

低解像度高速カメラを用いた身近な運動の教材化の課題

加藤徹也^{1)*} 本田敦也²⁾

¹⁾千葉大学・教育学部 ²⁾千葉大学大学院・教育学研究科・修士課程

Issues in physics education material developments of daily-life phenomena using low-resolution high-speed video camera

KATO Tetsuya^{1)*} HONDA Atsuya²⁾

¹⁾Faculty of Education, Chiba University ²⁾Graduate School of Education, Chiba University

ハイスピード・ビデオカメラの市販により、運動する物体を撮影して力学法則を確かめるような物理教育の機会が増えている。一般に動画は容量の大きなデータで、その保存・転送・表示における技術上の問題があり、解像度が低い。このため、精度よく物体位置を取得するには限界がある。またハイスピード撮影のデータはフレーム数が多く、効率よい画像処理プログラミングが必要である。われわれは、力学的エネルギー保存の法則の成立を演示することを目的として、 512×384 pixelsの解像度で1秒間300フレームの動画撮影を行い、振り子運動する物体の位置をOpenCVによるプログラミングを通して取得した。画像上で直径81 pixelの物体位置を ± 0.03 pixelの精度で得て、水平方向 ± 58 pixel、鉛直方向1.1 pixelの弧を描く運動から、運動エネルギー・位置エネルギーを十分な精度で決定できた。

Recently, the chance to use commercially supplied high-speed video cameras has been increased in physics education to confirm kinetic laws of the motion of bodies. The data files of movies are generally so large in capacity that there are the technical issues to store, transfer, and display the data. In consequence, the resolution of the movie is not enough to determine the position of moving bodies precisely. In addition, the high-speed movies consist of a large number of frames, so that we need to be computer-assisted and to use high-efficient Computer-Vision (shortly, CV) software of the image processing. Thus in order to assert the mechanical-energy conservation law in demonstrational experiments, we recorded motion of some pendulums in the videos with 512×384 pixels in resolution and 300 frames per second in frame rate, and obtained the position of the bodies with a handmade software using OpenCV libraries. In a case of a pendulum, of which the body has the size of 81 pixel in diameter on the image and sweeps in an arc with the horizontal amplitude of ± 58 pixels and with the quite small vertical range of 1.1 pixel, the time-dependence of kinetic and potential energies showed the expected compensating behaviors with acceptable errors from the results with the reading positional accuracy of about 0.03 pixel.

キーワード：高速ビデオカメラ (high-speed video camera)

画像処理プログラミング (image processing programming) OpenCV (OpenCV)

物理実験 (physics experiment) 力学的エネルギーの保存 (mechanical-energy conservation law)

ハイスピードカメラは従来、自動車の衝突安全試験や爆発現象といった瞬時に起こる形状変形や位置変化の解析、また、スポーツのフォームチェックや動作分析など動きの流れの詳細をとらえてその制御を改善する研究など、最先端の研究開発分野に使用されてきた。また近年は、テレビ番組やスポーツ中継でハイスピードカメラによって撮影された映像を見ることも多い。このように業務用の映像機器でしか撮影することができなかった超スロー映像を手軽に撮影できる一般向けのハイスピードカメラが数年前から販売され始め、話題になっている。

これらのカメラは1秒間に1,000枚程度の高速撮影が可能であり、人間の目には見えない瞬間の映像を記録す

ることが可能である。使用用途としては、実験の分析や昆虫観察、スポーツの技術向上、日常の何気ない場面や素早い動きの確認など、様々な身近な対象を撮影することも考えられる。スローモーションという視点でものごとを捉えることによって、今まで意識することのなかった新たな発見や楽しさを得る機会が増えるだろう。また、高速撮影機能を使用することで決定的瞬間を逃さず撮影し、とっておきの1枚を選択することもセールス・ポイントになっている。このようにハイスピードカメラは、実験的な分野のみならず、一般ユーザーの楽しみ方の一つとして使用されるようになってきた。

本研究で使用したカメラは一眼レフ・ライクのボディデザインに高倍率ズームを搭載した本格的なスペックのカメラであるが、最近ではコンパクト・デジタルカメラにハイスピード・モードを搭載した製品も販売されている。近い将来、ハイスピード撮影がありふれた技術とし

*連絡先著者：加藤徹也

*Corresponding author :

て気ままに使用されるようになることも十分考えられる。

物理教育の場面で、このようなカメラを物体の運動現象の観察に使うことは容易に想像できるが、物体の位置を数値化して解析するにはいくつかの問題がある。撮影した結果は数千枚～数万枚分の静止画に相当する動画であるため、全ての情報を静止画として解析対象にするにはコンピューター支援によるプログラム処理あるいはバッチ処理が必要となる。また、仮に数枚の静止画を取り出して解析するとしても、写真のように印刷して長さを測るという方法よりも、コンピューターの中でソフトウェア処理する方法のほうが、ほかの付加的な教育支援のしかたとあわせた効果的な教材資料として有用であろう。

そこで本論文では、ハイスピード撮影可能な市販のデジタルカメラによる撮影とそこから物体の位置の取得、およびその結果を用いた物理法則の確認までの一連の流れを具体的に紹介しながら、ソフトウェア開発の現状と課題、および、物理教育に活用するための問題点を整理した。特に、物体の移動量が小さいと測定精度が要求されることになり、いろいろな問題が浮かび上がると考えられるので、物体運動としては振り子運動を例として取り上げた。振り子のエネルギーは、鉛直方向のわずかな上下運動と直接関わっているからである。まず、第1章では、録画してそのデータをコンピューターに収めるまで、第2章ではそれを解析して数値データを取得するまで、第3章では物理法則の解析について紹介し、最後に課題を整理する。

