ランダムなインパルス列の遅延時間の短時間・高精度推定法[†]

章 勲 寧*・佐藤 拓 宋*

Short Time and High Accuracy Time Delay Estimation of a Random Impulse Sequence

Kyung-Young JHANG* and Takuso SATO*

This paper proposes a new method to estimate time delay of a random impulse sequence in a short time with high accuracy.

In the proposed method, a Reset-Set Flip-Flop is used to obtain the rectangular pulse sequences which are set by the impulses of original signal and reset by the ones of delayed signal. Then the time delay which is sufficiently small than the mean interval between impulses of the signal is directly estimated by measuring the total width of rectangular pulses in the given short time.

However, if the time delay is not so small then the output rectangular pulses of the Flip-Flop are incorrectly reset by the impulses coming before the real delayed ones, hence the estimated time delay becomes smaller than the real one. In order to overcome this disadvantage we propose the employment of adaptive gate which prohibits the inpouring of the impulses coming before the real delayed ones into the Flip-Flop. By this means, the output rectangular pulses can be reset correctly and we can estimate the delay accurately up to any desired large range.

The validity of the presented processes are verified by computer simulations using the Poisson random impulse sequences.

This method is also applicable for continuous random signals if we transform them into the corresponding pulse sequences by using proper pre-processing. The results applied to the continuous signals which have been obtained from the actual instruments showed the usefulness of the proposed method. The result was as good as that of the second-order cross-correlation method.

Key Words: random impulse sequence, time delay, short time estimation, flip-flop, adaptive gate

1. はじめに

流体の流れの流速あるいは移動物体の移動速度などの計測に、異なる空間位置で検出した信号の間の遅延時間を推定し用いる方法があるが、この方法では遅延時間の正確な推定が不可欠である。そのため従来からは信号の間の相関関数を直接計算するか、あるいはフーリエ変換とその逆変換を用いて求められる相互相関関数からピークを与えるところを見つける、いわゆる相関法がもっとも一般に用いられてきている^{1),2)}。またこの方法が相関関数でのピークのみ注目し、相関係数の値そのものには注目していないということから信号の一方あるいは両方を極性化して用いることにより信号処理を単純化し処理時間を短縮したりレー法、極性相関法などもある^{1),3)}。

しかしこれらの手法で遅延時間を推定するためには、一定時間で計測したデータをもとにフーリエ解析を行うか、それとも遅延時間を順次変えながら相互相関関数を計算しその値が最大になる点を求める必要があり、したがって実時間的な処理はきわめて困難であった。

これらに対してランダムなインパルス列の場合、もとの信号と遅延信号をフリップフロップを通すことにより得られる矩形パルスの積分からその遅延時間を短時間で推定する方法がある。しかしこの手法では正しく計測できる遅延時間の大きさが小さいところに限られてしまうという問題があった。

本論文では後者の方法の発展として遅延信号のフリップフロップへの流入を適応的に閉じる複数のゲートを並用することにより、広い範囲の遅延時間までも短時間でかつ高精度に推定することができる新しい方法を提案する。なおこの手法は連続信号の場合には適当な前処理によってインパルス化し用いることにより適用できることも示す。提案する手法では1、精度は

[†] 第37回応用物理学関係連合講演会で発表(1990・3)

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 横浜市緑区長津田町 4259

* The Graduate School at Nagatsuta, Tokyo
Institute of Technology, Yokohama
(Received May 8, 1990)

(Revised September 19, 1990)

相関法と同等にしなから 2, 計測時間はもっと短くし実時間的な処理ができるようにすることを目的としている. このことにより流量あるいは速度などが時間とともに変化していく場合でも瞬時的な計測ができるようになると思われる.

提案したプロセスの有用性をまずポアソン分布に従うランダムなインパルス列を用いた計算機シミュレーションにより検証する. つぎに実際の計測系から得られた連続信号にも適用することにより, 遅延時間がこの場合にも相関法と同等の精度で推定できることを示す.

