

光距離センサを用いた Borda 振り子周期の測定

三重大大学自然科学系技術部

○高松 広記

takamatsu@ars.mie-u.ac.jp

1. はじめに

本学の教養教育院で開講されている物理学実験（学部 2 年次履修）のテーマの一つに『重力加速度の測定（Borda 振り子）』というテーマがある。現状この実験では、振り子の周期を実験者が望遠鏡を併用し、目視によりストップウォッチで測定している（以下、ストップウォッチ計測法という）。本発表ではワンボードマイコンシステムである Arduino に光距離センサ（GP2Y0A21YK：シャープ製）を接続し、目視に依らない（実験者に依らない）計測方法（以下、センサ計測法という）を検討した現在までの取り組みについて報告する。

2. Borda 振り子による重力加速度の測定理論

Borda 振り子の周期から、重力加速度 g が測定できる詳細な理論は指導書¹⁾に委ねることにして割愛するが、図 1 に示すように Borda 振り子において、針金の長さ ℓ 、小球の半径 r および周期 T を用いれば重力加速度 g は計算により求めることができる。

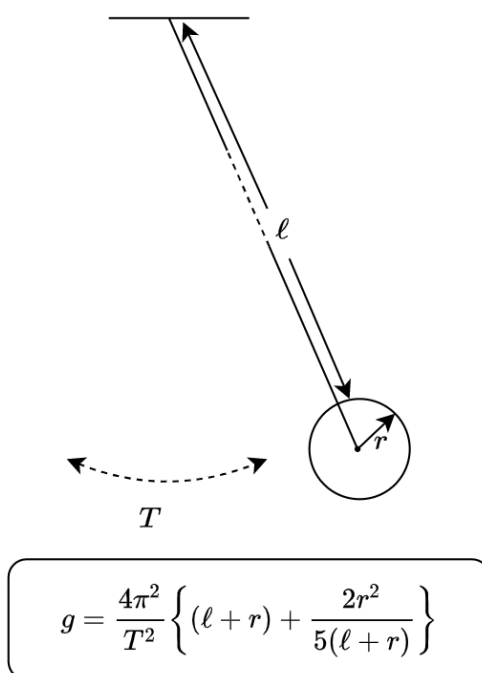


図 1 Borda 振り子の概略図と理論式

3. センサ計測法の検討動機

現状の物理学実験での測定方法は、針金の長さ ℓ を巻き尺で、小球の半径 r （直径 $2r$ ）をノギスで、周期 T をストップウォッチでそれぞれ測定している。あらゆる測定において、誤差は含まれてしまうものだが、本測定においては、ストップウォッチを操作する際の測定者の癖も誤差の要因となる。

また、昨今『データサイエンス』や『IoT』などの用語を耳にすることが珍しくなくなったデジタル化社会において、教育の現場にもデジタル教育の要求が高まってきている。そこでストップウォッチでの周期計測を光距離センサに置き換え、取得したデジタルデータをプログラムで統計処理することによって周期を算出できないかと考えた。

すなわち、『測定誤差軽減』と『デジタル教育』という二つの観点からセンサ計測法を検討することにした。

4. センサ計測法のハードウェア構成

光距離センサの制御を行うためのワンボードマイコンとして、比較的安価に入手可能であること、容易にセンサ類を追加できること、物理学実験の他のテーマにも転用が見込めること、等の理由から Arduino Uno²⁾ を選択した。光距離センサはインターネットで『Arduino 光距離センサ』と検索した際に比較的情報の多かった、GP2Y0A21YK（シャープ製）を採用した。

図2に示すように、Arduino と GP2Y0A21YK は特別な追加回路を必要とせず、3つの線を直接ジャンパー線で接続することで利用可能である。

また、光距離センサを固定するための測定用治具として図3のものを3Dプリンタで作成した。各装置の全体像を示すため、Borda 振り子の設置状況を図4に、実際の測定風景を図5に示す。

