

水理計測とデータ処理

(デジタル計測のすすめ)

寛 源 亮

1. まえがき

計測は、一般社会においてもよく聞かれる用語であり、時と場合によっては、単にある量をはかるということ以上の内容を含んでいることがある。しかし、プリミティブに意味するものとして、計測は対象である一つの現象において、目的とする量を正確に、その基準量との対比值、すなわち定められている単位表示でもって示すことと理解してよかろう。基本的な力学上の単位、例えば長さ、時間、質量等のものはもともと地球上のもの、すなわち子午線長、自転時間、水等から各々定められていたことは周知の事実である。計測された量は、いずれにしても、これら単位の倍数である数値でもって表示しなければならないのであるから、計測方法としては、単位と直接比較して、その倍数を数えるデジタル法を用いるのが自然であることは言うまでもない。確かに、ここで述べようとする水理計測においても、一昔前は、流速測定はプライス流速計を用いて、その回転音を単位時間、数えることより行なったのであるし、長さも、間縄の目盛を数えて距離を求めたように、デジタル計測法が数多く用いられていた。

その後、電子機器、回路の発達に伴ない、計測量を適切な電気量に変換することが可能となり、計測技術は急速に進歩した。たまたま、このようにして得られた電気量がアナログ量であり、それまで得にくかった連続時系列資料も簡単に求められ、保存されるようになったことから、計測と言え、電子アナログ法を示すような状態を呈するようになった。同じ電子工学においても、デジタル関係では、大戦中のレーダー開発の遺産であるフィリップフロップを始め、各種のパルス回路技術が電子計算機の発展をうながしたものの、しばらくは、ソロバンとしての計算機の需要に追われ、これが計測に本格的に利用されるようになったのは、最近のことである。

現在、デジタル計測技術が急速に進歩しつつあるその最大の理由には、集積回路の開発と普及があげられよう。

この開発によりCPU(中央処理装置)を始めとして、複雑なデジタル回路が、単一ブロック化され、従来は計算機メーカー以外ほとんど取扱われなかったデジタル制御回路が、アナログ回路と同様にいたる所で取扱われるようになり、その結果、数多くの応用機器が計測部門においても見られるようになった。

さらに、これらデジタル機器間を接続する場合、必要になるインターフェース(I/O)も標準化されるに及んで、これを用いることにより、あまり電子回路の知識を持合せていない使用者も、アナログ機器と同様に、各種のデジタル機器を接続出来るため、好むままの計測系を任意に構成し、運用することが可能となった。

ここでは、主としてこのデジタル計測を中心とした水理計測法について述べようと思う。集積回路から組立てていくデジタル計測については、ハード面にある程度の電子工学の知識を必要とする上、ソフト面においても約20年前の初期の計算機を利用した人が経験したように、マイクロプログラム(機械語)を用いる必要があり、ここで述べることは適当と思われないからである。

デジタル計測系の機器構成は、アナログ系のものとそれほど変わっておらず、やはりセンサー・トラン

スデューサー、信号処理機器、記録・表示装置の配列となっている。

ただ、機器において取扱う信号が ON-OFF パルスの配列、すなわちビット配列に意味を持たせたものであり、この点がアナログ計測と異なっている。このビット配列方式には、5ビット (Baudot)、6ビット (EBCD)、7ビット (ASCII)、8ビット (BCD)、等のコードがある上、直列ビットと並列ビットの二方式に分れる。従ってディジタル機器を接続してデーターを送受するには、コード、直・並列形式、転送速度等が一致していなければならずこのために先に述べた I/O が必要となる。

ディジタル計測系には、一般に計算機等の制御機器が組込まれることが多く、これにより、計測系の各機器の運用、パネル面操作、信号の流れ制御等を行ない、さらに得られた計測量の処理計算並びに結果の図化・印刷まで行なうことが出来る。ディジタル計測系には、このようにアナログ計測系では実行が困難であった自動計測が容易に行なえる利点の他、計測精度が高く、長時間安定した連続計測を行ない得ることも、利点としてあげられよう。

ディジタル計測は歴史も浅く、今後考えるべき問題は多々あろうが、主要な課題はやはり計測量のディジタル変換の方法論であろう。センサー・トランスデューサーからのアナログ信号は、A-D変換を行なえばよいと考えられるけれども、ディジタル計測系の有する高い精度と処理能力を考えるならば、問題の多い A-D変換によらず、センサー出力そのものが精度の高いディジタル量であるような計測法を見出すべきであろうと思われる。以下順を追って述べることにする。

2. ディジタル計測法

計測法を述べるに先だって、初めに取扱うべき水理計測量についてふれておくのが順序であろう。しかし、このことについて言及することには、少しためらいを感じる。

今計測の対象とすべき水理現象が与えられたとすれば、この現象について、水理学の相当する学問領域、ならびに支配する法則・量を一応推察することは可能であるから、その量をもって計測すべき量であると考えることが出来る。例えば、理想流体については、 $f(p, v, \rho) = 0$ の関係から、計測されるべきプリミティブな水理量は、圧力 p 、流速 v 、密度 ρ であり、これと別に流れの初期・境界条件のために、時間、長さに関する量が必要となろう。

さらに、二次的な計測量として、温度、渦度、循環の強さ等々が、その関連する法則に基づいてあげられよう。

このように、水理学の中でも、その流れの機構について科学法則が明確にされている領域のものを対象とする場合は、取扱うべきその水理計測量を示すことには、あまり躊躇を覚えない。しかしながら、逆に言えば、その科学法則が明確な事象については、計測の必然性はあまり生じてこない。

C.R.Rao は、「資料はそれが収集された特定の目的のためにのみ吟味されなければならないとか、収集された資料は目前の興味ある問題に解答を与えることが出来れば充分であるといった研究態度は正しいものと言えない。

この態度は確かに科学の進歩のために好ましいものではない。科学史をひもとく時、観察結果に基づく証拠によって得られた新発見のあるものは、資料収集の段階において、研究者が全く予期しなかったものであることを思いおこすべきであろう」と述べており、筆者はこれと全く同意見である。このようなことを考えると、ここで水理計測量について、これ以上ふれることは適切と思われず、話を先に進めることにする。

2-1. 計測機器

現在入手が容易なデジタル計測機器にどのようなものがあるか調べてみた。その結果を表-1に示す。

これらのデジタル機器の調査は、実際の使用、手近にあるカタログ、学会誌・専門誌等の広告にもとづいたもの故、すべてを網羅しているわけではなく、見落とし、あるいはもっと機能の高いもの等あるかも知れないが、水理計測に多少なりとも関係があると思われるものは取上げたつもりである。ただ取上げたデジタル機器は、少なくとも、入出力のいずれかがデジタル信号であるものであり、この両者共アナログ量であるものは、たとえ水理計測上重要であっても、この表には入れていない。

この表から、ただちにわかることは、計測機器の入力が計数量の場合、その計測機器の精度、確度は共に高く、またその測定範囲も広いことである。計測機器の入力が計数出来る量であることは、もともと計測量が波数のように数える量であるか、あるいは、時間、長さといったように、高精密なデジタル“物指し”が完成されており、計測は単にこの“物指し”の数をカウントするだけの方式の場合である。

この表にあげた機器の中の多くのものは、入力が先にも述べたようにアナログ量であり、機器内でA-D変換を行ないデジタル化している。これらのものは、精度・確度共上記のものに比べれば劣っている。現在の水理計測法では、センサー・トランスデューサーの出力がアナログ量でしか得られないものが数多く見られ、これを直ちに計数化出来るものに変えることは困難である。従ってA-D変換は、計測量のデジタル化のため、今後共活用されるであろうし、また現在最もよく使用されているデジタル機器の一つである。これは直接計測の精度と確度に大きく影響するため、ここで取上げて述べることにする。