第1章 録画と画像取得について

本章では、運動物体の撮影から、位置座標を取得するまでの手順を説明する。ここでは、実験室やスタジオのような特別な環境下ではなく、普通の部屋で簡単にできるような撮影を想定している。

1.1 配備したカメラ

CASIO製液晶デジタルカメラEX-F1 (図1(a))を配備した。このカメラには撮像素子として総画素数660万画素、有効画素数600万画素の1/1.8型正画素高速CMOSや1/200～1/40,000秒の電子シャッターが搭載されていて、静止画の撮影の他、高速連写、フルHD (High-Definition, 高解像度) 動画撮影、ハイスピード動画といった機能が搭載されている^[1]。本研究ではハイスピード動画の機能を使用して、運動物体の撮影を行った。この場合、最高1秒間に1,200コマ、すなわち1,200 fps (frame per second) での336×96 pixelsの解像度の動画が撮影可能で、ほかに30–300 fps, 300 fps (いずれも512×384 pixels), 600 fps (432×192 pixels) での撮影速度も選択可能である。出力ファイルはMOV形式29.97 fpsのカラー動画であり、300 fpsモードで撮影する場合は1 GBのSDメモリーカードに約7分19秒間の撮影が可能である。一般的な物体の運動の撮影にはこれで十分である。

また、撮影した動画から選択したい場面をカット編集する機能もある。パソコンへの保存は、付属のUSBケー

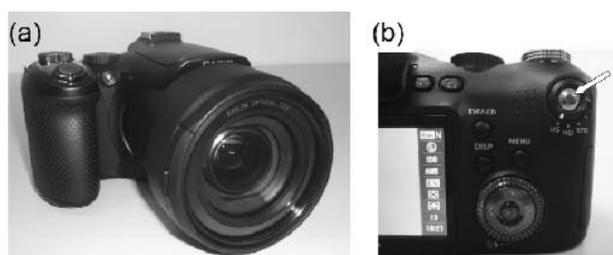


図1 (a)前面から見たEX-F1と(b)その背面 (矢印はムービー・ボタン)

ブル接続によりリムーバブル・メディアとして認識させ、コピーする。Windows, Macintoshに対応している。

1.2 撮影時の照明

電子シャッター速度を自動にしておく場合、撮影時の照明は自然光や蛍光灯の光で十分であるが、蛍光灯の光にはちらつきがある。解析の方法によっては蛍光灯ちらつきを気にしなくてよいこともあるが、これが問題になる場合は、被写体までの距離が短ければ、カメラに搭載されているLEDライト (フラッシュの上側にある) が、動画撮影時の撮影ライトとしても使用可能である。

LEDライトでは光が届かない場合、撮影用のライトを使用するのも良い。本研究では、一般的な交流100V用650W (連続使用5分まで) のハロゲン・ランプに直流電源を接続した。ただし、使用できる直流可変電源 (高砂製作所製EX-375L2) が定格で60V出力時6.25A, 50V出力時7.5Aのクラスのものであったため、スイッチング電源 (イータ電機工業製ERE24SA, 24V出力で定格7A) の2台とこの直流可変電源をすべて直列接続して直流48V～108Vの電源とし、90V程度の出力で使用した。なお、電源投入時のわずかなタイミングの遅れによる隣接スイッチング電源からの電流流入の問題を防止するために、ショットキーダイオードによるバイパスを設けている^[2]。

1.3 撮影の操作手順

撮影前に、まず、動画のフレームレート (動画の撮影速度) を300 fpsなどに設定する。次にムービー・モードのスイッチをHS (High-Speed) に合わせる。カメラの液晶モニターを見ながらカメラの向き、画角(ズーム)、明るさおよびピントを調整する。ピントを合わせる場合は、シャッターを半押しするか、マニュアル・フォーカスで合わせる。ムービー・ボタン (図1(b)の矢印) を押して撮影を開始・停止する。あるいは、メーカーのホームページ^[3]に掲載されているソフトウェアの利用により、液晶モニターより大きく映しながらコンピューターで制御することもできる。これはピント調整に便利である。ただし、モニターに映し出される撮影開始前の映像および撮影中の映像は、実際に撮影される画像とは範囲が若干異なるので注意する。

撮影した映像はカメラの再生モードで確認することができる。特にハイスピード撮影では注目したい時間は短く、それを含む前後の流れをそのまま撮影することが多い。不要な時間はデータ容量の点で無視できず、保存時

もコピー時も問題になるので、ムービーカット機能により不要な部分がある程度カットすることが必要である。カットしたい動画を表示したら、MENU→再生機能タブ→ムービーカットという手順で、残す部分の開始前と終了後をカットする。映像の確認ができれば、付属のUSBケーブル接続により、パソコンへ動画ファイルとしてコピーする。