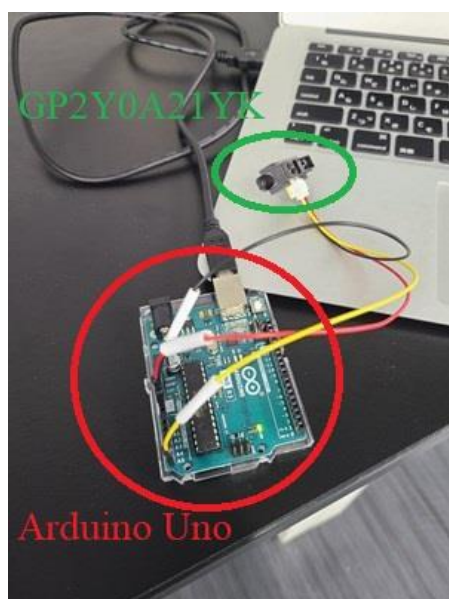


図2 Arduino と GP2Y0A21YK の接続



図3 光距離センサ固定用治具

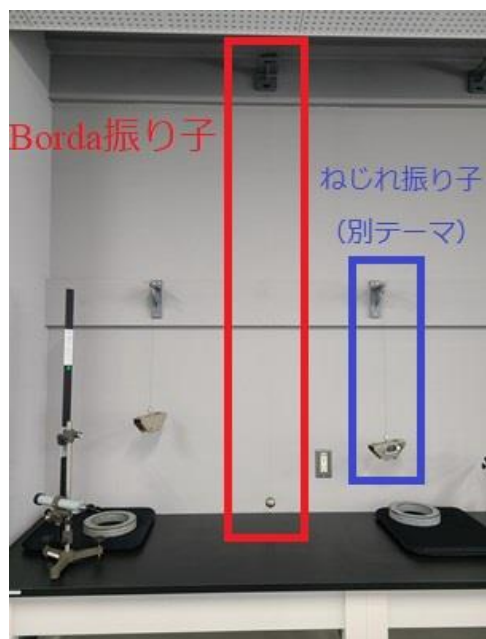


図4 振り子設置状況

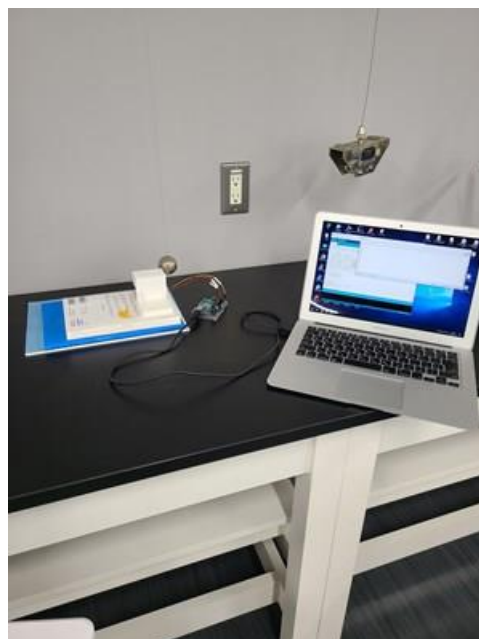


図5 測定風景

5. センサ計測法のソフトウェア構成

5-1. 使用言語

Arduino は専用の Arduino 言語を利用する必要があるが、開発環境が固定されているため、情報はインターネットで容易に手に入れることができる（具体的な例示のソースコードが公開されているものも多い）。また、C 言語と似ている特徴がある。プログラミング初心者にも比較的扱いやすい言語である。

5-2. 周期測定処理（アルゴリズム）

光距離センサの出力は、検出した物体との距離に応じたアナログ電圧である。主に以下の 3 つのステップにより、アナログ電圧から周期として表示させる処理を行った。①2 つの閾値を設定し、アナログ電圧を 1（物体検知あり）と 0（物体検知なし）の二つの状態に 2 値化（デジタル化）する。②0 から 1 に変化した時刻と二度先の 0 から 1 に変化した時刻との差（周期）を求める。③接続された PC 上に測定された時間を表示する。図 6 に測定処理のイメージ図を示す。

