

移動床水理実験におけるラボラトリー・オートメーションの試み

Approaches for Laboratory Automation of Hydraulic Experiments on Alluvial Bed

京都大学防災研究所 藤田 裕一郎 Yuichiro FUJITA
京都大学防災研究所 澤井 健二 Kenji SAWAI

Hydraulic experiments on alluvial bed have various conditions to be controlled and produce many data to be measured and processed. These laborious works compelled us to approach laboratory automation that facilitates the execution of a large number of runs and observations under well-controlled conditions. A personal computer control system of discharge and water surface slope that made it feasible to conduct experiments under complicated unsteady conditions is explained. A traverser measurement system with a sand surface detector and a water level gauge improved to be compatible to personal computers was applied to a few kinds of experiments very successfully.

Key words; laboratory automation, hydraulic experiment, alluvial bed, personal computer

1. まえがき

平面2次元の変化を対象とする移動床水理実験では、路床形状の測定が不可欠である。路床形状は測定点が多いばかりではなく、時間的変化のために測定回数が増え、実験遂行中には測定に、終了後にはデータの整理・解析に非常な労力と時間が要求される。さらに、急速に変化する現象にはマニュアルでの測定は断念せざるを得ない。ここに、移動床実験の測定とデータ処理の自動化を図らなければならない第一の理由がある。また、時間的に変化する現象であるが故に、流量、給砂量、路床勾配など実験条件の自動制御の必要性が高く、それによって非定常条件の積極的な付与も可能となる。有効に働く制御・測定システムほど、実験観察への集中を可能とし、現象の解明に資するところが大きくなる。このような観点から、筆者らは移動床実験の制御・測定の自動化に取り組んできた。本文では、水工学研究者が現有の機器・設備を最大限に生かしながら、近年のパーソナル・コンピュータ（以下文中ではPCと略称）と周辺機器の整備環境を利用して、移動床水理実験におけるラボラトリー・オートメーション（同じくLAと略称）を試みた経験を述べる。

2. 移動床水理実験におけるラボラトリー・オートメーションとその得失

初めに、LAが有すると思われる短所・長所を表-1に挙げてみた。長所の方が遙かに多く、明かにLAの導入が有利である。短所の第1項目も、PCのように汎用性のある機器では経済的であり、第2項も新しい機器に直接触れることで技術・知識レベルが向上する。第4、5項についても、自動化プログラムに組み込む制御・測定項目を必要最小限にし、臨時的観察・計測を予期して作成しておけば不都合はほとんど無く、スイッチやエラー・トラップ、キー割り込みによって制御を随時マニュアルに移せる機能をシステムに持たせておけばトラブルを防ぐことができる。このような場合、BASICのようにインタープリタで走る言語は処理速度は低い極めて有利であり、こうしたシステムの短所をカバーするように設計されていることがLAシステムの条件の一つであると思われる。つぎに、LAシステムの設計・製作を直接行なう場合の得失の列挙を試みれば表-2のようであって、経済性、技術修得の面から利点の方が数多く挙げられていて、時間的・経済的なインシャルコストはかかるが、得られるものは非常に多いことが示されている。

さて、通常の移動床水理実験の制御項目は、実験条件の設定と測定機器の操作に二分でき、前者には、流量、路床勾配、給砂量、下流端水位などの制御が挙げられ、後者では、測定台車・トラバーサの制御、路床高、水位、流速などの測定器制御、写真・ビデオ撮影制御が一般的である。一方、移動床実験でもLAのシステム構築は、①それぞれのパートの自動（電動）化、②サーボシステム化、③インテリジェント化、④そ

表-1 ラボラトリー・オートメーションの短所と長所

短所 ○新部品や機器の購入による経済的負担 ○新しい機器の操作・使用法修得の困難性 ○機器の維持・管理の煩雑さと費用の増大 ○実験のルーチン化による柔軟性の低下 ○測器・プログラムの暴走によるトラブルの重大化	長所 - 迅速化 ○実験の所要時間の短縮 ○高速現象観察時間の創出 - 省力化 ○実験時の拘束時間の減少 ○他実験等の並行作業の可能性 - 高度化 ○少人数による大規模実験遂行が可能 ○実験時の肉体的・精神的疲労の軽減と安全性の向上 ○短期間における多ケース実験の集中的な実行が可能 ○処理の自動化による実験データ解析の省力化 ○非定常など複雑な実験条件の設定が可能 ○確実・高精度の実験条件の長時間制御や繰り返し制御可能 ○リアルタイム処理による測定データの実験内容への反映 - 高精度化 ○実験精度の改善と計測の時間的／空間的高密度化・精密化 ○手順のプログラム化による実験時の操作ミス等錯誤の排除
---	--