1.4 データ・フォーマットの変換

本研究で作成した物体認識プログラムでは、AVI形式のファイルで動画を読み込む。しかし、配備したカメラのファイル形式はMOVであるため、これをAVI形式に変換する作業を行う必要がある。GUI(グラフィカル・インターフェース)をもつソフトウェア(ペガシス製TMPGEnc 4.0 Expressなど)を利用する場合もあるが、バッチ処理化が可能なコマンド・ラインで行うFFMPEGというソフトウェア^[4]による方法を紹介する。コマンドライン上でのsource.movからsource.aviへの変換は、効率よい圧縮をするXviDのコーデックを使用した。このソフトにはGUI版のWinFFがあり^[5]、これにはコマンドを示す機能もあって、それによれば

```
ffmpeg.exe -i "source.mov" -f avi -r 29.97
-vcodec libxvid -vtag XVID -s 512x384
-aspect 4:3 -maxrate 1800k -b 1500k -qmin
3 -qmax 5 -bufsize 4096 -mbd 2 -bf 2
-flags +4mv -trellis -aic -cmp 2 -subcmp
2 -g 300 -acodec libmp3lame -ar 48000 -ab
128k -ac 2 "source.avi"
```

を実行したことになる。FFMPEG, WinFF いずれも LGPL あるいは GPL でライセンス管理されているフリーのソフトである。

第2章 物体の位置座標の取得

AVI形式の動画ファイルを読み込んで各フレームの運動物体の位置座標を取得するソフトウェアを作成した。取得した数値データはテキストファイルとして出力される。

2.1 概要

撮影した運動物体の分析をするためには、画像上での物体の位置を読みとる必要がある。人間の目の代わりにコンピューターに画像処理させることで物体の位置を読み取る技術を、一般にコンピューター・ビジョン(Computer Vision)という。以前われわれは、画像上でピクセル位置を読み取る市販のソフトウェアとして、National Instruments 製 Vision Assistant を利用し、問題点を整理した^[6,7]。具体的には次のような課題が見出された。

1. 低解像度や照明条件などにより、画面上の位置読み取り精度が悪くなる
2. 位置座標が整数でしか得られない場合、速度にも読み取り精度が影響する
3. 画像上で物体を拡大すると輪郭がぼやけて、実際の長さとの対応に誤差が生じる

特に3つめの課題における誤差は、長さが関わる重力加速度にそのまま数%のずれを与えるため、運動エネルギーと位置エネルギーのバランスを崩す結果を招く。これは、画像の解像度を上げなければ本質的に改善は難しい。

本研究では低解像度のままとしながら、課題1と2を改善するような位置座標取得プログラムを作成することにした。特に、振幅の小さな振り子のように、鉛直変位が微小なものは、より高精度の読み取りが必要となる。本研究ではそのような、微小な位置や速度を含むような運動の解析に重点をおいたプログラムの作成を目指した。また、座標の位置についてはサブピクセル・オーダー、すなわち1ピクセル以下の精度で読み取ることとした。

作成したプログラムは、テンプレート・マッチング法を用いた物体認識による位置座標取得プログラムである。テンプレート画像として探索したい物体の画像を用意し、探索させたい画像(入力画像)内でテンプレート画像を移動させながら、輝度差の2乗和を計算させる。その最小値を与える位置を、テンプレート画像と最も類似性が高い位置として物体認識をし、座標を読み取る。物体認識には、色による差分法などいくつかの方法が知られているが、蛍光灯のちらつきや自然光の変化にも対応できるように、本研究ではテンプレート画像を毎回更新する方法を選択した^[8]。

2.2 開発環境

開発環境として Microsoft Visual Studio C++ 2008 Express を、また、画像処理ライブラリ Open CV (Open Source Computer Vision Library) の Ver. 1.0 (あるいは Ver. 1.1)^[9-11] を使用した。PC は HP 製 Workstation xw4550 に 2.39 GHz の Dual-Core AMD Opteron CPU と 2.87 GB メモリーを搭載、OS は Windows XP Professional である。

OpenCV とは、Intel 社が開発を始め、現在は Willow Garage が引き継いで開発を行っている無償のオープンソース画像処理ライブラリ集である。OpenCV には、画像のフィルタ処理やテンプレートマッチング、物体認識、映像解析など 500 以上の画像処理アルゴリズムが実装されている。

2.3 プログラム実行時の準備と確認

本プログラムはコンソール画面(コマンド・プロンプト)から各ウインドウ画面を起動し、ウインドウ画面上で行った操作結果やメッセージをコンソール画面上に文字出力する。プログラムの起動は、Visual Studio の開発環境でデバッグ開始(F5)・デバッグなしで開始(Ctrl+F5)を行うほか、完成した.exeの実行ファイル(デバッグ時はプロジェクトのDebugフォルダにある)をダブルクリックしてもよい。

プログラムを起動すると、AVI形式の動画ファイルが読込まれる。その動画から画像を取り込み、それを「Capture」というウインドウ画面へと出力する。ループを繰り返すごとに、画像が更新されるため動画のように表示される。

次に、探索したい物体の画像をテンプレート画像とし

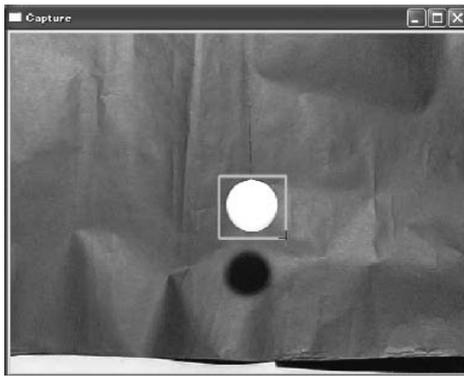


図2 マウスクリックで範囲を指定した場面

て取り込むため、次々に出力されている画像の中から、テンプレートとするのにふさわしそうな1枚の画像を選択する。探索したい物体が含まれる範囲でマウス・ドラッグで描くと、選択した画像（静止画）上に選択範囲が矩形で表示される（図2）。これを確認後に、選択範囲が切り出され、テンプレート画像が作成される。