2. 従来の手法とその限界

まずランダムなインパルス列の遅延時間を短時間で推定するための従来の手法について簡単に示し, その限界を明らかにすることにする. また説明のために Fig. 1 に示すようなポアソン分布に従うランダムなインパルス信号 $x(t)$ とその遅延信号 $y(t)$ を用いることにする. ここで λ は単位時間間隔 Δt の中に生起するインパルスの平均数で $1/\lambda$ はインパルスの平均間隔となり, T はデータ長である. そこで信号 $x(t)$ と $y(t)$ を 1 個のフリップ-フロップの二つの入力として得られる矩形パルス信号 $Q(t)$ を考える. 矩形パルスは $x(t)$ のインパルスによってセットされ $y(t)$ のインパルスによってリセットされる. すると遅延時間がパルスの平均間隔より十分小さい場合には矩形パルスは遅延に相当する幅をもつことになる. したがって, 遅延時間 τ は矩形パルスの幅をデータ長 T にわたって積分しその間の矩形パルス数で割ることによって (1) 式のように求めることができる.

$$\tau = \alpha \cdot \frac{1}{N} \int_0^T Q(t) dt \quad (1)$$

ここで α は系によって決まる比例常数である. Fig. 2 はこのプロセスをブロック図で示したものである.

Fig. 1 Conventional method to estimate time delay of a random impulse sequence when $\tau \ll 1/\lambda$, where τ is the time delay and λ is the mean number of impulses within the unit time interval Δt

Fig. 2 Signal processing for the conventional time delay estimation

しかしこのような従来の手法では計測時間中にパルスが 1 個も出てこないとい計測はできなくなるから, データ長 T の中で 1 個以上のパルスが生起する確率をたとえば 99% 以上にするという計測のための条件が必要になる. この条件はポアソン分布に従う信号の場合つぎのように与えられる⁴⁾.

$$1 - e^{-\lambda T} \geq 0.99 \quad (2)$$

したがって,

$$\lambda T \geq 4.6 \quad (3)$$

すなわち, データ長 T の中で生起するパルスの平均数を少なくとも 4.6 個以上にするという条件が必要になることになる. この条件はデータ長 T が決まっているときに λ の下限を与えることになる. この条件はインパルス列を用いる場合には常に必要なものであり後に述べる新手法でも同様である.

従来の手法におけるもう一つの問題は正しく推定できる遅延の大きさの最大値はどれくらいかということである. たとえば遅延が $1/\lambda$ より大きくなると Fig. 3 に示すように真の遅延パルスに先行するパルスによって, 理想的には $Q(t)_{\text{real}}$ のような矩形パルス信号が欲しかったのにもかかわらずそれより幅が狭い $Q(t)_{\text{est.}}$ という矩形パルス信号が得られ, その結果それにより推定される遅延 τ_e は真の遅延 τ_r より小さくなる. これはパルスの間隔が一樣な場合であったが, 実際の信号は不規則でありパルスの間隔も不規則に変わるので正しく推定できる遅延時間の大きさは $1/\lambda$ よりさらに小さくなる.

このことを確かめるために計算機で発生したランダ

Fig. 3 Time delay estimation error in the conventional method when $\tau > 1/\lambda$

Fig. 4 Time delay estimation by the conventional method for the two cases of the Poisson random impulse sequences $\lambda=0.03$ and $\lambda=0.05$

ムなインパルス列を用いてつぎのようなシミュレーションを行った。ここでは遅延の最大を $50\Delta t$ (ただし Δt は任意である), データ長 T はその 4 倍の $200\Delta t$ とした。この場合先に示した計測の条件を用いると λ の下限は 0.023 になるので, ここではこの条件を満たす $\lambda=0.03$ と $\lambda=0.05$ の 2 種類について考えた。シミュレーションでは計算機で発生したポアソン分布に従うランダムなインパルス列を信号 x として用い, それに遅延を与えることにより遅延信号 y を得ている。これらを用いてフリップフロップからの出力信号の矩形パルス信号を作り, 上記の計測原理に従って遅延時間を推定した。Fig. 4 は遅延時間を $1\Delta t$ から $50\Delta t$ まで Δt 間隔ごとに与えたときの推定した結果を示すもので, ここでは 50 個の独立なインパルス列について求めた結果を平均し示している。 λ が 0.03 の場合も 0.05 の場合も大きな σ に対しては推定値が真の値より小さくなっていることがよくわかる。なおこの結果では推定誤差の標準偏差が Δt 以下になる遅延時間は $\lambda=0.03$ の場合には $18\Delta t$, $\lambda=0.05$ の場合には $10\Delta t$ であった。このことから標準偏差 Δt 以下で推定できる遅延時間の大きさは約 $1/(2\lambda)$ 以下であることが推測できる。ここで λ を小さくすることによって精度を上げることも考えられるが, その場合 (3) 式のような計測の条件からデータ長を大きくとる必要が生じて短時間推定の目的に反してしまう。したがって従来の手法では正しく推定できる遅延時間の大きさに厳しい制限が与えられることになる。