表-2 ラボラトリー・オートメーションを直接試みる場合の長所・短所

短所 ○システムの概念設計、製作、改造及び装置、部品に関する情報入手のための多大な時間の消費 ○現有機器の改造時におけるその損傷 ○部品／材料特性に関する知識欠除による時間的・経済的無駄の発生	長所 ○かなり高度なシステムの経済的構築が可能 ○実験開始までの時間を短縮できる場合が多い。 ○機器・装置・プログラムの細部理解による最適使用／使用説明 ○新研究課題に対応した高度化実験に向けての知識・技術の集積 ○制御測定対象の熟知による細部まで行き届いたシステムの最適構築と高いフレキシビリティの確保 ○新技術応用の他測器に対する理解力の向上による適切な使用法 ○修得した技術の実験以外の領域への積極的応用 ○現有機器を含めた測器・計測システムのトラブルへの有効な対処能力の修得とそれによる実験の休止時間を削減
---	---

これらの集中制御化、のステップで進められるであろう。①のステップは新しい制御・測定装置の開発とともに、現有機器の改造が経済的な面から重要となる。②～④の方法としては、1)集中制御システムに②、③をすべて含める、2)装置の各部分に②、③を付加する、3)両者を混在させる、の3者であろう。しかし、LAはオフィス／ファクトリー・オートメーションとは異なり、実験の高いフレキシビリティを満足させるように、常に対象範囲を吟味していなければならないので、1)のタイプは取り難いであろう。

3. パーソナル・コンピュータによる移動床水理実験条件の自動制御

3. 1 実験条件の自動制御の動向

移動床水理実験において制御対象となる前節の諸量を高精度で一定値に維持するとともに、複雑な時間的变化を与えて非定常実験を可能とするような自動制御が従来から行なわれてきた。自動制御の方式には、周知のように、PI制御、PID制御などがあり、以前からこれらの方式に則ったアナログ制御アセンブリが発売されていた。例えば、流量制御は、このアセンブリと流量計、空気バルブを組み合わせで行なわれてきたが、これらの機器を目的に応じて組み合わせると非常に高価になり、かつアナログの取り扱いには専門的な電気・電子工学技術が必要であったので、大規模な水理実験装置にのみ導入されていた。しかしながら、小流量ではポンプやバルブに無理がかかり、とくに、流砂循環水路ではバルブ操作が望ましくなく、現在ではインバータを利用した流量制御が一般的になりつつある。ポンプに普通に用いられている誘導（インダクション）モーターは種々のインバータで容易に回転が変化される。最近では、専門外の技術者にも十分に使用可能な三相用インバータが比較的安価で販売されているので、次項で述べる循環式流砂実験水路の流量制御と同様の方法による下流端水位制御を初めとして、水理実験の分野でも導入されてきている。

3. 2 パーソナル・コンピュータを用いた実験条件の自動制御の実例

上記のインバータはボリュームでリファレンスの電圧レベルを変化させて出力周波数の調整を行うようになっており、このリファレンス電圧は外部からも与えられるので、PCに装着したDA（ディジタルーアナログ）変換ボードから適切な電圧を与えてやれば出力周波数すなわちモーターの回転を制御することができ

る。最近では周波数設定をパネル面の数値ボタンで行うデジタル制御型インバータが普及しつつあって、この場合のPCによる制御は双方に装着したパラレルまたはシリアルインターフェイスを介して行われる。

循環式流砂実験水路に用いたのは比較的早い段階であったので、リファレンス電圧を与えるものであって、設定流量と流量供給パイプに取り付けた電磁流量計による計測値との差に対して、PI制御式に基づいて計算したリファレンス電圧値をDA変換ボードからインバータに与えて所定の流量波形を得られるようにしている。図-1のブロックダイアグラムのように、AD（アナログ-デジタル）変換-CPU-DA変換の流れで信号を処理するために、周波数-ポンプ流量関係に基づいて任意の比例定数や積分時間を選択した柔軟性に富んだ流量制御が可能である。流量は精度を上げるために電磁流量計で測定しているが、12ビット以上のAD変換が可能なら、ベンチュリー管と差圧計を用いても同程度の制御が可能である。