テンプレート・マッチングでは、処理を簡単にするために2値化された画像で行う。そのため、まず、入力画像とテンプレート画像の2値化を行うが、本プログラムではクロマキー（Chroma Key）を利用した。クロマキーとは、画像から特定の色領域を除去し、物体を抽出する手法であり、画像の合成（たとえば真っ青な背景の前に立つ人の映像から青成分を除去し、他の画像に貼りつけることによって、その人を写し込む）によく使われる。また、表色系はHSV（色相、彩度、明度）表色系を採用した。プログラムの処理としては、まず入力画像とテンプレート画像をRGB表色系からHSV表色系に変換してウィンドウを三つ表示する。そのひとつは、色相、彩度、明度それぞれの上限・下限のトラックバーと、その指定によるクロマキーで抽出された画像（抽出画像）を表示するもの（図3(a)）、他の二つは、2値化された入力画像（図3(b)）とテンプレート画像（図3(c)）をそれぞれ表示するものである。

プログラムの実行時には、まず、代表的な入力画像をひとつ選択する。操作方法はテンプレート作成のときの画像選択と同じである。3つの要素（色相 Hue、彩度 Saturation、明度 Value）の上限・下限のトラックバーを左右に動かしながら、認識したい物体のみが抽出されるような閾値を決定する。抽出画像は、3つの要素の上限・下限の範囲内の画素はそのまま、範囲外の画素は黒で置き換えて表示される。入力画像とテンプレート画像はいずれも、抽出された画素が白色、それ以外は黒色で置き換えられて、2値化された画像になる。なお、抽出画像、入力画像、テンプレート画像はいずれも、バーを動かすにつれてリアルタイムに変更されるため、画像を見ながら閾値を調整できる。また、ここで決定した閾値は、この後の作業で現れる入力画像・テンプレート画像の両方における2値化において、そのまま適応されることになる。

2値化のためのクロマキー閾値のセットの確認として、現在の元の入力画像に対するテンプレート・マッチングによる物体認識を行う。テンプレートマッチング法とは、

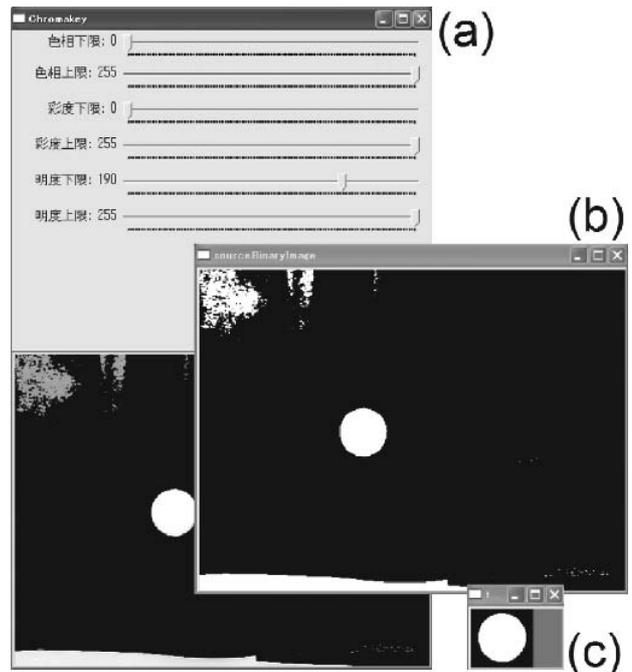


図3 クロマキー処理での(a)HSV上下限指定用トラック・バーと、その指定によりフィルターをかけられた抽出画像、および2値化された(b)入力画像と(c)テンプレート画像

入力画像の中の任意の位置でテンプレート画像と同じ大きさの矩形領域を取り出し、テンプレート画像の類似度を計算しながら、入力画像の中で類似度が最も高くなる部分を探索するという方法である。類似度として、本論文執筆の段階では、2値化した画像の0、1の値を輝度として、輝度差の二乗和(SSD: Sum of Squared Difference)を最小化する方法を採用した。SSD値が最小値となる座標が算出されれば、物体認識が完了する。ここでの物体認識の結果として、テンプレート画像と同じ大きさの矩形を元の入力画像に描いてウィンドウに表示するので、それが図2のように、矩形の中に探索された物体が入っていれば、クロマキー閾値設定の際の物体認識が成功したことがわかる。

なお、ここで採用した探索方法は、2値化した値が同一でない画素の数を最小化するという探索方法と同じ意義を持つ。他の類似度の指標には、元の画像のHSV表色系での明度 Value あるいはグレースケールに変換した画像の階調値により定義した輝度による輝度差の絶対値あるいはその二乗の和、またそのほか、相関係数などの測度を導入する方法もある。特に画像の輪郭領域がぼやけているような場合は、そこでの明度や階調の違いを反映させる必要がある。本論文では撮影時に対象のコントラストをあげておくことによって、2値化した画像でのマッチングが効率よく行われるように配慮した。

