{s(x)\cdot s(x+\xi)}$ を推定した。

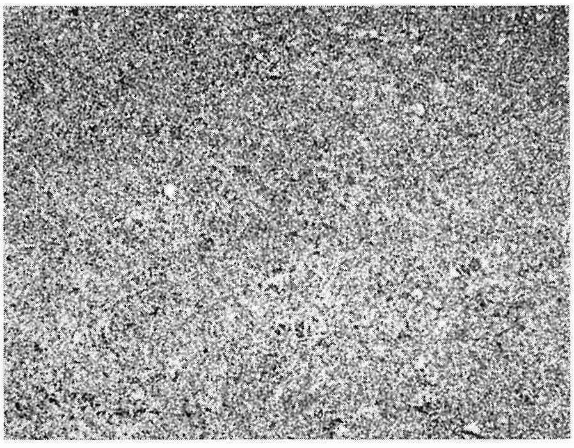

Fig. 1.　A photograph of a paved road surface.

平均長が充分大きくないまま開口径を大きくすると，得られる相関函数は滑らかな曲線ではなく，変動して波打っている。開口径を一定に保ち，平均長を充分大きくとると，相関函数は滑かな曲線となり，自己相関函数 $\phi_s(\xi)$ は

$$\phi_s(\xi)=\exp(-|\xi|/a) \quad (1)$$

に近づく。相関長 a は開口径に依存す

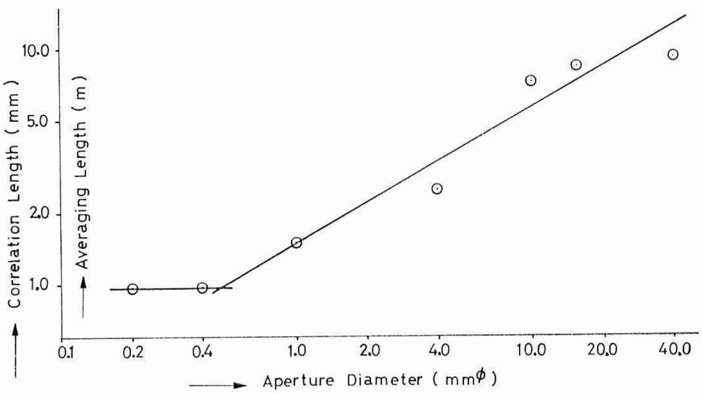

Fig. 2.　Correlation lengths of random signals depend on aperture diameters of detectors.

る。多数の実験値を整理した結果，Fig. 2 が得られた。路面写真を観測する開口径を次第に小さくして，0.4 mm$^\phi$ 以下の円形開口を用いると，一定な相関長 0.95 mm が得られた。この結果は密粒式アルファルトコンクリート舗装道路についての値である。

実際に自動車の速度測定を行うに際しては，自動車の振動やゆれに耐えるため，路面むら検出器の開口径は 10 mm$^\phi$ 以上を必要とする。微細な路面むらを，この面積にわたって平均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。しかも路面むらの自己相関函数の相関長は 0.95 mm であるから，検出器の出力信号は，白色正規不規則信号を低域フイルタに通したものと等価である。

白色正規不規則信号を一次 RC 低域フイルタに通して得られる信号の自己相関函数は $\exp(-|\tau|/RC)$ で表わされ，$\tau=0$ における誤差を 5% 以下にするためには，平均長を略 1000 RC 以上にすればよいことが知られている[5]。

簡単のため，検出器の開口径を一次低域フイルタと仮定する。検出器の出力信号の自己相関函数の誤差を 5% 以下にするためには，平均長は相関長の略 1000 倍以上とすればよい。したがって，Fig. 2 の相関長 (mm) を平均長 (m) に読みかえると，各開口径について必要な平均長が得られる。あまり細長くない矩形開口を用いた時の必要平均長 L は，開口面積を S として，Fig. 2 から得られる実験式

$$L=1.7\,S^{0.31} \tag{2}$$

によって見当をつけることが可能であった。

3.　相互相関法を用いる速度測定

自動車車体の側面に 2 本の検出器を，走行方向に $d(=20\text{ cm})$ の距離をもって取りつけた。自動車が走行中に 2 本の検出器から得られる信号 $z_1(t)$, $z_2(t)$ は

$$\left.\begin{aligned} z_1(t)&=s_1(t)+n_1(t)+h(t)\\ z_2(t)&=s_2(t)+n_2(t)+h(t)\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