平面2次元土砂堆積実験水槽では、循環流量の増減によって潜水部の水位を調節する方法をとっている。圧力式水位計で測定した電圧をAD変換ボードに与えることによって、図-1と類似のPI制御方式で所定の水位の時間的変化を達成することができる。PCによる演算制御方式では、水位の時間的変化とその各段階で用いたPI制御の比例定数や積分時間を記録しておけるので、この場合のように、制御系の応答特性の予測が困難でアナログPI制御では見出すのが難しい最適な制御条件の設定も比較的容易である。

いずれの場合も周波数-ポンプ流量のハード系の応答速度が低いために、16ビットPCを用いれば演算時間はBASICでもほとんど無視でき、これが制御系の操作性を高める上で役立っている。

つぎに、水面勾配の自動制御としては、河床波の変形に伴う粗度変化に対して等流状態を保つために下流端水位の堰調節のパルスモーター制御を行なっている。図-2のように、PCで位置検出のされた台車上のサーボ式水位計で測定された水面形状をリアルタイムで直線回帰して平均水面勾配を求め、路床勾配との差を無くするように堰の開度をパルスモーターで変化させて下流端水位を調節するものである。パルスモーターにはシリアル通信回線を有するインテリジェントなドライバーが市販されているのでそれを利用して容易にPCでプログラムに応じた制御を行うことができる。各流量段階毎に堰の開度と水位との関係が予めPCに入力されておれば、制御系の応答性は水面形状の検出速度で大半が決定される。したがって、台車の移動速度を高い目に設定して往復測定を行えば、マニュアルによる堰の操作とは比較できないほどきめの細かい長時間制御が可能となっている。また、路床勾配の自動制御も、当初タイマーによる勾配設定モーターの単純なON-OFFの繰り返し操作によるステップ的なものを試みたが、現在はここにもインバータと勾配変化量を検出するポテンショメータを導入している。上述の流量・等流制御機構と組み合わせることによって、掃流力を時間連続的に大きく変化させる実験が可能となっている。