2.4 プログラム処理（主要部分）

確認作業が終わると、全ての画像に対しての処理に移る。動画から1枚ずつ順々に画像を取り込み、物体認識と位置取得の二段階の作業を行っていく。まず、1枚目の入力画像を取り込み、初めに作成したテンプレート画

像を使ってテンプレート・マッチングを行い、物体認識する。次の座標取得には、物体認識された矩形の範囲についてのみ計算する方法を用いた。入力画像を2値化し物体認識された位置に、テンプレート画像と同じ大きさの矩形領域を2値画像から切り出し、その範囲内での重心座標を求める。重心の座標はサブピクセル・オーダで算出され、得られた重心座標を入力画像の座標に変換して、物体の位置座標を決める。

ひとつの入力画像に対する座標取得ができれば、入力画像からテンプレート画像と同じ大きさの矩形領域を、重心座標が中心となるように切り出し、新テンプレート画像として定義する。新テンプレートに更新する理由は、動画の中での照度の変化や物体の傾きなどに対応させるためである。新テンプレートが作成されると2枚目の入力画像の作業に移る。

2枚目からは、新テンプレート画像と最初に作成したテンプレート画像との両方でテンプレート・マッチングする。そして輝度差の二乗和の最小がより小さい方をマッチングの類似度が高いものとして、次の新テンプレート画像に採用する。基本的には新テンプレート画像の方が類似度が高くなるのが期待できるが、誤認識を防ぐための保険としてあえて最初のテンプレート画像とのマッチングと比較した。

以降は1枚目と同様、位置座標を取得し、テンプレート画像を更新して次の画像へと移る。その後、画像がなくなるまで同様の作業を繰り返し、全ての画像から物体の位置座標を取得する。

第3章 実験結果の物理的解析

本研究では、力学現象が単純な物理法則に従うことを示すにあたって、振り子の運動を対象とすることにした。振り子の振動運動は、一定の周期を刻むという重要な性質が小学校理科でも着目され、科学法則の存在を印象付けるものとして使われているほか、周期が重力加速度と振り子の長さによる簡単な式で与えられることや、一般に物体の運動を議論するときに問題になる空気抵抗の効果が振幅の減衰という形で見極めやすいこともあり、大学初年時の物理実験「ボルダ振り子」において簡単に高精度のデータを得て、実験精度を検討する実習の対象にもなっている。

本論文では、三種類の振り子運動を撮影し、上述したテンプレート・マッチング法を適用して解析した。ひとつめは「ボルダ振り子」の装置と撮影用直流ライト(1.2節にて前述)を組み合わせて、精度よくデータが取得できるよう工夫したもの、二つめはそれと対照的な結果を得るために、同じ装置を一部簡素化しながら振幅を大きな運動にしたもの、三つめは小型の振り子での問題点を探ることを目的に、千葉大学普遍教育が推進している小型でポータブルな実験装置「パーソナル・ディスク・ラボ」(略称PDL)^{[12],[13]}の振り子の装置を使ったものである。

3.1 準備

3.1.1 スケール係数とカメラ傾斜角

いずれの実験においても、300 fps のハイスピード撮

影のビデオ映像に対し、テンプレートマッチング法により物体座標を読み取り、二つの座標の時間微分(近接9点のデータの回帰直線の傾き)から速度を求めて、力学的エネルギー保存の法則 $\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{const.}$ にあては

めた。この法則は、pixel 単位での読み取り座標 (X, Y) において、座標軸の傾きが傾斜角 χ である場合は

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dY}{dt}\right)^2 + 2G(X\sin\chi + Y\cos\chi) = \text{const.}$$

と書ける。ただし、係数 G [pixel/s²] は、画像上と実測上の時間・空間スケールを変換した重力加速度 g [m/s²] である。この変換のときに使われる G/g にあたる係数(単位 [pixel/cm]) を、我々はスケール係数と呼んでいる。力学実験の撮影結果と物理法則を対比するときには、このスケール係数の決定精度が問題になる。なお、一般的に、ビデオの撮影速度に関わる時間スケールの誤差(デジタル信号のクロックの誤差)の割合より、ビデオ画像が十分高い解像度を持たないことによる空間スケールの誤差(解像度や画像のぶれによる位置決定の誤差)の割合が大きい。このため、スケール係数には空間スケールの変換のみを考慮し、その決定精度は物体の位置座標の読み取り精度と考えてよい。

水平方向の振幅(振れ幅の半分)と鉛直方向の振れ幅

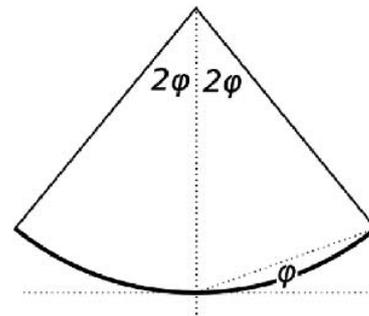


図4 最大振れ角 2ϕ の定義

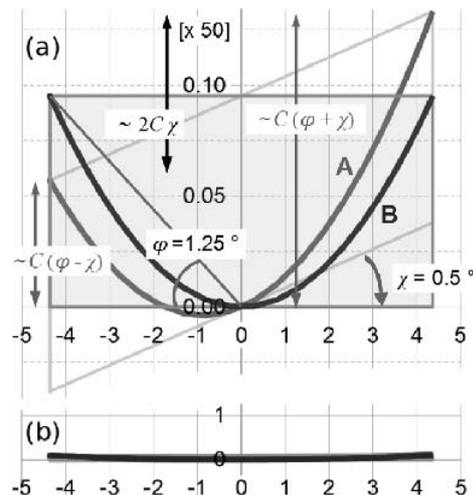


図5 最大振れ角 $\pm 2\phi = \pm 2.5^\circ$ で円弧上を振動する振り子の軌道を、縦軸のみ (a)50倍拡大したものと、(b)1倍のまま描いたもの。Aはカメラの傾斜角 $\chi = 0.5^\circ$ の場合、Bはこれを補正した結果。

