

パソコンを利用した学生実験課題の開発研究
—マイクロコントローラを用いた重力加速度の測定—

山岡 大 藤原 忠夫

Development of physics education with a personal computer
—Measurements for the acceleration of gravity using the microcontroller—

Masaru Yamaoka and Tadao Fujiwara

Abstract

We developed the measurement system, which applied the A/D conversion circuit to the measurement for the acceleration of gravity before, in order to decrease the unprepared artificial mistake, which generated by the measurement in the exercises for students. Since accuracy was inferior in the measured value obtained by the measuring method using this A/D conversion circuit, the research for the improvement was planned, and the measuring method reported here was newly developed.

The measurement system developed in order to measure the period of a Boulder's pendulum consists of an oscillating detection circuit developed previously, a periodic detection circuit developed this time, and the calculation programs which accompanies it. In this periodic detection circuit, the microcontroller which detected and processed the state of the port was used for the change of the circuit of a previous A/D conversion circuit.

As a result, the measured value of the acceleration of gravity was 9.7988 ± 0.0001 m/sec², and was very appropriate.

Key words : the acceleration of gravity, the exercises for students, a period of a Boulder's pendulum, the periodic detection circuit, the microcontroller.

はじめに

大学の基礎物理教育の力学分野では、多くの大学で、初等力学の基礎である重力加速度の測定を学生実験の実験課題として採用している。

重力加速度の測定には、落下法や可逆振り子などの様々な方法があるが、本学部の物理学実験では「ボルダの振り子」による測定法で実施している。この学生実験では、ボルダ振り子の振動周期をストップウォッチを用いて測定し、その測定精度の向上のため、測定者が振動を常

に注視して 200 回を越える振動回数を数えて重力加速度の測定値を得ている。

この測定法の問題点の一つに、注視するが故に振動回数の数え間違いあるいは時計計測による測定誤差という人為的ミスによって、しばしば測定値の誤りがみられてきた。そこで、筆者らは、このような授業現場で起こる人為的ミスを解消するため、ボルダ振り子の振動を光スイッチで検出し、この検出信号を A/D コンバータによってパソコンに取り込んだのち、その計測データから重力加速度を算出するプログラム

を備えた「重力加速度—ボルダの振り子」実験の計測処理システムを研究・開発し、報告した¹⁾。

報告した計測処理システムは、従来の測定法と比較し、周期計測における人為的ミスを取り除くとともに、周期計測を簡素化、効率化することは認められた。しかし、振動周期を検出するサンプリング周期の精度に起因する測定値の誤差、バラツキがみられ、振動周期の検出をより高精度なものに改良・開発することが必要とされた。

この観点から、A/D コンバータ回路の代わりにマイクロコントローラを用いた周期検出回路を考案し、精度の高い測定値を得ることができる計測処理システムの研究・開発を行った。

重力加速度測定 of 計測処理システム

1. 計測処理システム構成の概要

「重力加速度—ボルダの振り子」実験の計測処理システムは、ボルダ振り子周期検出装置(以後、周期検出装置と記す)と、計測データから重力加速度を求めるソフトウェアを備えたパソコンとで構成した(図1)。なお、使用したパソコンは Dell 社製 Inspiron (PP01L) で、OS は Windows XP である。

ボルダ振り子の振動周期は、光スイッチと周期検出装置の振動検出回路で振動を検出し、そ

の振動周期を周期検出回路で計測したのち、その計測データをパソコンで処理して得た。

今回、この周期検出回路をマイクロコントローラを用い、ポートの状態を検出・処理する回路を新たに考案・自作した。なお、マイクロコントローラは Microchip 社製 PIC16F84(以後、PIC と記す)を用いた。

また、送信された計測データから振動周期を算出・表示する振動周期測定用プログラム、周期データを抽出する周期データ抽出プログラム、そして重力加速度を算出するプログラムとから成る重力加速度測定ソフトウェアを開発した。

振動周期測定用プログラムは、Microsoft Visual C++(以後、VC++と記す)を用いて開発・作成した。周期データの抽出と重力加速度の算出は、表計算アプリケーションソフト Microsoft Excel 2000(以後、Excel と記す)に付属の Visual Basic Application(以後、VBA と記す)で作成したマクロプログラムと、Excel の表計算機能を組み合わせて処理した。

なお、実験に供したボルダ振り子は、中村理科機器社製ボルダの振り子(VP-40 N)を用いた。ただし、ボルダ振り子の金属球に取り付ける金属線を 1.1019 m と 1.4172 m の 2 種類の長さとして実験に用いた。