2-2. A-D変換

A-D変換器は、アナログ量をデジタル量に変換するためのものであり、その用途は広く、アナログ計測の結果を用いて、処理計算を行なう場合にしばしば利用される。

A-D変換は、その変換の方法別に分類すると表-2に示すようになる。これらの方式にはそれぞれ特色があり、例えば、変換速度は低速度でもよいが精度の高いことを要求する場合には、積分方式が、また精度はそれほどでもないが、高速変換を要求する場合には、比較方式が適している。一般にデジタルメモリー等として製品化されているものには、逐次比較方式が多く、テレビ画像のように高速変換を必要とするものでは、並列比較方式が、さらにデジタルマルチメーターのように高精度の変換が要求されるものには積分方式が用いられている。これらの方式の主なものを取り上げその変換方法等について述べることにする。

(1) デュアルスロープ型

表-2を参照して、積分方式中の電圧-時間変換型(V-T変換)の一つであるデュアルスロープの動作は図-1に示すように、スイッチ回路 S_1 をONとして変換する入力電圧 V_i を一定時間 T_i の間だけ積分回路に入力し、積分させた後 S_1 をOFF、 S_2 をONにして、入力電圧 V_i と逆極性の基準電圧 $-V_r$ を積分回路に入れ、先きの V_i による積分と加え、これが零となるまでの時間 T_r を求める。この T_r は、 $T_r = (V_i/V_r) \cdot T_i$ で与えられ、これを時間カウンター回路で計数することにより、入力電圧 V_i のデジタル化を行なう。

(2) 電荷平衡型

電圧-周波数変換(V-F変換)の一つである電荷平衡型は図-2に示すように、変換しようとする入力アナログ電圧 V_i は常時入力しておき、これに逆極性の基準電圧 $-V_r$ をスイッチ回路 S により一定時間幅でON-OFFを繰返し操作させたものを加え、この繰返し回数を調整して、積分回路の出力がちょうど打ち消されるようにする。このときの上記の繰返し回数は入力電圧 V_i と比例関係にあるため、これを計数

表-1 デジタル機器 (1)

計測量	デジタル計測機器名	機 能 他	精 度	測定範囲	動 特 性	使 用 例	
座 標	グラフペンシステム	画像・図等よりペン、カーソルを用いて座標値を読み取る	0.1 mm	各 種	連続読込可	地図のデジタル化	
	ディジタイザー						
	タブレット						
	インテリジェントCRT	画像の記憶	各 種	1 画像		画像解析	
カラー画像ディジタイザー							
角 度	回転スケール	磁気スケールの読み込み	$0.1'' \left(\frac{\pi}{180 \times 60 \times 60} \text{rad} \right)$	360° (2π rad)		ポイントゲージ	
	マグネットスケール		0.01 mm	0 ~ 30 m (各種)			
	デジタルマイクログラフ		1 μm	0 ~ 30 mm			
	デジタルダイヤルゲージ						
長 さ	超音波水位計	音の伝播時間応用	±0.5% (FS)	1.5 ~ 10 m	0 ~ 10Hz	波高測定	
	リニヤーポテンシヨメーター	抵抗値の読み取り	0.05%	10 ~ 1000 mm		センサー位置読取	
	エディセセンサー	非接触、渦電流変化利用	±0.01% (FS)	0 ~ 20 mm	0 ~ 20 KHz	水中使用可	
	ボジションセンサー	LEDの光学追跡	±0.2%	各 種	0 ~ 400 KHz	振動計測	
	レーザー測長システム	光干渉縞の読み取り	0.2 μm	各 種		微小変位計測	
	ホログラフシステム						
	マイケルソントワイマン干渉計						
	モアレカメラ	モアレポグラフィの応用	1 mm	30×25 cm		等高線	
	周辺長	パターンアナライザー	光学方法、粒径、面積、周辺長、濃淡計測	各 種	各 種		写真解析
		エリアダック					
マイクログラフシステム							
ディジタル面積計		光学的に木の葉等の実物面積計測					

表-1 デジタル機器 (2)

計測量	デジタル計測機器名	機 能 他	精 度	測定範囲	動 特 性	使 用 例
時間 周波数	デジタルクロックレンダー	年月日時分秒の表示	10^{-6} (水晶発振子)			
	プログラマタイマー					
	ユニバーサルカウンタ	周波数・周期・時間間隔・周波数比 ・計数計測	± 1 カウント	各 種	サンブル 毎秒 285 回	
	周波数カウンタ					
質量 圧 力	デジタル天秤		0.001 g	各 種		
	デジタル比重計					
	デジタルウェイトインデクテーター					
	デジタル歪計					
温度	デジタルマノメーター	抵抗線・半導体歪ゲージの応用	0.2% (FS)	各 種		ピート管圧力測定
	ピエゾ圧力計	ピエゾ効果応用				
	水晶圧力計	発振周波数が圧力変化するのを応用	$\pm 0.01\%$ (FS)	各 種		
	デジタル温度計	熱電対利用	0.1°C	各 種	10 Hz	水温計測
流速 流量	赤外線放射温度計	InSb 利用 非接触	0.5°C	- 10 ~ 300°C	5 Hz	地表面温度測定
	水晶温度計		0.04°C	- 80 ~ 250°C		検定用
	デジタル回転流速計	ドップラー効果の応用	1 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	2.5 ~ 100 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$		プロペラ流速計等
	デジタル超音波流速計		2 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	0 ~ $\pm 2.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	高	
流量	レーザードップラー流速計	流体素子振動を利用 U字管のコリオリ力を利用 ターゲットの歪を利用	0.25 %	高	高	
	フルイデックス流量計					
	コリオリージャイロ流量計		$\pm 0.4\%$	1800 $\frac{\text{kg}}{\text{min}}$		
	ターゲット流量計		$\pm 0.5\%$ (FS)	350 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$		

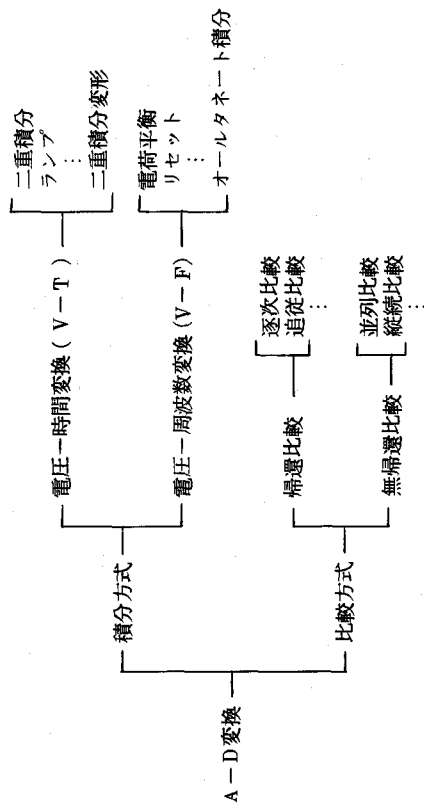
表-1 デジタル機器 (3)