の比を $\tan\varphi$ と置くと、 $\tan\varphi = \max\left(\frac{Y}{X}\right)$ であり、振り子の振れ角 θ は、 $-2\varphi \leq \theta \leq 2\varphi$ の範囲を変化する(図4)。実際の測定において、カメラが水平に設置されず $\chi \neq 0$ となる場合、 $\tan\varphi \ll 1$ なら $\chi \neq 0$ に対する補正が必要である。たとえば $\varphi = 1.25^\circ$ 、 $\chi = 0.5^\circ$ のときに鉛直成分を50倍拡大して軌道(見込み角 $2\varphi = 2.5^\circ$ の弧)を表示すると、図5(a)のAのように解析不能なまでに非対称になってしまう。実際の縦・横比では軌道はほぼ直線的(図5(b))であっても、 2χ が $\varphi \pm \chi$ と比べて無視できない程度の場合に、この非対称が顕著となる。ここで例示した 0.5° の傾斜は、一般的な水準器の精度よりは大きいものの、一般的には無視できない条件になると考えられる。

3.1.2 振り子運動の特徴

振り子は円弧上の軌道をとるものとし、座標を $X(t) = R \sin\theta$ 、 $Y(t) = R - R \cos\theta + Y_0$ とおく。これらの式の θ は、振幅が小さい場合に成り立つ角振動数 ω の調和振動近似では、最大振れ角を 2φ として、 $\theta(t) = 2\varphi \cos(\omega t)$ で与えられる。位置ベクトル $(X(t), Y(t))$ および速度ベクトル $(v_x(t), v_y(t))$ の終点を、調和振動に基づいて計算し、最大振れ角を $2\varphi = 3^\circ, 9^\circ, 20^\circ$ としてプロットしたものを図6(a), (b)にそれぞれ示した。ここでは原点の鉛直方向のずれ Y_0 はゼロにとっている。速度ベクトルの終点の描く図形(図6(b))はホドグラムと呼ばれる。軌道上接線方向の速度を $V(t)$ と書くとき、このホドグラムは調和振動近似をとるかどうかとはい関わりなく、 $v_x = V(t) \cos\theta$ 、 $v_y = V(t) \sin\theta$ という「半径 $V(t)$ の円弧($-2\varphi \leq \theta \leq 2\varphi$ の範囲)で、半径が位相とともに(負値にも)変化するもの」(ただし円弧の両端で半径がゼロ)とみなすことも可能である。軌道とホドグラムは $0 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}$ の範囲では表1の

表1 位相 ωt 、振れ角 $\theta = 2\varphi \cos(\omega t)$ の調和近似振り子運動における軌道とホドグラム

位相 ωt	振れ角 θ	軌道	ホドグラム
0	2φ	右端	原点
		左下に向かう	第四象限
$\sim \frac{\pi}{4}$	$\sim \varphi$	振幅の半分程度	$ v_y $ が最大
$\frac{\pi}{2}$	0	原点を左向きに通過	左端を上昇

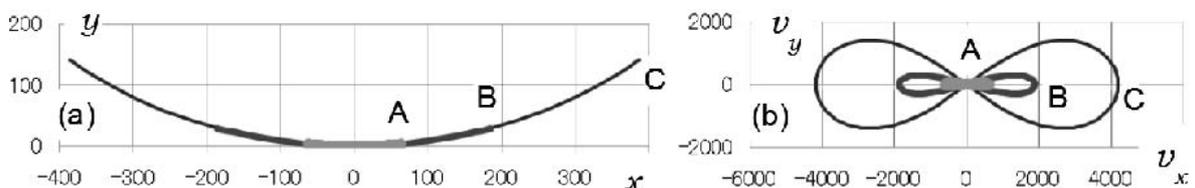


図6 計算による(a)軌道と(b)ホドグラム。振動の最大振れ角 2φ を(A) 3° 、(B) 9° 、(C) 20° に設定した場合。

ような関係がある。

実際の位置座標読み取りの際は原点位置も決定しなければならない。特にY座標の変化量が小さい場合は原点のずれ Y_0 の決定精度が誤差を多く含む。われわれは、調和振動近似をとるかどうかとはい関わりなく成り立つ

$$Y = \frac{1}{2(R+Y_0)}(X^2 + Y^2) + \frac{2R+Y_0}{2(R+Y_0)}Y_0$$

に基づいて $(X^2 + Y^2, Y)$ のデータを直線回帰させながら、この式の切片(あるいは Y_0)がゼロになるようにY座標の原点を決定した。

3.1.3 静止物体の位置読み取り精度

図5(a)のように軌道を表示したとき、誤差の割合は縦軸が大きいと、軌道が水平に近い原点近傍において、軌道のプロットが太くなる。その読み取り精度を検討する基準として、実寸直径2.3 cmの単色円形静止物体を撮影し、同じ方法で読み取った。画像上で物体は直径81 pixelである。なお、ここでは照明は通常の蛍光灯で、従って画像の背景の明るさが周期的に変化していた。フレーム数1,701の撮影データに対して、標準偏差はx座標 ± 0.024 pixel、y座標 ± 0.022 pixelで、正規分布に従う度数分布を得た(図7)。物体の像に濃淡がない単色像のテンプレートマッチング法(輝度は2値)は、実際には物体の周囲に沿った部分でマッチングの決定を行うことになるので、読み取り精度は物体大きさに比例すると考えられる。