2. ボルダ振り子の周期検出装置

ボルダ振り子の振動周期を計測する周期検出装置(図1)は、振動検出回路、周期検出回路および電源回路で構成した。

①振動検出回路

振動検出回路は、ボルダ振り子の金属線が光スイッチ間を横切ったとき、赤外光が一瞬遮られることで発生するスパイク状のトリガパルス波形を、図2に示すトリガパルス波形の周期に同期したパルス波形(以後、同期パルス波形と記す)に波形整形するために用いた。

光スイッチ間で生じるトリガパルス波形を、

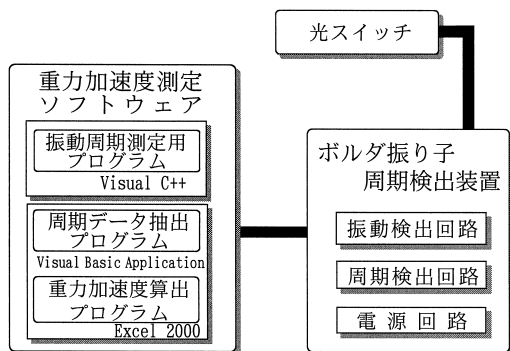


図1 計測処理システム構成図

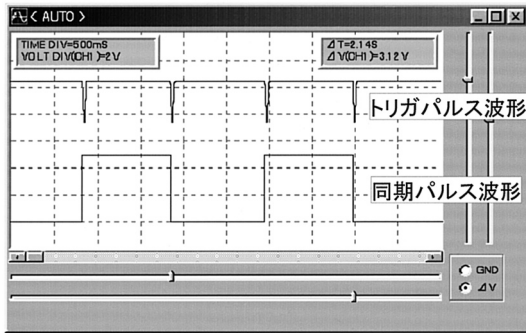


図2 トリガパルス波形と同期パルス波形

PICのポートに直接入力する方法は、PICのポートのON状態、OFF状態を検出する閾値電圧がTTLレベルの2.5V固定であるため、トリガパルス波形の振幅がこれを越えて初めて検出が可能となる。しかし、この閾値電圧を越えるトリガパルス波形を得るには、光スイッチ間の光軸の調整を正確に行う必要があり、この調整には煩雑な操作を要する。そこで、トリガパルス波形の振幅が多少小さくても、すなわち光軸が多少ズレてもポートのON状態、OFF状態を検出するためには、閾値電圧をTTLレベルの2.5Vより小さい値に設定できる振動検出回路が必要となる。

このため、波形整形のための回路をレベルコンパレータ回路、ワンショット・マルチバイブレータ回路およびエッジ・トリガ・フリップフロップ回路で構成した。この3つの回路を用いた振動検出回路は、先に報告したものと同一である¹⁾。

②周期検出回路

学生実験において重力加速度の値を十分な精度で求めるには、振動検出回路から出力された同期パルス波形のパルス幅の値すなわちパルス間隔 T_w を高い精度で検出することが必要となる。

先の計測処理システムの周期検出回路では、このパルス間隔 T_w の計測にA/Dコンバータ回

路を用いたが、そのサンプリング周期が0.1 secであったため²⁾、この精度に起因する測定値に誤差がみられた。そこで今回、このパルス間隔 T_w をより高い精度で検出するため、図3に示すようにPICのポート端子に同期パルス波形(図2)を入力し、そのON状態、OFF状態を検出して外部クロックによってパルス間隔 T_w を0.001 secの精度で計測する周期検出回路を、PIC16F84と周辺回路およびRS232C用ICとを用いて構成した。

図3中に示すPICのOSC端子(OSC 1, OSC 2)には、4 MHzのレゾネータで作製した発信回路を付加し、PICを4 MHzのクロックで動作させた³⁾。この発信回路には、14ステージのバイナリ・リップル・カウンターを接続して244 Hzの外部クロックを発生させた。ついでPICのRA 4端子(タイマー入力端子)に入力した^{4,5)}。

RS232C用ICは、送信する信号をTTLレベル+5Vから232Cレベル±12Vに変換するために、RS232Cドライバー(MAX232CE)を用いた。また、通信は送信のみとした。

PICでのポート処理は、ポート検出用端子に入力された同期パルス波形をTTLレベルのONあるいはOFFのいずれの状態であるかを検出したのち、ポートがON状態あるいはOFF状態のいずれかが保持されている間、PIC16F84