で表わされる。ここに $s_1(t)$, $s_2(t)$ は不規則信号，$n_1(t)$, $n(t)$ はそれぞれの雑音成分，$h(t)$ は 2 本の検出器に共通な雑音とする。自動車の速度を v とするとき，信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ の間には，$\tau_m=d/v$ なる時間差がある。

$$s_1(t-\tau_m)=s_2(t) \tag{4}$$

雑音相互間ならびに雑音と不規則信号の間に相関がないとすると，相互相関函数 $\overline{z_1(t)\cdot z_2(t+\tau)}$ は，$\tau=0$, $\tau=\tau_m$ に極大値をもつ。$\tau=0$ においては，$h(t)$ の自己相関函数 $\phi_{hh}(\tau)$ が最大値をとり，$\tau=\tau_m$ においては，信号の相互相関函数 $\phi_{s12}(\tau)=\overline{s_1(t)\cdot s_2(t+\tau)}$ が最大値をとる。したがって，相互相関函数 $\phi_{z12}(\tau)=\overline{z_1(t)\cdot z_2(t+\tau)}$ を計算し，その極大値の生ずる位置 $\tau=\tau_m$ を求めると，$v=d/\tau_m$ から自動車の速度 v が得られる。

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から，速度を測定することも可能である。この方法は，簡単でしかも現在最も確からしい測定値を与えるとされている。実験に際しては，2 本の光束の間の距離を 5 m あるいは 20 m とした。この方法による速度測定値と，相関法による測定値の比較の 1 例を，表 1 に示した。検出器の開口には円形 15.5 mm$^\phi$ を用いた。相関函数の計算には市販の 4 bit デイジタル相関器を使用し，サンプリング間隔を 200 μs，サンプリング点数は 800 点とした。したがって自動車の時速 36 km/h における平均長は 1.6 m になる。相関法による測定値が，車外からの測定値に比して高い値をと

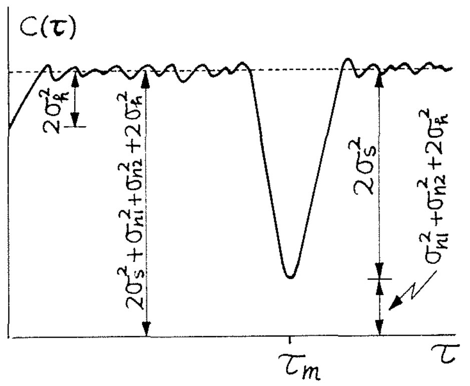

Fig. 3. The S/N ratio of the random signals are determined by using the value of $c(\tau_m)$.

表1 速度測定値の比較

自動車の速度計による速度 (km/h)	相関法による速度 (km/h)	道路上の2点間を通過するに要した時間による速度 (km/h)
20	19.5	19.0
28	28.1	27.0
29	28.2	27.7
38	35.3	35.4
41	38.7	38.7
47	45.0	44.3
47	46.2	45.5
56	53.7	52.6
58	53.7	53.7

るのは，主として200 μs のサンプリング間隔によるものであると考えられる。この結果から，Fig. 2に示した自己相関函数の推定に必要な平均長に比較してはるかに短い平均長にも拘らず，相関法によって高精度の測定値が得られることが知られた。

4. 相互相関函数における S/N

平均長が充分長くない場合には，(1) 雑音相互間や雑音と不規則信号の間の相関値は零の付近で変動し，(2) 自己相関函数 $\phi_{hh}(\tau)$ および相互相関函数 $\phi_{s12}(\tau)$ に変動が重畳される。この結果，相互相関函数 $\phi_{z12}(\tau)$ の極大値の位置 τ_m に変動が生じ，速度測定の誤差となる。したがって速度測定の誤差は平均長のみでなく S/N にも依存する。

実験に際して実際に得られる信号 $z_1(t)$ および $z_2(t)$ から S/N を求める方法を以下に述べる。まず

$$c(\tau)=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T\Big[z_1(t)-z_2(t+\tau)\Big]^2dt \tag{5}$$