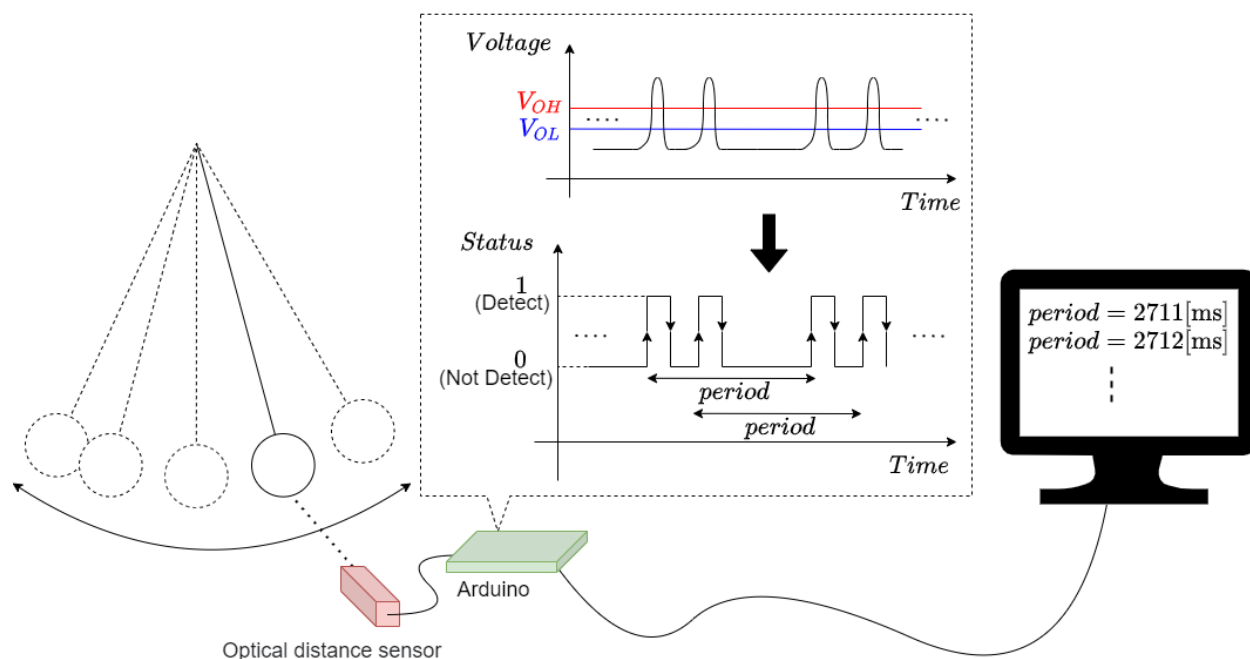


図 6 周期測定処理のイメージ図

6. 測定結果

ストップウォッチ計測法とセンサ計測法で実際に実験を行い比較した結果を表 1 に示す。

表 1 測定結果

	ストップウォッチ計測	センサ計測
周期	2.71[s]	2.712[s]
針金の長さ	178.16[cm]	178.16[cm]
小球の半径	1.991[cm]	1.991[cm]
重力加速度	9.68[m/s ²]	9.670[m/s ²]

なお、ストップウォッチ計測法における周期測定は指導書¹⁾に従い、10 周期ごとに 90 周期分を連続で測定後、50 周期分の時間差として処理し、外れ値を除き（今回は外れ値なし。）その平均値から算出した。おそらくこれらの処理は、限りある授業時間中にヒューマンエラーを排除可能としつつ測定誤差をなるべく小さくしようとする工夫であると思われる。センサ計測法における周期測定も比較のため 90 周期の平均として処理した。