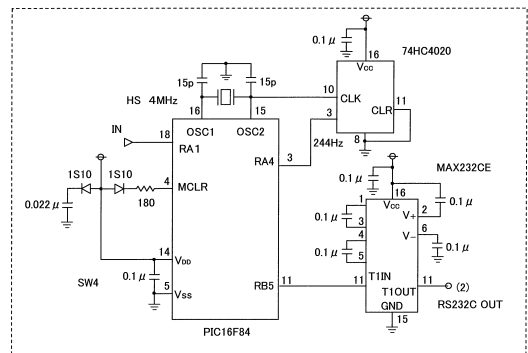


図3 周期検出回路

に内蔵のタイマ0(8 bit カウンタ)で 244 Hz の外部クロックのパルス数をカウントした。

このポート処理を実行するプログラムは、プログラムソースコードを MPASM(Microchip 社)でマシン語に変換のち、PIC の 1024 ワードのフラッシュメモリに書き込んで用いた。

なお、フラッシュメモリへの書き込みは、First Pick(Micro Application Laboratory 社)の Writer を用いた。

PIC の RS232C 通信プログラムは、アセンブラ言語で新たにプログラムを作成して用いた。

なお、通信フォーマットは、通信速度：9600 bps、データ長：8 bit、ストップビット：1 bit、パリティチェック：無しで、非同期シリアル通信のインターフェース(以後、RS232C と記す)を介してパソコンに送信した。

③電源回路

電源回路は、市販の AC-DC アダプタ(出力 9.5 V, 200 mA)と CMOS 3 端子レギュレータで構成した。出力電圧は +5 V で、100 mA の電流が供給できるように設計した。また、配線は PIC の高周波動作での安定と、ノイズを吸収するため、電源ライン幅を太くした。

3. 重力加速度測定ソフトウェア

重力加速度測定ソフトウェアは振動周期測定用プログラム、収集した振動周期データから振動周期を抽出する周期データ抽出プログラム、および重力加速度を算出するプログラムから構成した(図 1)。

①振動周期測定用プログラム

振動周期測定用プログラムは、PIC でカウントされた外部クロックのパルス数からパルス間隔 T_w すなわち振動周期を算出する VC++ で作成したプログラムである。図 4 は、その処理手順を示したものである。

振動周期の収集数は、測定精度を向上させるために 250 個とし、個々の値を順次ディスプレイに表示した。

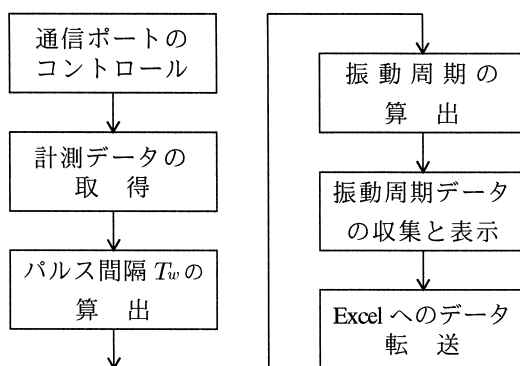


図 4 振動周期測定用プログラムの手順

「通信ポートのコントロール」は、パソコンの COM 1 のポートを使用する設定とし、PIC の通信フォーマットに合わせた通信パラメータをプログラムに直接記述して行った。

「計測データの取得」では、ポートが ON 状態あるいは OFF 状態の 244 Hz のパルス数が PIC から 3 バイトで送信されるため、この 3 バイトのデータを配列変数に格納して取得した。

「パルス間隔 T_w の算出」では、配列変数に格納したパルス数に外部クロック 244 Hz で定まる 1 カウント 4.09 msec を乗じてパルス間隔 T_w を算出した。

「振動周期の算出」では、ON 状態、OFF 状態のパルス間隔 T_w を足し合わせて振動周期を求めた。

「振動周期データの収集と表示」では、図 5 に示すように、得られた振動周期を順次エディットボックスに表示し、250 個の振動周期が収集された時点で、図 5(図中、右下)に示す Excel へのデータ転送を実行するメッセージボックスを表示させた。

「Excel へのデータ転送」では、メッセージボックスの OK ボタンをクリックして得られるイベントと Get Module File Name 関数を用いて、重力加速度を算出するためにあらかじめ用意した xls ファイルのパスを取得し、Excel を起動させてそのファイルを開いた。つぎに、振動