計測量	デジタル計測機器名	機 能 他	精 度	測定範囲	動 特 性	使 用 例
音	AE カウンター	圧電素子チャージャンプ利用	5 μ V	10 KHz $\sim$ 2 MHz		キャピタシオン計測
	デジタル騒音計					
電 気 放射能	ディジタルマルチメーター	電圧・電流・抵抗計測	0.005 %	各 種	サンプル数 300 回/秒	高精度テスター
	シンチレーションカウンタ	散乱放射線の測定	10 %	各 種		土の密度測定
	ニュートレムカウンタ					
光	ディジタル光度計	センサ一取替により光子計, 照度計, 放射熱量計	$\pm 1\%$ (FS)	各 種		濁度計測
	ディジタル日射熱量計	積算可	1 %/度	1 $\sim$ 2000 W/度	2 Hz	水中計測可
	フォトンカウンタ	極微弱光の測定, 光電子増倍管を使用	15 μ V	50 $\sim$ 500 μ V	100 MHz	散乱光測定
保 存 処 理	各種計算機					
	ディジタルメモリー	A-D変換	各 種	各 種	各 種	アナログ信号の デジタル化
	トランジェントメモリー					
	シグナルアナライザ	A-D変換+平均, 相関, FFT等の 機能付	各 種	各 種	各 種	
	ディジタルスペクトラムアナライザ					
	トラッキングアナライザ	上記にトラッキングジェネレータ付	各 種	各 種	各 種	メカニカルインピーダンス計測
表 示	インテリジェントグラフィックディスプレイ	グラフィック機能付CRTディスプレイ				計算機端末
	カラーディスプレイ					
	インテリジェントプリンター	グラフィック機能付プリンター				"
	インテリジェントX-Yプロッター	グラフィック機能付プロッター				"
	ビデオプリンター	CRTディスプレイ複写器	8階調 500 本	144 $\times$ 192 mm	21 秒/1 画像	"

表-1 デジタル機器 (4)

計測量	デジタル計測機器名	機 能 他	精 度	測定範囲	動 特 性	使 用 例
出力	ファンクションアナライザー	デジタル制御による安定高低周波発振器	各 種	各 種	各 種	任意波形出力不規則波発生
	ファンクションジェネレーター					
	AM-FMセンセサイザー					
	プログラマブル電圧電流発生器	デジタル制御によるDC, 矩形低周波発生	±0.001%	各 種	1000 Hz	各種安定電源
その他	多点デジタルデーターユニット	スキャナー				多点測定に使用
	バーコードリーダー	光学文字読取り				入力に使用
	オプティカルスキャナー					
	光ファイバ-HP-IBリンク	高速データー転送用		100 m	20 Kバイト/秒	機器接続
	ファイバ-オプティクデーターリンク					
	ロジックアナライザー	デジタル信号のチェック				I/O 等のタイミング判定
	パターンジェネレーター					

表-2 A-D変換法



カウンタ回路で求めることにより、入力電圧 V_i をディジタル変換させる。この方式は入力と計数が同時に行なわれるため、 $V-T$ 変換よりも変換速度が速い。

(3) 逐次比較型

帰還比較方式の逐次比較型のものは、図-3 に示すように、入力と同時に逐次比較レジスタの最上位ビットから1ビットずつ設定し、その都度 $D-A$ 変換して入力電圧と比較しながら、その“H”、“L”を決定して下位ビットに移行し、最下位ビットまで設定する。従ってこの方式の精度は、レジスタのビット数によって定まり、8ビットでは、フルスケールを $1/256$ に、10ビットでは $1/1024$ に分割することとなる。この方式は変換速度、精度、価格共手頃なため、よく用いられている。

(4) 並列型

無帰還比較方式の並列型は図-4 に示すように基準電圧を 2^n 個に分割したものと入力電圧 V_i を同時に $(2^n - 1)$ 個の比較器で比較を行ない、これにより“H”、“L”を決定し、デコーダにより n ビットのディジタル信号として出力するものである。このように入力を並列処理出来るため変換速度は各 $A-D$ 変換中最高である。しかし分解能を高めるためには、数多くの比較器を必要とするため、他の方式に比べて不利であり、低ビットのもの例えばテレビ画像濃淡のディジタル化等に用いられる。

以上述べた $A-D$ 変換の機構からもわかるように、ディジタル機器では、カウンタ回路が種々関係している。

直接カウンタ回路を用いた計測機器には、表-1 に示したユニバーサルカウンタがあり、時間、周波数、周期、計数等の計測に用いられる。次にその機能について述べる。

2-3. ユニバーサルカウンタ

波数、周波数を計測する場合のカウンタ機能は、図-5 を参照して、(1)アナログ入力波電圧を(2)波形整形回路で整形して矩形波とし、(3)これを微分回路によりパルスにしたものを(4)別の基準発振器(水晶発

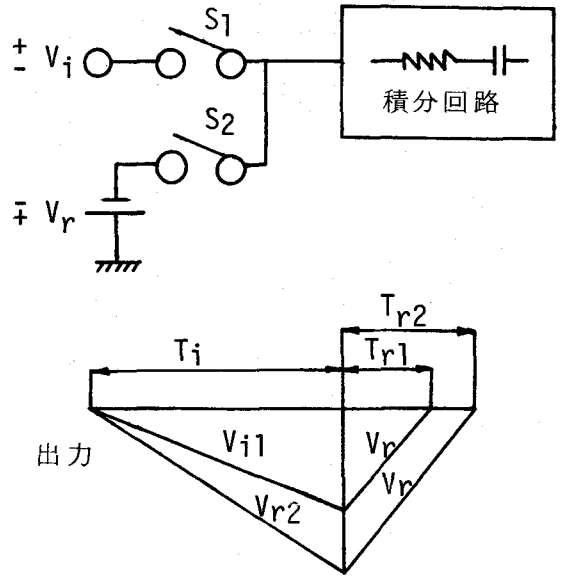


図-1 デュアルスロープ型

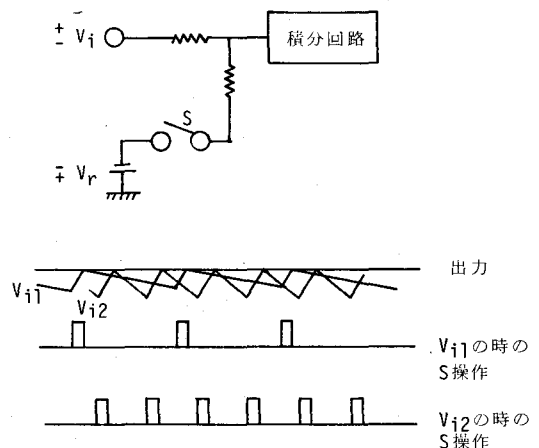


図-2 電荷平衡型

振)からの高周波出力を分周して得られる単位時間間隔のパルスによって(6)制御されたゲート信号で(7)サンプリングしたパルスの数を計数して周波数を求める。またこの逆数から周期を求めている。カウンタ回路では、基準水晶発振の確度がそのままカウンタの確度となり、この値は極めて高い。

現象と現象の間の時間間隔の測定は、図-6を参照して入力信号から(1)計測開始と(2)終了を示すトリガパルスを得て、この間(3)ゲート信号を開にし、基準発振器による(4)基準パルスを(5)計数して時間を求める。