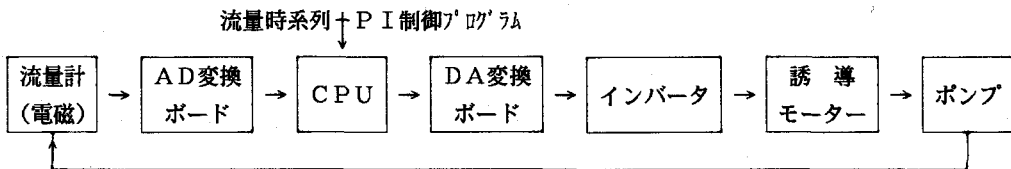


図-1 流量自動制御のブロックダイアグラム

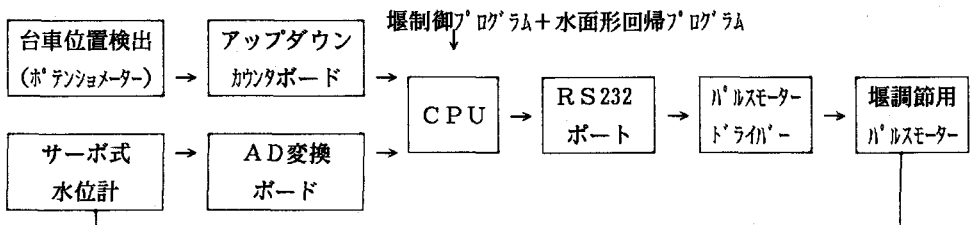


図-2 等流水面自動制御のブロックダイアグラム

4. 移動床実験計測のパーソナル・コンピュータを用いた自動化

4. 1 移動床水理実験における自動計測の従来の状況

大型水路（河川総合実験施設内）における実験の例では、大型のポイントゲージによる河床高・水位の計測に長時間を要し、データ解析にも相当量の労力を割いていた。そのため、実験省力化の柱として従来から計測の自動化を試み、次項で述べるシステムを採用する直前には、位置検出用ポテンショ・メーターを組み込んだ可変速電子レオナードモーターによる自走式トラバーサにサーボ式波高計と連続式砂面計を取り付けて、横断方向に河床・水面形状を連続測定し、測定データをX-Yレコーダに記録していた。これはリレー、リミットスイッチを用いたシーケンシャル制御による半自動化システムであった。計測手順は、まず、砂面計検出部の先端付近に障害物の無いことを確認し、測定開始断面に台車を移動する。ついで、トラバーサを自走させてリミットスイッチで左・右側壁近傍に設定した測定端に停止させ、砂面計を計測モードに、X-Yレコーダを記録状態にして、トラバーサをマニュアル変速で走行させる。検出部先端が反対側の測定端にきてリミットスイッチでトラバーサが自動停止すれば、X-Yレコーダを非記録状態に戻し、検出部の先端を障害物の無い位置まで上昇させて次の測定断面に移動する。水位測定の場合もほぼ同様の手順であった。

しかしながら、計測器の制御も含めた自動化には、アナログ・トリガーでスイッチングを行う電子回路を用いるため行なえなかった。この限界は、BASICのような一般的な言語で動くAD変換ボードやPIO（パラレル入出力）ボードの発売によってソフト的に回避できる状況に移り、最近のように各種のアプリケーション・ボードが急増するに連れて、計測制御の可能性が専門外の技術者にも飛躍的に広がってきた。

4. 2 移動床水理実験における自動計測の実例

初めに、大型水路、網状流路実験水路及び堤防決壊実験装置で用いてきたシステムについて紹介したい。

このシステムでは、これまでの流路変動及び中規模河床形態に関するほとんどの実験に共通した測定項目と測定方法を自動計測の対象範囲とした。すなわち、流下方向のある間隔毎に行なう河床と水面の横断形状の連続測定を自動化することとし、AD変換ボードの空きチャンネルと計測の空き時間を利用した供給流量や定点水位などの経時変化のオプションな測定も可能にしておくこととした。同様に、従来の実験の実施形態とシステムの経済性を考えて、ある実験水路に固定したものとするのではなく、容易に他の実験装置にも設置できるようなものとし、かつ、その時点で使用していた光学型の連続式砂面計やサーボ式水位（波高）計を用い得るように設計して、それに対応する部品を選定していった。

対象とした実験装置には、既に測定台車の自走または牽引用の比較的大きな誘導モーターが設置されており、これらをパルスモーターやサーボモーターに差し替えることはコスト面でも維持管理面でも得策ではないので、速度制御は適宜インバータを取り付けることとして、電磁開閉器の制御をPCから行うこととした。これらの台車には、電子レオナード回路による変速モーターによって駆動されるほぼ同一規格のトラバーサが搭載されているので、このコントローラのスイッチ操作をPCから行えるようにした。また、連続式砂面計は急激な河床形状の変化時に砂中に潜り込むという欠点を持っているので、それを補うようにup-downスイッチを測定台車の移動に合わせてPCから操作できるようにする必要があった。これは、砂面計アンプ部パネル面の手動-計測の2接点切り替えスイッチを3接点切り替えのものに置き換えて、手動-自動-計測の3モードにし、マニュアルのup-downスイッチから並列あるいは直列に導線を引出し、PIOボードで切り替えられるICリレーにつないで対処した。

計測のフローは、4. 1で述べた従来のものを踏襲しているが、実験者による計測結果の確認後フロッピー・ディスクへ記録するためと、一連の計測後に必ずキャリブレーション・ポイントに移動してキャリブレーション・データを得るようにしているために、図-3のようなものとなっている。

X方向の位置検出は、50m以上の測定区間を1cm以上の分解能と精度で行える必要があるので、ロータリー・エンコーダーを用い、Y方向には高々数mの範囲であるので10回転のポテンショ・メーターで位