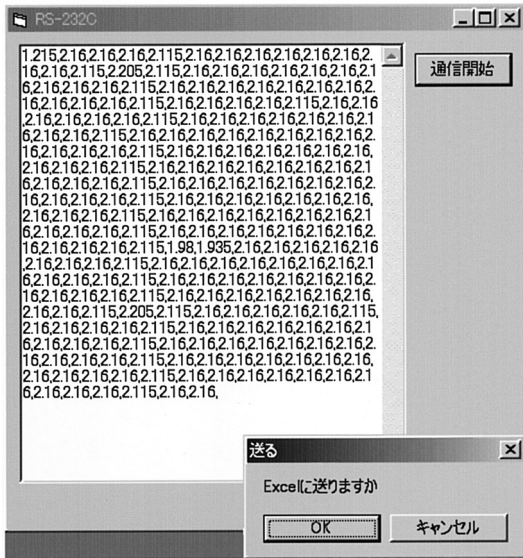


図5 振動周期データの表示画面

周期データは、DDE(Dynamic Data Exchange)の手法によって、ワークシート(Sheet 1)上の指定した各セルに1個ずつ入力させた。

②振動周期の抽出と重力加速度算出プログラム

ExcelのSheet 1に転送された250個の振動周期データの中で最も頻繁に出現する最頻値をMode関数で求め、その値の±3%の範囲に分布する200個の振動周期を抽出した。その後、抽出した振動周期を、コピーコマンドを使用してSheet 2の指定した行に貼り付けた。これらの処理は、Excelに付属のVBAで作成したマクロプログラムで処理した。

つぎに、抽出した200個の振動周期データから20振動毎、200振動までの時間をExcelの表計算機能を用いて算出したのち、Average関数を用いてその平均値をSheet 3上に求めた。

また、つぎの近似式から重力加速度 g の値をただちに求めることとした。

$$g = \frac{4\pi^2(l+r)}{T^2}$$

l : 金属線の長さ r : 金属球の半径
 T : ボルダの振り子の周期

表1 重力加速度の測定結果

	実験結果	理科年表値
g (m/sec^2)	9.7988 ± 0.0001	9.7976319

表1に、今回開発した周期検出回路による重力加速度 g の実験結果を示した。

実験は、ボルダ振り子の金属線の長さを1.1019 mと1.4172 mの2種類とし、その長さで各々20回行った。この時の振り子の振幅は、光スイッチの光軸を中心に左右約0.5 cmで振れるよう調整して行った。

表1は、重力加速度 g の値が長さに依存せずにほぼ同一であったため、2種類の長さのデータ数を合わせて平均値($n=40$)とし、その確率誤差を求めた結果である。

考 察

本学部の物理学実験では、初等力学の重力加速度を定量的に理解させるため、比較的簡便な装置で精度のよい測定値が得られる「ボルダの振り子」を用いた実験を実施している。この重力加速度測定の実験は、振動周期の測定精度を向上させるため、20振動毎の時間測定を連続して10回、合計200振動をストップウォッチで計測している。測定者が常に振動を注視しながら、この一連の操作を確実に行うことは、容易なことではなく、しばしば振動回数の数え間違いなどの人為的ミスによって不正確な測定結果となり、授業進行の弊害となることがみられてきた。

そこで筆者らは、この振動周期計測における人為的ミスを取り除くため、A/Dコンバータとパソコンを用いた測定法の研究開発を企図し、2001年度にその計測処理システムを考案・自作し、その詳細を報告した¹⁾。

すでに報告した計測処理システムは、ボルダ振り子の振動を検出するための光センサと振動

検出回路, および A/D コンバータのサンプリング周期から振動周期を算出するプログラムを備えたパソコンとで構成したものである。この計測処理システムによる測定では, 目的とした測定者の人為的ミスは解消できたが, 振動周期 (同期パルス波形のパルス間隔 T_w) を測定する精度すなわち A/D コンバータのサンプリング周期が 0.1 sec であったため, これに起因する測定結果の誤差がみられた。また, 振動周期を半周期のみから算出したため, 振り子の振れが光スイッチの中心から左右均等に振れるように光スイッチの位置を調整することが必要とされ, その調整が非常に煩雑であった。

そこで, 今回, 振動周期の測定を高い精度にするため, ボルダ振り子周期検出装置を抜本的に改良するとともに, 計測時の調整すなわち光スイッチの位置調整が煩雑とならない新たな計測処理システムの研究・開発を企図した。

振動周期の測定精度を向上するには, ボルダ振り子周期検出装置 (図 1) の周期検出回路で処理する同期パルス波形のパルス間隔 T_w の測定精度を上げることが必要である。そこで, ポートの状態と外部クロックから振動周期を検出する新たな周期検出回路を, マイクロコントローラを用いて独自に考案・自作することとした。