計数を行なう場合は、基準パルスのかわりに、計数量である入力パルス数をゲート信号が開の間計数する。この時ゲート信号の開閉は手動によっても行なうことが出来る。

最近はIC化されたV-F変換器が容易に入手出来るからこれと周波数カウンタを用いれば簡単にA-D変換を行なうことが出来る。その回路を図-7に示す。

サンプリング速度は周波数カウンタのもので定まる。

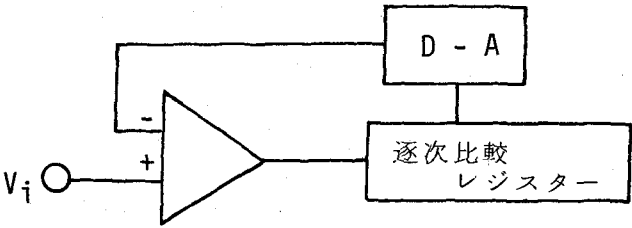


図-3 逐次比較型

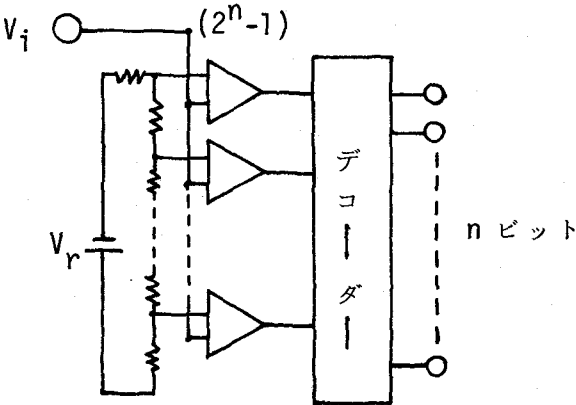


図-4 並列型

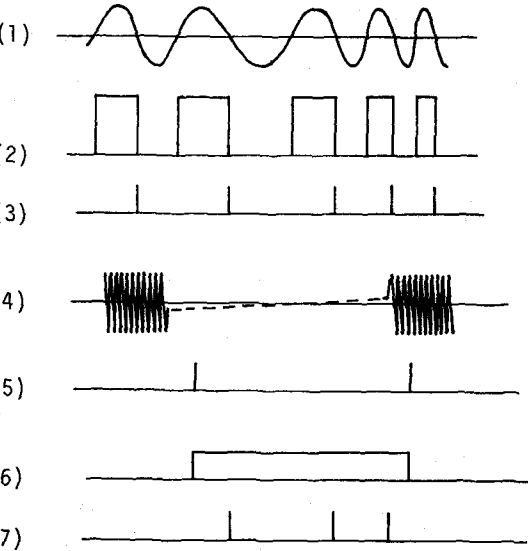


図-5 カウンタによる周期周波数計測

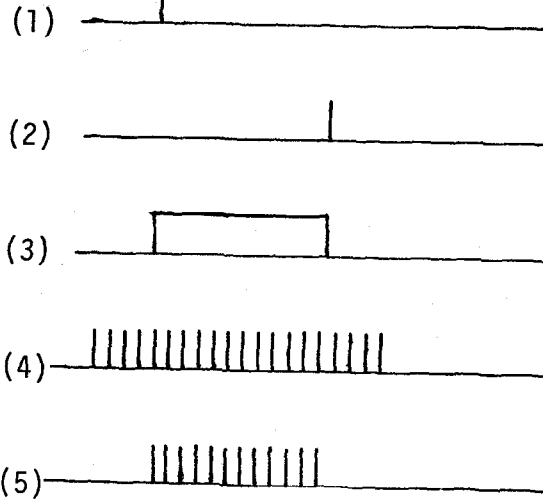


図-6 カウンタによる時間間隔測定

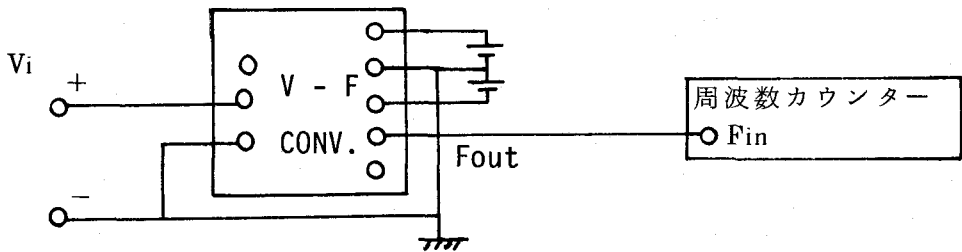


図-7 V-F変換を用いたA-D変換

2-4. 計測センサー・トランスデューサー

既に述べたように、計測量がセンサー・トランスデューサーにより、周波数、時間、あるいはパルス数等のような計数可能なものに変換されている場合には、上記のカウンターを用いて直ちに計測量を求めることが出来る。

水理計測においては、流速・流量の測定の場合に、このようなセンサー・トランスデューサーがよく用いられている。代表的なもの二、三を次に示す。

(1) 回転流速計

この型のものは、従来からよく用いられており、プロペラ、羽根車等を流れの中において、その回転数から流速あるいは流量を求めている。使用目的によって、その構造は種々工夫されており、水道の家庭用メーターから、気象・海洋観測用のものまで広く利用されている。回転数のカウント法も機械的なものから、光・電磁スイッチ回路の応用まで種々にさまざまである。

(2) 渦流速計

流れに円柱等の物体が置かれた場合、その後流に生じるカルマン渦の発生周波数を測定することにより、流速・流量を求める。レイノルズ数 Ud/ν が $10^3 \sim 4$ 付近では、ストローハル数 nd/U が一定値 (≈ 0.21) となることを利用している。ここで、記号 U, d, ν, n は各々流速、円柱径、動粘性係数、カルマン渦の振動数を表わす。管路の渦流速計では、管径 D とこれに設置する円柱径 d の比 d/D は、 $0.15 \sim 0.25$ の範囲がよいとされている。

(3) トレーサー法

トレーサーを流れに投入し、流下距離と時間から流速を求める方法には、簡単なものは塩水法から、広い意味では後で述べるドップラー法まで数多く見られ、いずれの方法も、トレーサーとその移動量計測に工夫をこらしている。開水路流れのように自由表面を有するものでは、トレーサーには光反射の大きな金属粉末を使用し、写真計測から流速を求めている。この手法は将来画像処理(テレビ画像)の発達と共にさらに発展することであろう。

表面流速でなく、流れの中の流速を求めるものとして、フォトルミネッセンス法がある。ルミネッセンス現象は、物質にエネルギーを供給することにより、常温でそれが発光する現象を言う。これには、エネルギーの供給中だけ発光する蛍光現象と、供給後もそのエネルギーをたくわえ、発光を持続する燐光現象とがある。この区別はそれほど厳密でなく、例えば、ルミネッセンス物質には種々のものがあるが、無機質の結晶は総称して蛍光物質と呼ばれており、エネルギー供給後の発光も残光とよばれている。トレーサーには、この残光性の良いものが適している。エネルギー供給法も数多いが、光を用いる場合が多く、

この時ストークスの法則によって蛍光物質の発光波長は、エネルギー供給した光の波長より長くなる。従って、エネルギー供給光には紫外線領域のものが用いられる（He－Cd レーザー等）。蛍光物質の例を表－3 に示す。流れのトレーサーに用いる場合、供給エネルギーの散乱と関連して、最適なトレーサー濃度が存在する。残光は微弱故、光電子増倍管を用いて検出される。

表－3 蛍光物質

組 成	発光色	平均粒径	比重	残光
ZnS:Ag	青	10.7 μm	4.09	短
Zn ₂ SO ₄ :Mn	緑	7 μm	3.9	短
4Mg(O,F ₂)GeO ₂ :Mn	赤	4 μm	3.8	短
ZnS:Cu	緑	14 μm	4.09	長
YVO ₄	赤	4 μm	4.1	短
ZnS:CuCl	オレンジ	14 μm	4.29	長
ZnS ₁ CdS: Ag	黄	14 μm	4.18	長