なる量を考え，その右辺に(3)式を代入すると，雑音相互間および雑音と不規則信号の間に相関がないとして

$$c(\tau)=\sigma_{s1}^2+\sigma_{s2}^2+\sigma_{n1}^2+\sigma_{n2}^2+2\sigma_h^2-2\Big(\phi_{s12}(\tau)+\phi_{hh}(\tau)\Big) \tag{6}$$

が得られる。ここに σ_{s1}^2, σ_{s2}^2, σ_{n1}^2, σ_{n2}^2, σ_h^2 は，$z_1(t)$, $z_2(t)$ の各成分の分散である。信号 $s_1(t)$, $s_2(t)$ の分散は等しく，さらにその値は $\phi_{s12}(\tau_m)$ に等しいと考えられるから，

$$\sigma_{s1}^2+\sigma_{s2}^2=2\sigma_s^2\doteqdot2\phi_{s21}(\tau_m)$$

である。また $\phi_{hh}(\tau_m)\doteqdot0$ とすると

$$c(\tau_m)\simeq\sigma_{n1}^2+\sigma_{n2}^2+2\sigma_h^2$$

となる。同様に $\sigma_h^2\doteqdot\phi_{hh}(0)$, $\phi_{s12}(0)\doteqdot0$ とすると

$$c(0)\simeq\sigma_{n1}^2+\sigma_{n2}^2+2\sigma_s^2$$

である。したがって $c(\tau)$ は Fig. 3に示すような値をとる。S/N を

$$\mathrm{S/N}=\frac{\sigma_s^2}{\sigma_{n1}^2+\sigma_{n2}^2+2\sigma_h^2}=\frac{\sigma_s^2}{c(\tau_m)} \tag{7}$$

によって定義すると，この値は観測値のみから計算することが可能である。

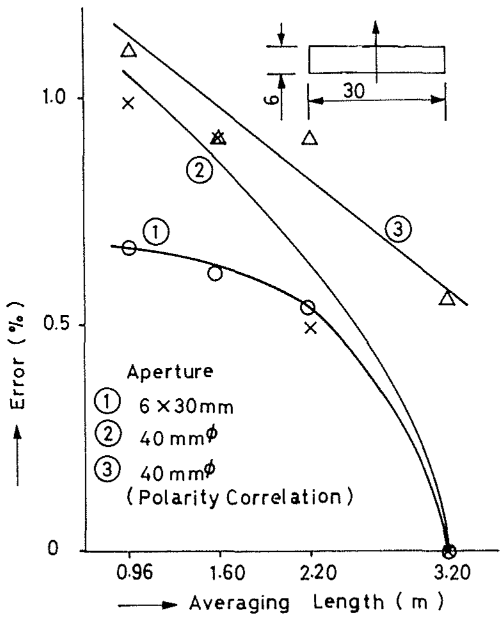

Fig. 4. Errors of the speed measuremenas.

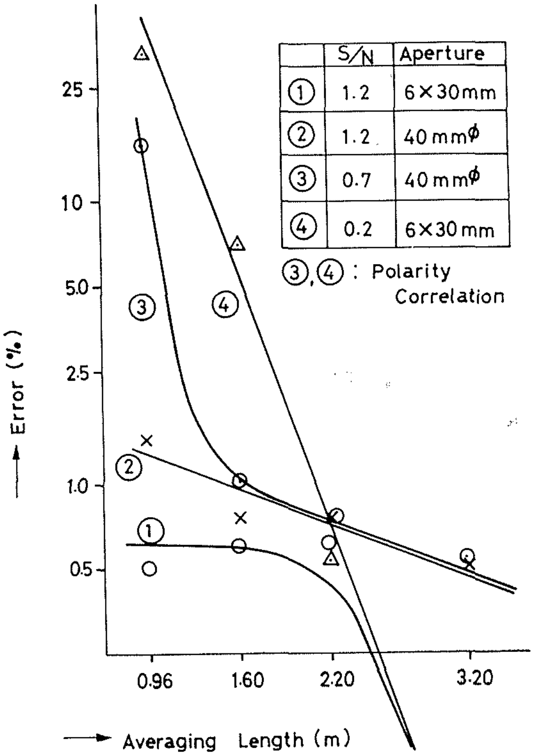

Fig. 5. Errors of the speed measurements depend on the S/N ratio of the random signals obtained from paved road surfaces.