周期検出回路の測定精度は, PIC のポートが ON 状態あるいは OFF 状態で保持されている間の外部クロックのパルス数と, その周波数とで決定される。そこで, 重力加速度を有効数字 4 桁で得るため, 2 秒程度で振動する周期を, 先の A/D コンバータ回路の 0.1 sec よりさらに 2 桁下の 0.001 sec 程度で検出することとし, 周期検出回路の PIC の外部クロックを 244 Hz に設定して 1 カウントを 4.09 msec で検出することにした。

周期検出回路で使用した PIC は, プログラムの書き換えが繰り返して行えるフラッシュメモリ型の PIC16F84 を用いた。また, PIC の動

作をコントロールするプログラムでは, 外部クロックの周波数の変更在即座に追従し, 最高 1 μ sec の測定精度まで対応できるように, メモリ空間を有効に利用するポインタ処理で記述した。

先に報告した計測処理システムでは, 光スイッチの位置調整が煩雑であったのは, 振動周期を半周期のみの計測としたことによる。さらに, 半周期の計測は測定値のバラツキなど, 測定精度への影響もあった。この問題点を解消するため, 重力加速度測定ソフトウェアの振動周期測定用プログラムを半周期から全周期で振動周期を算出するプログラムに変更・修正し, 光スイッチと金属線との配置における煩雑さの軽減を図った。

振動周期測定用プログラムは, 新たに VC++ で作成したが, この利用はすでに開発した周期検出回路で用いた Visual Basic (以後, VB と記す) の MSComm コントロールの処理スピードが遅く, それに伴う送信データ欠落の障害を取り除くためである。また, プログラムのインストールでは, OS として Windows のバージョンに左右されずスムーズなインストールができ, VB に比較してプログラムのインストール容量も 1/10 と小さい利点がある。

ボルダ振り子による重力加速度の実験は, 金属線の長さを 1.1019 m と 1.4172 m の 2 種類について行った。表 1 に示したように, 重力加速度 g は, 9.7988 ± 0.0001 m/sec² であった。結果は, 理科年表の東京の緯度における値と比較して, 有効数字 3 桁まで同一であり, 学生実験の実測値と比較しても優れた結果であった。また, 確率誤差が ± 0.0001 と非常に小さいことから, バラツキが小さく, 先の計測処理システムより安定した測定が行われていた。したがって今回開発した周期検出回路とした計測処理システムを学生実験に導入することは望ましいと考える。

おわりに

今回、研究・開発した重力加速度の計測処理システムは、従来の処理システムに比べて振動周期の測定精度を向上させたものである。この精度を向上するため、周期検出回路をすでに開発した A/D コンバータのサンプリング周期から検出する回路を、ポート状態の検出と外部クロックのカウンタ数から検出する回路に置き換えた回路を設計・自作し、重力加速度 g を測定した。また、振動周期の算出法を半周期から全周期とした各回路に対応したソフトウェアを開発することで、精度の向上のみならず、従来のシステム調整の煩雑さを軽減させることとした。

その結果、重力加速度 g の測定値が十分な精度と正確さで得られた。確率誤差が先の計測処理システムに比べて非常に小さいことから、高精度の測定が行われたと考えられる。したがって、ボルダ振り子の振動周期の計測には、ポート状態の検出と外部クロックのパルス数計測による周期検出回路を用いることが優れていると結論される。

今後、開発した計測処理システムを授業現場へ導入し、学生実験での測定結果の分析および操作性について詳細な検討を行いたいと考える。

本研究は、日本大学歯学部佐藤研究費の一部によった。

参考文献

- 1) 山岡大, 藤原忠夫: パソコンを利用した学生実験課題の開発研究—A/D コンバータを用いた重力加速度の測定—; 日本大学歯学部研究紀要, 29, 1-7, 2001.
- 2) 秋月電子通商株式会社: PIC 周波数カウンタキット製作マニュアル; 秋月電子通商株式会社, 第 2 班, 3, 1997.
- 3) 村田製作所: CERAMIC RESONATOR アプリケーションマニュアル; cat.No.P 60-13, 29-31, 2002.
- 4) 湯山俊夫: デジタル IC 回路の設計; CQ 出版, 第 5 版, 153-156, 1988.
- 5) 藤たかし, 若原正年: 最新 C-MOSIC 規格表; CQ 出版, 44, 1988.