(4) ドップラー流速計

これまで述べた流速計測センサーは、主として平均流速を計測するものであり、応答周波数特性はそれほど高くない。乱流計測にはよく熱線流速計が用いられているけれども、流れに含まれる微小なごみが熱線に付着することにより確度が低い欠点があり、長時間計測には適さない。

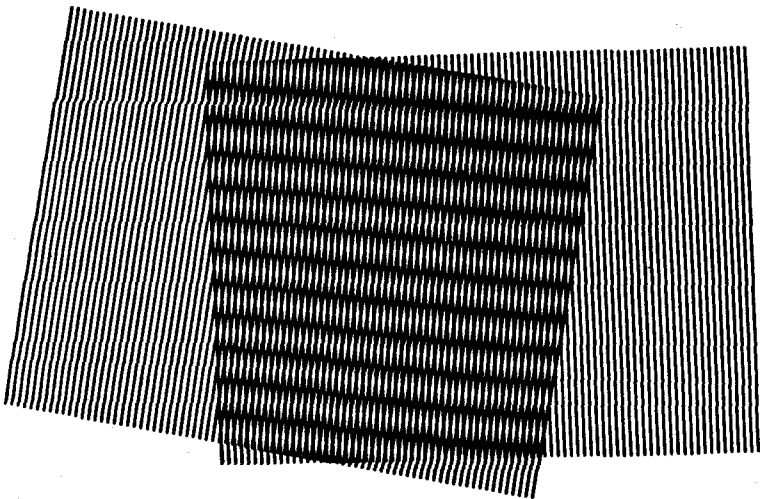
最近、波動のドップラー効果を応用した流速計測法がよく用いられるようになった。この方法では、流れにトレーサーとして微小粒子を投入し、それからの散乱波動の周波数変化より流速を求めることが多い。波動には、レーザー光がよく用いられる。ドップラーシフトされた周波数変化 Δf は、光の波長を λ 、その入射方向の単位ベクトルを $\mathbf{K_i}$ 、流れの中の速度 $\mathbf{V}$ の粒子によって散乱させられた光の受信方向の単位ベクトルを $\mathbf{K_o}$ とすると、 $\Delta f = \frac{V}{\lambda} \cdot (\mathbf{K_i} - \mathbf{K_o})$ で与えられる。このドップラー周波数 Δf は、光電子増倍管等の使用により光－電変換を行なって計測する。雑音を含むその信号処理には、単なるカウンターでなく、多少高級なトラッキングアナライザー等の機器を必要とする。

(5) モアレ縞

計測量が長さである場合には表－1 に示すように多くのすぐれた機器がある。動計測の場合には、実時間ホログラフィ法により、精密な三次元計測を行なうことも可能である。

モアレ縞による計測は、手法そのものはそれほど複雑でないけれども、精密な光学格子を製作することはなかなか困難である。図－8 に示すように細線をこまかいピッチ d （格子常数）で平行に並べた光学格子を二枚、図－8 のよう

に角 θ だけ傾けて密着させると、これら格子の横方向に見られる太い平行縞を生じる。これがモアレ縞である。この縞の間隔 D は θ が小さいと、 $D = d/\theta$ で表わされる。今上下どちらかの格子を横方向に d だけ移動させると縞は D だけ縦方向に移動する。これより明らかのように、モアレ縞は一



図－8 モアレ縞

種の長さの拡大装置であり、格子の移動方向に従って、縞の移動方向も変化するため、方向も判別出来る。また格子が部分的に不完全であっても縞にはそれほど影響を受けず誤差平均作用を持っている。格子常数が小さくなると光の回折現象が現われるが、この時0次と1次の回折光だけ利用するようにすれば縞の濃淡差は最大となる。縞の読取には、フォトダイオード等により光-電変換を行えば、その処理にはカウンターを利用することが出来る。

格子の移動が縦横どちらに移動するか不明のものでは図-9に示すような点光学格子を二枚用いれば、その配列によって、図-

9に示すような模様が表われ、格子の横移動ではこれが縦に、縦移動ではこれが横方向に移動することから任意方向の移動量を求めることが出来る。

(6) 密度・温度・圧力 センサー

流体の密度変化は光の干渉を利用して計測される。光の干渉は光路差によって生じる。流体に密度差があると、光の屈折率が変化することにより

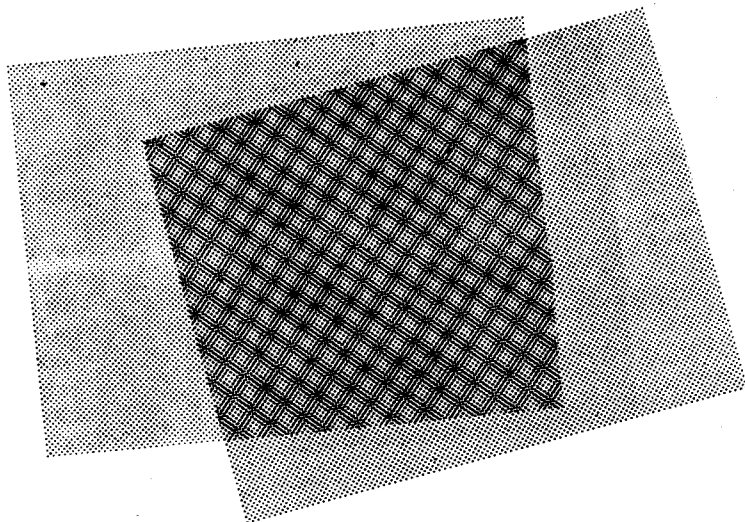


図-9 変形モアレ縞

光路差を生じる。光路を分岐し、一方を密度を計測する流体場を通過させ、後、もう一方の密度変化のない流体場を通過させたものと合成する方法を用いれば、その密度変化は干渉縞として得る。このような干渉計には、マッハツェンダー、シュリーレン、二重ホログラフィ等がよく用いられる。干渉縞から密度差を求めるには、グラドストン・ダルにより、光の場と分子配列のディストーションの関係から導かれた屈折率 n と密度 ρ との関係式 $n-1=K\rho$ ($K \approx 0.23$ (空気))を用い、干渉縞の変化 $\Delta S/S$ が屈折率あるいは密度の変化と次の関係があることを利用して密度を求める。

$$\Delta S/S = \left(\frac{L}{\lambda} \right) (n_1 - n_0) = \left(\frac{LK}{\lambda} \right) (\rho_1 - \rho_0)$$

ここで、 L は試料を通る光路長、 λ は用いた光の波長である。

基礎量の計測において、温度計測のセンサー・トランスデューサーは、一番開発が遅れている部門といわれている。確かにアナログ系のものでは、熱電対(白金-ロジウム、銅-コンスタンタン等)、白金抵抗体、サーミスター等があるが精度・確度共充分でない。わずかに、デジタル系では、水晶発振子の周波数変化を利用したものが満足されているに過ぎない。

圧力計測についても同様に、アナログ系のセンサーには抵抗線歪ゲージを始めとして、半導体ゲージ等があるけれども、デジタル系では、やはり水晶発振子の周波数変化を利用したものが見られる程度で、これを試用、試作したこともなく、ここで述べることは適当と考えない。

2-5. インターフェース

インターフェース (I/O) はデジタル機器の入出力機構であり、デジタル機器をお互いに接続する場合に必要な。例として、サーミスターを用いて温度を計測しようとするときサーミスター、ブリッジ・増巾器、A-D変換器、出力機器 (プリンター) の計測系が考えられる。