また、ストップウォッチは 1/100 秒まで計測可能であり、センサ計測では 1/1000 秒まで計測可能なため、有効桁数に違いがあることをコメントしておく。

三重県津市の重力加速度は日本重力基準網 2016³⁾によると 9.79914993[m/s²]であり、今回の測定値と約 1%差がある。この差の主たる要因として、今回の実験は周期測定の置き換え検討に主眼を置き、本来共

同実験者で行うべき針金の長さの測定などを一人で行ったことに起因されると考察するが、本発表の趣旨とは異なるため、求めた重力加速度の厳密さについてはご了承願いたい。

周期測定方法の置き換え部分に着目すると、周期測定の有効桁数を1桁増やす結果にもつながり、後述する課題などの問題はあがあるが、置き換えの可能性は十分あると判断する。

7. 課題と展望

- ・今回用いた光距離センサは赤外線を発光し、物体からの反射光によって距離を検出する。当然ながら物体（小球）に赤外線が当たらなければ測定不能であるため、センサを固定する測定用治具などの開発および改良が必要である。

- ・学生実験の教育目的として、既知の理論の確認を通じて、各種計測機器の操作などを学ぶことや、重力加速度のように一見特別な測定が必要そうな物理量を『身近』な機器でも想像以上の精度で計測可能であることを体感することにも意義があるように思われる。そのため一概にストップウォッチ計測法を有効桁数の観点だけでは排除すべきでないと考える。

- ・精度をよりよく計測するためには、高性能センサの導入や、アルゴリズムの見直しなど、ハード面、ソフト面ともに改良の余地は残っている。

- ・最終計算値である重力加速度の誤差軽減に主眼を置く場合は、周期測定の精度向上を考察するだけでなく、針金の長さの測定方法（巻き尺）などの考察も並行することで、誤差伝搬などを評価しながら進めていく必要がある。

- ・ArduinoにはSDカードモジュールをセンサ同様に追加実装することも可能である。計測結果をSDカードに書き込ませることで、独立した測定器としてスタンドアローン化することも考えられる。

- ・Arduinoのプログラミングや回路接続は初学者にとっては有意義な体験と成り得る。また、測定された周期の分布や分散をはじめとする統計的なデータ処理を学ぶことは、実務的な内容を多く含み、十分な学習効果が期待される。一方、授業時間内に学習ボリュームを抑える必要もある。すなわち、データサイエンス関連の実験テーマとしてBorda振り子とは別に、データ処理に関する部分だけを新たな実験テーマとして独立させることも考えられる。

8. まとめ

振り子の周期測定方法としてストップウォッチから光距離センサへの置き換えを検討した。測定誤差軽減の観点では、測定時のセンサ固定方法などの課題は残るものの、有効桁数を1桁あげられ、置き換えの可能性は十分にある結果を得た。デジタル教育の観点では、今後検討する課題は多々あるものの、具体的事例を示すことができた。

また、今回改めて『教育』という観点から指導書¹⁾の手順を確認するきっかけとなり、限られた授業時間の中で『何を』『どこまで』『どの程度』実験させるべきか、非常に考えられていると感じた。

参考文献

- 1) 阿閉義一, 佐野和博, 杉野敏秀, 長井務, 松永守. 物理学実験テキスト. 三重大学教養教育院, 2021, p. 23-26.
- 2) Michael Shiloh (著), 船田 巧 (翻訳). Arduinoをはじめよう 第3版. オライリージャパン, 2015.
- 3) 測地部 吉田賢司, 矢萩智裕, 平岡喜文, 宮原伐折羅, 山本宏章, 地理地殻活動研究センター 宮崎隆幸. 日本重力基準網 2016 (JGSN2016) の構築(<https://www.gsi.go.jp/common/000208471.pdf> 閲覧日 2022年 1月 7日)