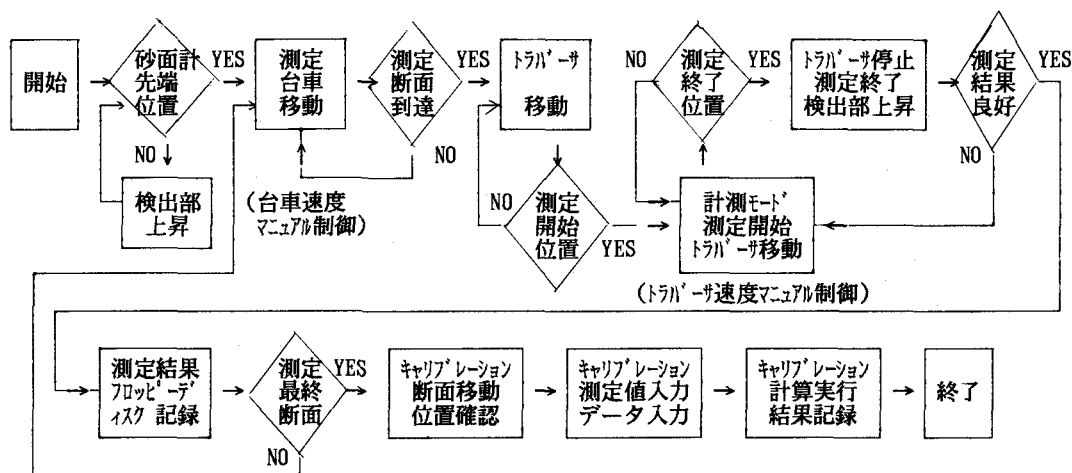


図-3 河床高計測制御のフローチャート

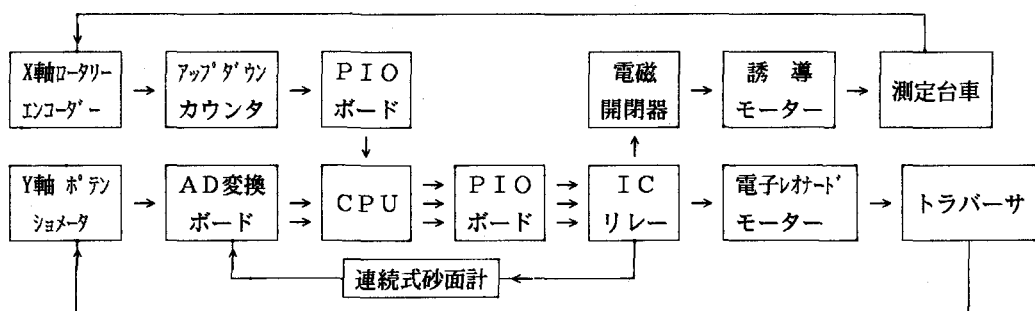


図-4 河床高計測制御のブロックダイアグラム

置検出をすることとした。後者による検出は適当な定電圧装置（できればトランス型のものが望ましい）とAD変換ボードによればよいので比較的単純である。しかしながら、前者の方は、自動制御に着手した数年前の時点では、最近のようにPC対応のエンコーダー用アップダウン・カウンタボードが発売されておらず入力のスปีドは犠牲にして、上記のボードのBCD出力を出力の同期信号をチェックしながら1数字ずつ4ビットパラレルで読み込んで数値とし座標値を算定するように考えた。

なお、計測制御に用いたPC（NEC9801M2）では入出力ポートの空き番地が少なく、AD変換ボードとPIOボードを増設するとほとんど全ての入出力ポートが塞がるのでDA変換ボードを増設することができず、このため、リファレンス電圧設定による台車の牽引・走行モーターや電子レオナードモーターの速度制御を断念せざるを得なかった。最近市販されているこうした増設ボードはほとんどがポートアドレスの上位バイトの指定が可能とされているので、こうした制限は無くなっている。

以上から、モーターの速度制御はマニュアルで行い、スイッチングは図-3のフローに従って全てPCからPIOボードを介して行った。すなわち、図-4のように、PIOボードからの信号はTTLレベルで作動し、かなり大きな電流まで開閉できるICリレーのスイッチングボックスに送られ、台車モーターの電磁開閉器を操作し、トラバサのレオナードモーターの回転を正・逆・停止と切り替えた。

一方、新たに製作した粗度急変流実験水路の計測制御に際しては、水路の幅が40cmと狭く計測台車が軽量になるので、X（流下）、Y（横断）、Z（鉛直）の3軸ともパルスモーター駆動とし、インテリジェントなパルスモータードライバを3台用意し、PCにRS232Cの第2、3回線用ボードを増設して制御するようにした。X軸方向の台車駆動は出力の大きいパルスモーターにプーリーを取り付けて牽引し、Y、Z軸のパルスモーターにはリニアヘッドと呼ばれる直線運動用のギヤヘッドを取り付け、Y軸はラックギヤ