サーミスターからA-D変換器まではアナログ信号の伝送故、その接続は問題ないがA-D変換器の出力とプリンターとの間はデジタル信号が伝送されるため、その接続は簡単でなく、ここにI/Oが用いられる。

このI/OはA-D変換から出力されるデジタル信号の仕様とプリンターで受付けるデジタル信号の仕様の両者にあわせたものでなければならない。従ってプリンターのかわりに直接データーの処理計算を行なおうとして計算機を持って来ても、I/Oの仕様が一致せず接続することは出来ない。この様にこれまでのデジタル機器では、I/Oが特定の機器の間の接続のために個別に用意されており、そのまま任意の機器間の接続を行なうことは出来なかった。従って、これまでは、たとえデジタル計測法について数多くのアイデアを持っていたとしても、I/Oをすべて個別に設計しなければならず実行することが極めて困難であった。

昭和50年に一つの標準化されたI/Oが規格化され、最近では、この規格化されたI/Oを付したデジタル計測機器が数多く製品化されるようになった。この標準I/Oは一般にGP-IB、IEEE-488等と呼ばれるものである。

以前からもRS232Cと呼ばれる準標準的なI/Oがあった。この二つのI/Oを比較してGP-IBの特色を述べると、GP-IBが非同期、並列デジタル信号 (7~8ビット) の伝送であるのに対して、RS232Cは同期直列デジタル信号の伝送であり、前者が15台までの機器を接続出来るのに対して、後者は2台の間しか接続出来ない。前者はほぼ完全に規格化されているためソフト知識だけで接続出来るのに反して、後者はコネクタの形式すら定まっておらず、接続には多少ハードの知識を必要とする。

デジタル計測系には通常計算機が組込まれる。これは、計測量の処理計算等のためだけでなく、計測系に組込まれた多数のデジタル機器の運用を制御し、自動計測を行なうために必要となる。この計算機は機能上最近よく見られるデスクトップ型の小型計算機で充分である。

その理由は、最近の計算機器には、この計算機の負担を軽くするために、処理能力を付加したいいわゆるインテリジェント機能を持ったものが多いこと、またこれら小型計算機は、モデムを介してセンター等の大型計算機と接続出来るため、小型以上の計算機をこの用途に用いてもあまり意味はないからである。

ここでは、GP-IBを用いたデジタル機器の接続について述べる。このI/Oの制御のために小型計算機が計測系に組込まれているものとする。このI/Oに接続されるデジタル機器は、機能上から、コントローラー、トーカー、リスナーのいずれかに分類される。コントローラーとは、計測系の各機器の運用、データーの流れ等を制御する機能をもつ機器であり、先に述べた小型計算機がこれに相当する。トーカーはデーターを送り出す機器であり、リスナーはデーターを受取る機器である。一つの機器で二つ以上の機能を持つものもある。すなわち小型計算機はそれ自身データーを送り出すことも、受取ることも出来る故、ある場合はコントローラー、ある場合はトーカー、ある場合はリスナーとなる。

機器を接続するラインのコネクタは24ピンのものであり、型が定まっており、いくつも重ねて接続出来るよう雌雄一体の構造となっている。このコネクタを用いて、トーカーあるいはリスナーである各計測機器とコントローラーである小型計算機とを接続しても、単にそれだけではデーターの転送は行なわれ

ない。コントローラーである小型計算機から、このI/O、ならびに接続されている各計測機器をオペレートしてやらなければならないからである。この指令は小型計算機からのプログラムによって行なう。

具体例について、その指令プログラムを示し、このI/Oの接続法を説明する。今波動現象の周期計測を行なうこととし、ユニバーサルカウンタと小型計算機をこのI/Oにより接続する。カウンタには電圧変動に変換された波動が入力されているものとする。具体的な指令プログラムは次の通りである。ただしこのプログラムの言語・文法等は使用する機器により異なるが、その基本的な構成は同じである。ここではプログラム言語にAPLを用いている。

[1])LINK 1

⋮

[2])LOAD 3

— • — • — • —

▽GPIB [□]▽

[1] 1 □SVO 3 3 ρ'PIOPICPII'

[2] PIO ← 'OUT 76001'

[3] PIC ← 'OUT 71001'

[4] PII ← 'IN 77001'

[5] PIO

[6] PIC

[7] PII

[8] PIC ← 'I/50, O/50, /7, T/A, L/I, A/E, S/C'

[9] PIO ← '▽G▽A?A6▽C▽B'

[10] PIO ← 'SOF3MIT3S3S4AS6S8IOL+00BS6S8IOL+00'

[11] PIO ← '▽A?A6▽BE'

[12] PIO ← '▽A?1V▽B'

[13] PII

[14] → 11 ▽

このプログラムは二つの部分から成立っている。最初のものは、フロッピーディスクからマイクロプログラムを計算機メモリーに呼出すものであり、直接I/Oの指令と関係ない。後の15行が指令プログラムである。最初の[1]～[7]がマイクロプログラムを計算機作業域に呼出すものである。[8]は計算機側のI/Oの機能設定である。これでバッファメモリー、使用するコード、アドレス等の設定を行なう。

[9]は[10]の指令伝達のためにI/Oを接続する指令であり、[10]はユニバーサルカウンタのパネル操作である。すなわちカウンタに付属している各スイッチ、ツマミ類を手動で操作するかわりに、プログラム指令によって行なう。[11]は測定開始を指令する。[12]は[13]のデーター受入れのためのI/Oの接続指令であり、[13]はカウンタの計測したデーターを計算機に送らせる指令である。送られて来たデーターは計算機のディスプレイ上に表示される。引続いて計測を行ない、データー転送を望む場合は、[14]の指令で[11]のプログラムに帰還させ繰返す。計測条件を順次変更して行くような自動計測では、[14]の指令を変えて、[10]にとばせる。[10]の内容を順次変更するのは、従

来のソフト技術をそのまま応用すればよい。この指令プログラムのままでは、エンドレス故、無制限にデータが計算機に流れ込むが、これを必要個数にとどめる手法も従来のソフトをそのまま応用すればよい。

計算機に接続される計測器が一台の時は、このような指令プログラムでよいが、複数の台数の場合は一台ごとにデータを転送させなければならない。その指令プログラムを次に示す。

▽GP-IB [□]▽

```
[1] 1 □ SVO 4 3 ρ 'PIOPICPIIPIT'
.
[4.5] PIT ← 'IN 74001'
.
[7.5] PIT
.
[11] IO: PIO ← '▽A?A6▽BE'
[11.1] → (PIT [□ IO+5] = 'E') / POLL
[11.2] POLL: PIO ← '▽A?1▽B▽JV.....▽K'
[11.3] → (A/PIT [□ IO+10 11] = 'VV'), (.....), .../DV, .....
.
[13.1] DV: DVA ← PII
[13.2] .....
.
[14] → IO▽
```

この指令プログラムが前記のものと異なる主な所は [11.1] ~ [11.3] であり、[11.1] はサービス要求、すなわち計測を完了しデータ転送待ちをしている機器の有無を調べる。もしあれば、[11.2] で機器を順次呼出し、[11.3] でそれらの機器を求め、以下前同様にそれらと接続しデータを転送させる。この方式はシリアルポール方式と呼ばれるものである。