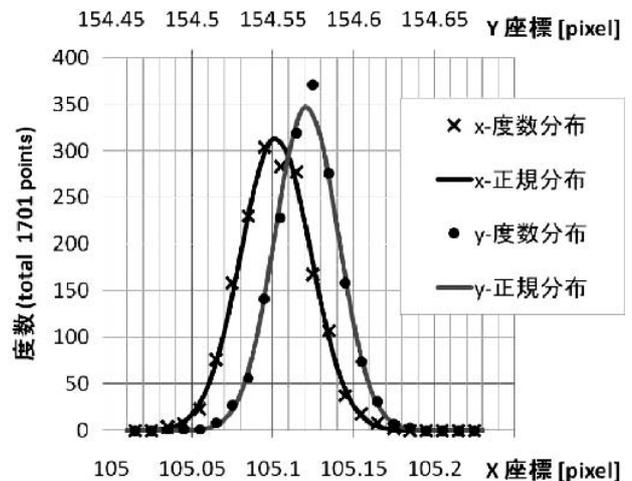


図7 画像上での直径81 pixelの円形静止物体に対する位置読み取りの分布

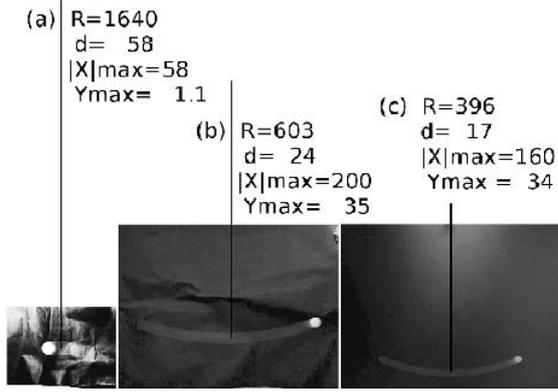


図8 振り子実験による動画を連続静止画に変換し、半周期分を3%で重ねたもの。鉛直の線は解析結果による腕の長さRを示す。dは球の直径、重心は $-|X|_{\max} \leq x \leq |X|_{\max}$, $0 \leq y \leq Y_{\max}$ の範囲を動いている。値はいずれも pixel 単位で、画像はすべて横512×縦384。(a)は図2と同じもので、(b)(c)に比べて半分に縮小している。

3.2 実験結果

以下、3つの実験例を示す。この実験の振り子の実態を図示するために、ソフトウェア Image Magick^[14]の convert 命令を、コマンドプロンプト上で

```
convert [FILE0] [FILE1] -compose dissolve
-set "option:compose:args" 3 -composite
[FILE2]
```

により実行し、FILE0にFILE1を3%で重ね、FILE2として出力した。これに解析結果を加えたものを図8に示す。

3.2.1 理想に近い振り子実験 (ボルダ振り子) (図8(a))

これは物理実験「ボルダ振り子」のセットアップであり、支点としてナイフエッジを用い、おもりは鉄球(質量0.2262 kg)で、直径3.8 cmのものである。ナイフエッジ自体が剛体振り子として振動するときの振動数を振り子全体の振動数とほぼ一致させることで、支点から重心までの直線を完全に保つ手続きを行う。