を固定して2つのモーターを取り付けた台をスライドさせるようにし、Z軸はラックギヤを上下させた。それには、ホットフィルム流速計、プロペラ流速計及び光学式濁度計のプロープを取り付けて、検出位置をPCから制御できるようにした。これらの計測器による測定値はAD変換ボードを通して、PCに入力し、所定のデータ数だけの計測を終えたとまずZ軸を昇降させて次の点の測定に移り、その測線の計測が終了すると、次の測線または断面に検出部を移動させるようにしている。また、一連の計測が完了すると、X軸パルスモーターの回転速度を何段階か変えて台車を牽引し、流速計の検定を行うプログラムを実行している。

この水路における計測制御は、一般にパルスモーターの回転が細かく制御でき、その再現性が非常に高いことに依拠した簡便なものであって応用性は高いが、フィードバック機能の無いオープン制御であるので、システムの安全性と精度を上げるためにはやはりなんらかの位置検出機構を組み込むことが望ましい。

5. パーソナル・コンピュータによる自動制御の効果

循環式流砂実験水路では、上述の流量制御及び等流水面勾配制御機能を組み合わせて、非定常流下の河床形態の変化過程に関する広範囲の実験を行い、発達・崩壊速度の明確化など多くの興味ある事実を見出しているが、このような実験は、PCによる詳細な制御があって初めて可能となったものと判断される。現在、これらの自動制御機構と勾配制御機構を組み合わせて、1波形の最大・最小掃流力比を大きく変化させた実験を行なっている。なお、実際の洪水に対応した掃流力比率の発生も可能となっている。

最小でも幅1.8m、長さ15mの広い水路や装置を対象に進めてきた計測制御の自動化は、網状河川の流路変動や河川堤防決壊口の拡大過程に関する実験に使用された。比較的規模の大きい実験にも拘らず、この計測システムに支援された詳細な測定によって、複列・鱗状砂州の基本的な変化特性が定量的に把握され、破堤口周辺の水理特性も平面形状の変化が明確にされ、土砂の移動状況の推定が可能になった。従来の計測法では測定密度が低い上に、データ処理にも労力が割かれるので、こうした成果は得られ難かったと思われる。

また、最後に述べたパルスモーターによる3方向制御システムも実験計測とデータ収録に大きな威力を発揮しており、装置のトラブルにも速やかに対応できていて、独自に製作した利点がよく生かされている。

6. 結論

移動床水理実験においても、条件制御や計測の自動化が高度になるに連れて、より複雑かつ詳細な高度の実験が望まれ、それとともにPCによる制御の限界も認識されてくる。すなわち、装置の追加に伴って増加するサブルーチンは細かい制御に応じて肥大化もするので、プログラムは処理速度の面で必ず限界に行き当たる。これを高速・大容量の最新のPCへの置き換えで対処していけば、コストは非常に高くなって、従来のミニコンを用いて行われてきた大がかりな実験と変わらないものとなる。これは、PCを用いた簡便なLAという最大の特徴を失うもので望ましくはない。実験の各パートを独立して担う安価なやや低レベルのPCを目的に応じて、旧来のGP-IBや最近のSCSIで有機的に結合するのがよいように思われる。

移動床水理実験においても、他の実験と同様に、計測機器の開発は現象の解明と不可分の面が多く、そのインテリジェント化も研究者の手を離れては無意味になることも少なくない。また、現行の大学の水工学系研究室では実験のメカトロニクス面が完全にサポートされるだけの技術的・経済的環境には無い場合が多いと思われる。したがって、移動床水理実験の高度化を望めば、研究者自身が主体的にLAを進めていかざるをえないと結論される。このようなLAは、実験・データ解析の高精度化や省力化のみならず、学生教育の面でも有用であって、水工学分野での情報交換の場を確保することの意義は高いと考えられる。

謝辞

本文の移動床水理実験における設定条件制御及び計測自動化には、京都大学防災研究所 藤木繁男技官（海岸災害部門）に装置の開発・改造など多くの面でご支援を頂いた。ここに記して謝意を表します。