以上二つの標準的な接続によって、データ転送を実際にさせてみると、転送速度は遅く、毎秒4~2個のデータしか転送出来ない。その原因は、データ、一つ一つについて、その送受を確認しながら転送する方式のため、時間がかかるからである。このため、カウンターのサンプリングにより連続計測しているデータを一群として取扱い、一括転送する方法を試みた。その指令プログラムは次の通りである。

▽ GPIB [□]

```
[1] .....
.
[8] PIC ← 'I/3000, A/D, .....'
.
[10] PIO ← '.....T3S2S4.....'
.
[13] PII▽
```

この指令がこれまでのものと異なるのは、[8]でインプットバッファメモリを増大させ、A/Dによりデーターを群として取扱う。また[10]ではS2によりカウンターのサンプルホールドを解除させる。このようにすると、データーはバッファメモリが一杯になるまで連続転送される。

その転送速度は毎秒93個のデーター転送であり、これはカウンターのサンプリング速度で決定される。

以上のことから明らかなように、このI/Oを活用するには、その指令プログラムが自由に作成出来るソフト命令語が豊富でなければならない。種々の自動計測には、計測系の機器構成だけでなく、このI/Oの指令プログラムの開発が必要である。

3. 計測誤差とデーター処理

ディジタル計測にともなう誤差は、計測系の入出力過程においてのみ生じる。すなわち、センサー・トランスデューサーがおかれた場の計測環境の変化に起因するものは、アナログ計測と全く同様であり、これらセンサー等からのアナログ信号をA-D変換によりディジタル量に変換する場合、また計測系からの出力をD-A変換してアナログ出力する場合に生じるのであって、一度信号がディジタル化されてしまえば計算機と同様に系内で誤差は生じない。

入力信号が雑音をともなうパルス信号を計数する場合は、フィルター等によりS/N比を改善した後、閾値を定めてカウントさせるが、この閾値は高すぎても低すぎてもミスカウントする恐れがあり、その値の決定は重要である。

カウンターの原理上から生じる誤差に1カウント誤差があり、これは入力パルス群とサンプリングゲートがオープンするタイミングによって、必然的に最小桁に1カウントの誤差を生じるものでさせることは出来ない。

3-1. 計測誤差とその除去

ここでは、計測系入力部のセンサー・トランスデューサーの計測環境において生じる誤差とA-D変換に伴なって生じる誤差について述べることにする。

(1) センサー等の誤差

計測系のセンサー等は、計測量を ψ_1 とする時、これを計測系で処理可能な量 ϕ に科学法則を応用して、 $\phi = f_1(\psi_1)$ と変換する機能を持っている。

計測時にその場では、 ψ_1 だけが存在しているのではなく、他の量 $\psi_2, \psi_3, \dots$ も存在し、これらの量の間にも科学法則、 $f_2(\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots) = 0$ が成立しているため、実際の計測では、 $\phi = g(\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots)$ の関係が成立していることになる。

例えば、レーザードップラー流速計を考えると、センサー・トランスデューサーの出力として得られるドップラー周波数 Δf は、 $\Delta f = g(V, \lambda, n, \theta, \rho, \dots)$ のように単に流速 V だけでなく、レーザ光の波長 λ 、流れの場の光屈折率 n 、光の入射・散乱角 θ 、密度 ρ 等の変化によってもその値は変化する。この流速計測では、流速 V 以外の諸量は、もとより一定に保つ計測環境において、実施されるものであるけれども、それはかならずしも完全と言うわけにはいかない。これらの変動に起因するものが雑音となり、誤差 $\Delta(\Delta f)$ としてセンサー等より出力される。

$$\Delta(\Delta f) = \frac{\partial g}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial g}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial g}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial g}{\partial \rho} \Delta \rho + \dots$$

この誤差は観測値 ϕ が時系列資料として得られる時には、次のような相関計算により、推定することが出来る。

今、時間 t における真値を $\phi(t)$ 、観測値を $\bar{\phi}(t)$ とし、誤差を $\varepsilon(t)$ とすると、

$$\bar{\phi}(t) = \phi(t) + \varepsilon(t)$$

であり、時間 $(t + \delta t)$ では、

$$\bar{\phi}(t + \delta t) = \phi(t + \delta t) + \varepsilon(t + \delta t)$$

である。この時、

$$E(\delta t) = [\bar{\phi}(t + \delta t) - \bar{\phi}(t)]^2$$

を求めると、真値と誤差の間には、相関がなく、また t 時と $(t + \delta t)$ 時の誤差の間にも $\delta t \neq 0$ ならば相関はないと考えられる故、

$$E(\delta t) = [\phi(t + \delta t) - \phi(t)]^2 + 2\varepsilon^2$$

となる。ただし $[\varepsilon(t + \delta t)]^2 = [\varepsilon(t)]^2 \equiv \varepsilon^2$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} E(\delta t) = 2\varepsilon^2$$

から誤差 $\sqrt{\varepsilon^2}$ を推定することが出来る。この誤差は計測にともなって生じるランダムなものについての推定値であり、計測当初の設定値にオフセットされてしまった誤差は見出すことが出来ない。この手法は、各 δt ごとの $E(\delta t)$ を求め、 $E(0)$ を外挿することにより誤差を求めるのであるが、その外挿方法により少し値が異なる。

計測量の最確値は、各平均法、相関法、フィルター法等を用いることにより求められる。これらの方法は良く知られており、参考文献も多いこと故ここでは述べない。

これらの手法、特に平均法あるいは相関法は静的なデーター処理によく用いられるけれども、データーが周期性（周期はかならずしも一定でなくてもよい）のものであり、その周期を別途確実に求めることが出来れば、それに同期させてサンプリングしたデーターについて、これらの手法を用いれば、動的データーの場合でも雑音を除去させることが出来る。すなわち計測系では、計測場を含めた帰還回路を形成することが出来れば、これらの手法により高い信号-雑音比の測定を実施することが可能である。

これらの手法はかならずしもデーターが得られた後、別途計算機を用いて数値計算により行なうものとはかぎっておらず、計算機器内にマイクロプロセッサとメモリー等を用いて、これらの手法を回路として組立ててしまう、いわゆる金物化したもので、入力してくるデーターを順次処理出力することも行なわれている。カルマンフィルターについてその例を述べる。

流量 q により、回転しているプロペラ流量計は、プロペラの慣性モーメントを J 、角速度を ω 、回転摩擦係数を μ 、トルク定数を K とすると、

$$J \frac{d\omega}{dt} + \mu\omega = Kq$$

で与えられるであろう。これを差分式に書きなおし、 ω を x 、 q を u とおけば、

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k$$

となり、これはカルマンフィルタ信号過程の状態式である。プロペラの角速度は光スイッチ回路等を利用して計測処理可能なパルス数 y_k に変換する。この場合雑音 w_k は当然これに含まれてくる故、

$$y_k = C_k x_k + w_k$$

で与えられ、これはカルマンフィルタの測定過程の観測式である。カルマンフィルタでは u_k , w_k がガウス性雑音のとき、 x_k の最尤推定値 $\hat{x}_k$ は、

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + P_k C_k' W_k^{-1} [y_k - (C_k \tilde{x}_k + \bar{w}_k)]$$

で与えられる。ただし、

$$\tilde{x}_k = A_{k-1} \hat{x}_{k-1} + B_{k-1} \bar{u}_{k-1}$$

$$P_k = (M_k^{-1} + C_k' W_k^{-1} C_k)^{-1}$$

$$M_k = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}' + B_{k-1} U_{k-1} B_{k-1}'$$

であり、 $\bar{u}_k$, U_k は u_k の、 $\bar{w}_k$, W_k は w_k の各平均、分散である。このシステムはもちろん可観測であるとする。