3. 遅延時間の短時間高精度推定法の原理

3.1 ゲートの導入とその効果

従来の手法に対して新手法では遅延信号 y の流入を適応的に一定時間閉じるゲートを導入し, 遅延時間が

パルスの平均間隔 $1/\lambda$ より大きくなる場合にも矩形パルス幅の減少を抑え遅延時間が正しく推定できるようにした。Fig. 5 にゲートを導入する位置とゲートの具体的な構成例を示し, Fig. 6 には $1/\lambda$ の一様な間隔の仮想的な信号を用い各要素の動作とゲートの導入の効果を示した。 y' の初期パルスにより計測が始まると x のインパルスによりモノステーブル・マルチバイブレータが駆動されその始点から一定時間 G の間 y' はゼロ状態になる。すると大きい遅延時間の場合, 従来の手法では真の遅延パルスに先行するパルスによって Q の幅が抑えられ正しい推定ができなかったのに対して, 今度はこの先行するパルスがでてこなくなり x と y' によって矩形パルス Q' が正しく形成され遅延時間も正しく推定できることになる。

ここで G はゲートが閉じる時間で以後ゲートの幅ということにする。この幅は遅延の大きさに合せて決

(a) Employment of the gate for the delayed signal y before the flip-flop

(b) The concrete structure of the gate

Fig. 5 Flip-flop circuit with the gate

Fig. 6 Behavior of each element in the gate and the gate employed effect

Fig. 11 The deterioration of the time delay estimation accuracy when the gate width is increased to two times of the optimum one

Fig. 12 The deterioration of the time delay estimation accuracy when the signal with λ larger than λ_m is used

あるが、推定精度が落ちてくることがよくわかる。すなわち、計測する信号の λ は λ_m より小さくするか、あるいはあらかじめ λ_m を十分大きい値と決めなければならない。しかし λ_m をあまりにも大きくすると結局用いるチャンネルの数が増加し系全体が複雑になるので、この点については処理時間、精度などを総合的に評価し決める必要がある。

データ長については、相関法では通常最大遅延時間の 10 倍以上のデータ長を必要としているが、本手法では短時間推定という目的からその半分程度のデータ長だけを用いた場合についてのみ検討した。

4. 連続的信号への適用

最後に実際の計測系から得られる連続的信号に対する遅延推定の例について示す。

まず連続的信号を **Fig. 13** に示すように振幅のコンパレータを用いた前処理を施すことによりパルス化したのちこれを用いて遅延推定を行うようにした。スレッシュホールド・レベルを変えればパルス信号 x' , y' のパルス密度 λ が変わるので、設定した λ の範囲に合うようにそのレベルの調整を行えばよいが、ここでは λ が 0.04~0.05 になるように決めている。連続信号の

Fig. 13 Transformation of continuous signal into the pulse sequence

(a) Impulse-like random signal

(b) Continuous random signal

Fig. 14 Example of continuous signals obtained from actual instruments

Table 2 Used parameters for the time delay estimation of the continuous signal

$\tau_m = 50\Delta t$
$T = 255\Delta t$
$\lambda \geq 0.018$
$\lambda_m = 0.05$
$G_k = (k-1)(10\Delta t)$
$(k=1, 2, 3, 4, 5)$
$N_{CH} = 5$