5.　相関法による速度測定の誤差

自動車の走行中に得られる信号 $z_1(t)$, $z_2(t)$ を磁気テープに記録し，実験室内で再生し，電子計算機を用いて多数の相互相関函数を計算した。その極大値が生ずる位置 τ_m から速度を求め，それらの分散の平方根を計算し誤差の測度とした。自動車が略直線上を走行するときに得られた観測信号については，S/N は 0.8～1.5 であった。

開口径および平均長を変え，等速度（約 40 km/h）で走行する際に得られた不規則信号の相互相関函数から速度測定を行った。その測定値の誤差を Fig. 4 に示した。開口は，進行方向に 6 mm，それと直角方向に 30 mm の矩形開口，ならびに 40 mm$^\phi$ の円形開口を使用した。誤差は，平均長が 0.96 m で 20 個，1.6 m で 12 個，2.2 m で 8 個，3.2 m で 6 個の速度測定値から計算した分散の平方根である。

実際に路面から得られる信号 $z_1(t)$, $z_2(t)$ は時間の函数である。相関函数の計算にはサンプリング間隔を 300 μs とした。たとえば平均長 0.96 m はサンプル数 300 点を意味し，3.2 m の平均長はサンプル数 1000 点を意味する。

$z_1(t)$, $z_2(t)$ の一方に故意に雑音を加えると，S/N を任意に調整することができる。加える雑音としては，同じ路面の他の場所から得た不規則信号を用いた。矩形（6×30 mm）あるいは円形（40 mm$^\phi$）の開口を用いて得た不規則信号 $z_1(t)$, $z_2(t)$ の S/N を，1.2, 0.7, 0.2 に調整した場合の，平均長と誤差の関係の例を Fig. 5 に示した。その特徴を以下に列挙する。(1) 平均長が 3.2 m 以

上あれば，いずれの場合にも誤差は 0.5% 以下となった。(2) 平均長が短いとき誤差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，極性相関を用いることにある。(3) 平均長が短いとき，特に S/N がある値よりも小さくなると，誤差が急激に増加した。(4) 矩形開口 (6×30 mm) を用いると，S/N が 1.2 の場合，平均長が 1 m 以上あれば誤差は 0.7% 以下となった。

進行方向に短かく，それと直角方向に長い矩形開口を用いると，自動車が曲線に沿って走行する場合特に有効である。その理由は次の 2 つの事実にある。このような矩形開口を用いて路面から得られる不規則信号の相関長は，等しい面積をもつ円形開口を用いる場合に比較して短い。また自動車が曲線に沿って走行する場合に，等しい面積をもつ円形開口に比較して S/N の低下が少ない。

Fig. 5 に示した結果は，速度測定の誤差を 0.5% 以下にするには，矩形開口 (6×30 mm) を用いると，自動車が曲線に沿って走行する場合を含め，略 2.5 m 以上の平均長をとれば充分であることを示している。

6. 結　論

本報告は，従来明らかにされていなかった，相関法による速度測定の誤差と，相関函数の計算に必要な平均長の関係を，自動車の速度を測定する実験に関連して明確にしたものである。速度測定において希望する精度を得るための平均長は，同じ精度で相関函数を推定するための平均長に比して，極めて短いことが知られた。その結果，相関函数の推定には極めて長い平均長を必要とするので，速い変化を伴う速度測定には適用し難いとするのは誤りであることを指摘した。

希望する精度を得るための平均長は，信号の S/N および検出器の開口径に依存する。実際に得られる信号から，その S/N を計算する一方法を示した。進行方向に短く，それと直角方向に長い矩形開口を用いると，特に自動車が曲線に沿って走行する場合に有効である。実験結果から，自動車の速度をたとえば 0.5% 以下の誤差で測定するに要する平均長は，略 2.5 m であると推定される。

本論文で示した方法と結果は，相関法を用いる速度測定一般に応用可能である。

文　献

1) 磯部　孝：相関函数およびスペクトル，東大出版会 (1968).
2) Butterfield, M. H. *et al.*: Trans. Soc. Instrument Technology **13** (1961) 111.
3) 柏木　濶，他：計測と制御 **2** (1963) 41.
4) 井戸川徹，他：計測自動制御学会学術講演会，第 **10** 回 (1971) 593；第 **12** 回 (1973) 665.
5) 西村正太郎，他：計測自動制御学会学術講演会，第 **2** 回 (1963) 225.