金物化されたカルマンフィルタは、重み係数 A_k , B_k ……等をあらかじめ求め、PROM(メモリー)に格納しておいたものと、マイクロプロセッサ等を用いて、観測データ y_k から、 $\hat{x}_k$ を上式通り計算し出力させている。

3-2. A-D変換の誤差

A-D変換には、先きに述べたように、その方法上、原理的に伴う量子化誤差、入出力が直線関係にならない非直線誤差、一般アナログ機器でも問題となる利得・オフセット誤差、温度変化、部品劣化等に伴う確度低下の誤差が存在する。

量子化誤差は、A-D変換が今8ビットのものとすると、これはフルスケールを1/256に等分割するもの故、原理上から±1/512の誤差を生じることは避けられない。これを改善するにはレジスタのビット数を多くする以外方法はないが、このようにすると変換速度は低下する。

非直線誤差には、全体的なものと、局部的に折線を示す微分非直線性誤差があり、後者はA-D変換特有のものである。この誤差のために上記の一分割が飛んでしまうこととなる。

ディジタル機器が温度変化に敏感であるのは、よく計算機室が温度調整されていることから明らかであり、これはA-D変換器についても同様である。従って、たとえ12ビットのA-D変換器を用いたとしても、一般に温度係数は良くても50 ppm/°C程度であるから、20°Cの温度変化があると、簡単に8-9ビット程度の性能に低下してしまう。最近、マイクロプロセッサを組込み、特別な補償回路として機能させ補正を行なっているものもある。

一般にA-D変換器には、その特性が明示されたものが少なく、また明示されていたとしても、なんら考慮されることなく、いいかげんに使用されているので、その出力されたディジタルデータにはかなりの誤差があるものと思われる。

3-3. その他のデータ処理

これまで、時系列データを主とした、ディジタル計測の入出力信号の誤差に伴うデータ処理につ

いて述べてきた。ここでは最後にこれ以外のものについてふれてみよう。一つは画像データーに関するものであり、他の一つは図形データーに関するものである。すでにこれらに関しては多くの参考文献があり、また紙数の制限もある故、ここではその概要にふれるにとどめる。

画像入力是一般にテレビ信号で入力され、これは二次元座標各点の濃淡表示でもって、画として認識されている。

従って、画像処理では、アナログ量であるこの濃淡信号をまずA-D変換によりデジタル化し、入力画像をいわゆるデジタル画像に変換する。この変換されたものは、画素ごとの濃度を a_{ij} とすると、 $[a_{ij}]$ とマトリクス表示される故、あとはこれまで同様数学的取扱いによりデーター処理することが出来る。これまでに述べた平均、相関、フィルター法はそのまま(ただし2次元)雑音処理に用いられるが、それだけでなく、その数学上の特色を生かし画像の強調、抽出等にも応用される。これ以外に画像処理の特別なものとしてテクスチャ解析、K-L変換等がある。

画像の濃淡をA-D変換する時、ある閾値を定めて、先に述べた a_{ij} を0か1のどちらかの2値にしてしまうと、それは図形と呼ばれるものになる。図形の処理、例えば、移動、回転、縮小、投影等を行なうには、解析幾何学を応用すればよい。図形処理特有のものとして、パターン認識があり、この一つにシンタックスパターンが認識法がある。これはパターンを基本パターンと部分パターンの構成関係で記述し、その関係を既知のものと比較判定する方法である。

図形の入力にはタブレット等を用いて行なわれ、出力はX-Yプロッターがよく用いられる。図形処理の一例として原地図と並べ、作成したデジタルマップを図-10に示す(神戸大学土地造成研究施設沖村講師の好意による)。これは、さらに種々のデーターを加え、防災・資源利用等水工学に限らず土木工学の各部門で活用されることと思われる。

デジタル計測はその機能上、まだまだ発展の余地があり、特に自動化・多変量計測の面で進展することと思われる。これらの方法論を確立するのは、今後の課題であると考えられる。

参考文献

略

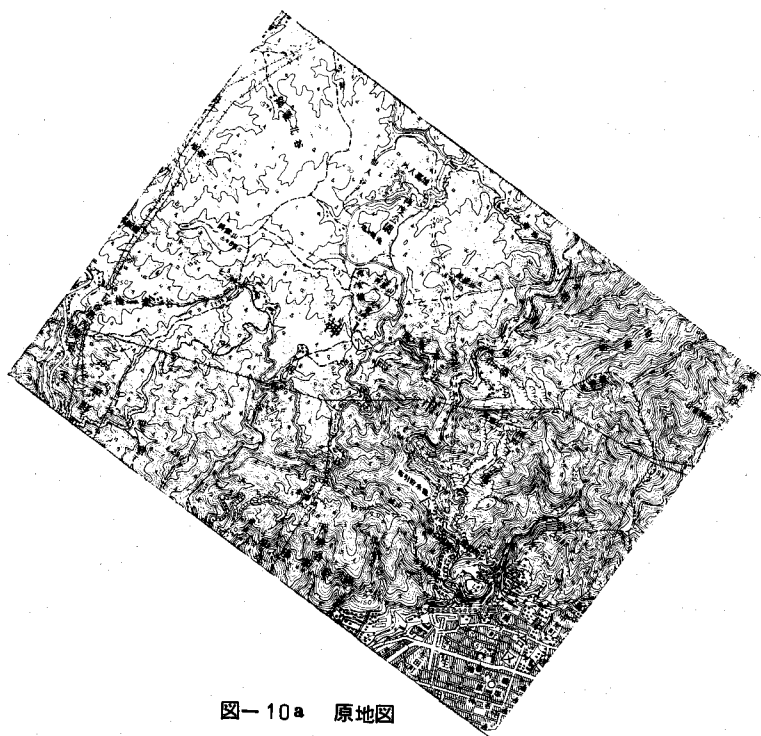


図-10a 原地図

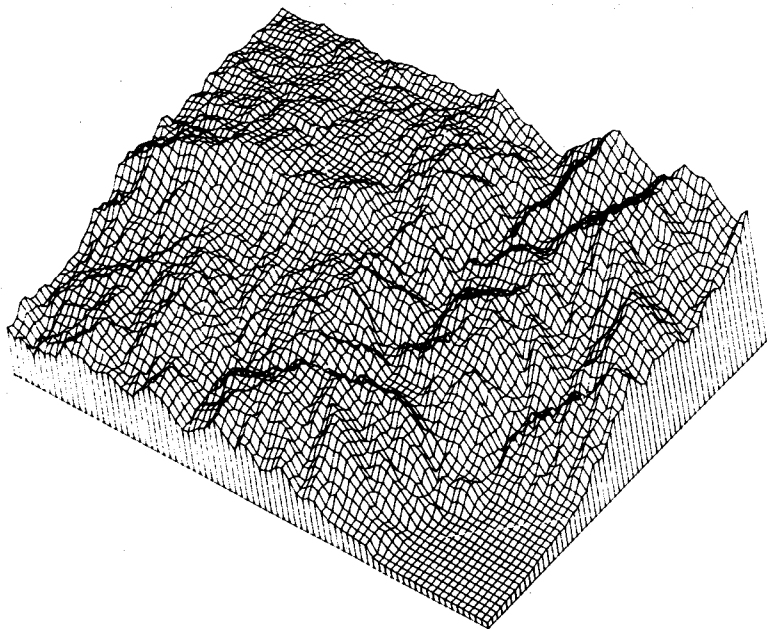


図-10b デジタルマップ