例としては **Fig. 14** に示すようにインパルス列に近い連続信号と一般的な連続信号の 2 種類を用いた。それらの遅延信号は計測された信号がフローゼン的である、すなわち異なる任意の 2 点で検出される信号は波形としてはまったく同一でありただその空間的間隔と速度に対応した時間遅れのみがあると仮定して計算機で遅延を与えることにより求めた。実際の遅延の推定には **Table 2** に示すような手順のもとで決めた幅

Fig. 15 Time delay estimation results for (a) the impulse-like random signal and (b) the continuous random signal by using the proposed method and the second-order cross-correlation method

Fig. 16 Comparison with the second-order cross-correlation method under the condition of additive noises

10 Δt 間隔の4個のゲートを用いた。

Fig. 15 には 5 Δt から 50 Δt まで 5 Δt 間隔で遅延を与えた場合、本手法による遅延推定の結果と相関法による結果とを比較して示す。この結果は同じ計測環境で得られた 20 本の異なる信号おののに対して求めた遅延推定値の平均値とその標準偏差を示す。また相関法ではフーリエ変換とその逆変換を用いて相互相関関数を求めそこで最大ピーク点を見つけることにより遅延時間を推定した。これらの結果からインパルス列に近い連続信号の場合も一般的な連続信号の場合も本手法により相関法とほぼ同等の精度で遅延の大きさが推定できることがわかった。しかし大きい遅延時間 (40 Δt ~ 50 Δt) のところでは相関法ではデータ長の不足のため本手法より誤差が大きくなっていることもわかる。

最後に一般の計測系では考えなくてはならない加法的な雑音がある場合についてその影響をシミュレーションにより検討してみた。

このためにさきに用いた元の信号とその遅延信号の両方に計算機で発生したそれらの信号とは互いに独立な二つの白色雑音を加えた上で先の場合と同様な手順で遅延時間を推定してみた。その結果を **Fig. 16** に示す。これらは元の信号がインパルス列に近い場合には信号対雑音の比 (SNR) を 2 とし、連続的な信号の場合には SNR を 5 としたときの結果である。このような条件では用いた 2 種類の信号のいずれの場合にも本手法によるものと相関法によるものの精度がほぼ同程度であることがわかるが、さらに小さな SNR 値の場合には相関法のほうが有利になることが当然考えられるのでこれらについての統一的な評価を今後行っていきたいと考えている。ただし、先にも示したように相関法においては計測時間が長くなるという点は実用に付する場合の比較にはもちろん考慮しなくてはならない。

以上のような結果から本手法の導入の目標であった高精度での短時間推定がほぼ達せられたものと考えられる。

5. おわりに

ランダムなインパルス列の遅延時間をフリップフロップを用いて短時間で推定する方法の限界を明らかにした後、遅延信号側のフ

リップフロップへの入力を適応的に一時閉じる複数のゲートを並用することにより広い範囲の遅延時間を短時間でかつ高精度で推定できる新しい方法を提案し、ランダムなパルス列を用いた計算機シミュレーションによりその正当性を検証した。

また連続信号の場合には適当なしきい値を用いてパルス化することにより本手法が適用できることを示し、これを実際に観測された連続信号にも適用し本手法の有用性を示した。また加法性雑音のある場合についても信号対雑音比が大きい場合には相関法と同等の精度での遅延推定ができることを数値例で示したが、これらについては今後さらに検討していきたいと考えている。

今後一般的な連続信号への適用のためのさらに詳しい条件と限界などについて検討するとともに実用的速度計測系の実装へと発展させたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) M.S. Beck and A. Plaskowski: Cross Correlation Flow Meters-Their Design and Application, 11/47, Adam Hilger, Bristol England (1987)
- 2) W.P. Mason and R.N. Thurston: Physical Acoustics, XIV, 407/516, Academic Press (1979)
- 3) J. Jordan, P. Bishop and B. Kiani: Correlation-Based Measurement Systems, 40/62, Ellis Horwood Ltd., Chichester England (1989)
- 4) 佐藤拓宋: 電気系の確率と統計, 21/25, 森北出版 (1971)