実際の撮影範囲は図2に示したとおりで、画像全体が512×384 pixelの中に画像上で直径58 pixelのおもりが

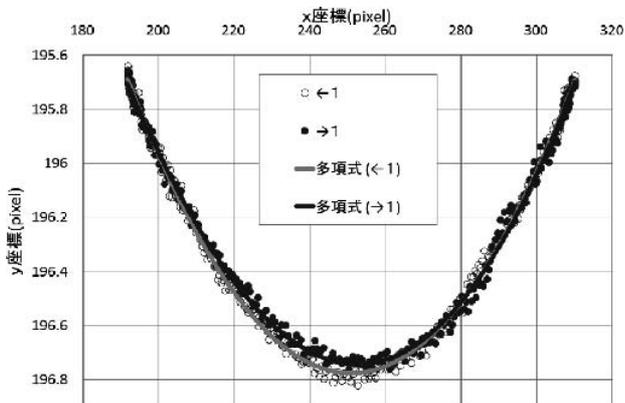


図9 画像上の直径58 pixelの球をおもりとするボルダ振り子の位置読み取り結果

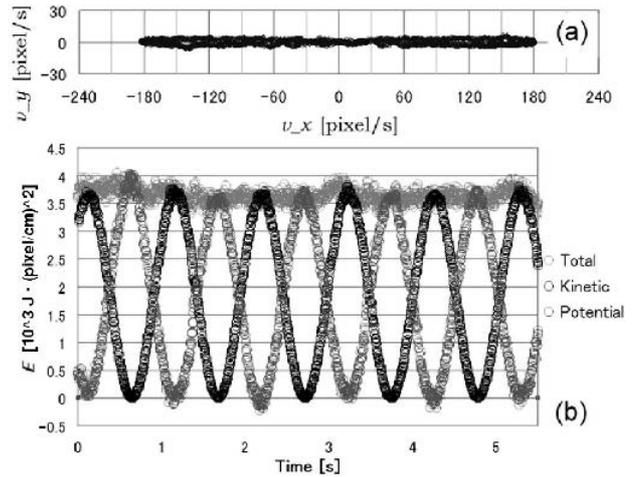


図10 ボルダ振り子の(a)ホドグラムと(b)エネルギー

写っており、この値に基づくスケール係数は15.3 pixel/cmである。物体の中心は軌道半径106.1 cmで左右に最大振れ角 $2\varphi = 2.16^\circ$ の弧を描き、座標範囲が $-58 \leq X \leq 58$ pixel, $0 \leq Y \leq 1.1$ pixelになっている。直流電源のランプを使用し、300 fpsでハイスピード撮影を行った。カメラ傾斜の補正には -0.49° の座標回転が必要であった。参考までに、物体・カメラ間距離は36 cmである。

振動の最下点近傍で見積もった読み取り誤差はばらつきから ± 0.05 pixel程度であった。この誤差は、静止画で分析して得られた読み取りの誤差の2倍程度である。注意深くデータを見ると、Y座標の読み取りには、図9に示すように、振り子が左向きに進行する時(←のデータおよび多項式近似曲線)と右向きの時(→)とで系統的なずれが0.03 pixelほど見られた。原因として、振り子の振動面が膨らみ、鉛直面から外れて楕円を描くような軌道になり、撮影の角度やライティングの違いが重なってそのように記録されたのではないかと考えている。左右方向への運動を別々に切り離して考えると、ばらつきは ± 0.03 pixel程度であり、静止画で分析された値とほぼ一致する。つまり、運動している状態でも静止画なみの読み取り精度が出ており、その誤差に、左右の向きの振動でずれが見られた効果が重なったと考えられる。また、先述した原点を精度よく算出するためのフィッティングから、ひもの長さとおもり半径の和に相当する距離 $R = 1640$ pixelが得られた。これを元にスケール係数を求めると15.5 pixel/cmであり、物体半径の比較による値15.3 pixel/cmより1.3%大きかった。二つの評価によるスケール係数はほぼ一致している。この実験では物体の画像上での大きさ58 pixelに対して ± 1 pixel程度は誤差があると考えられる。

速度は連続する9個の時刻における座標を最小二乗法で直線近似し、算出した。Y座標の移動量が微少であるため、速度のY成分には誤差が大きい。速度の最大値は、X成分が180 pixel/秒に対し、Y成分は約4 pixel/秒であった。ホドグラムを図10(a)に示す。エネルギーの時間変動を求めてみると図10(b)のようになった。位置エネルギーはY座標に直接比例していて、その読み取りのばらつきがもとなる10%程度の誤差変動が重なって

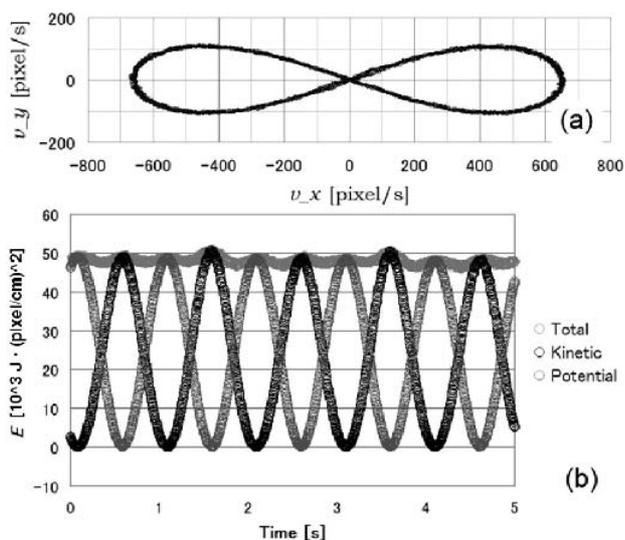


図11 振幅を大きくした対照用振り子での(a)ホドグラムと(b)エネルギー

いるが、これを考慮すれば、力学的エネルギーの保存を受けられることができるようなデータであるといえる。

3.2.2 対照的な振り子実験（振り子蛍光灯）（図8(b)）

前節と同じ振り子を蛍光灯の照明下で大きな振れ角（最大 $\pm 19.6^\circ$ ）で撮影した。このとき、支点がボルダのセットアップのナイフエッジでは横にずれてしまうので、ハンドクランプによりひもを固定した。支点周りのひもが変形することによるエネルギー減少がありうる状況である。質量 0.2262 kg、直径 3.8 cm の鉄球は画像上の直径が 24 pixel で、これらから求めたスケール係数は 6.32 pixel/cm である。重心の軌道の半径は、ひもの長さ と 球半径の和から $R = 99.5$ cm、フィッティングによると $R = 603$ pixel で、これら求めたスケール係数 6.06 pixel/cm は、鉄球直径による値の -4.2% である。カメラ傾斜の補正 χ は -0.65° だけ必要であった。

座標の変化量が大きくなったため、読み取りは相対精度が高くなった。鉛直方向の Y 座標の移動距離は約 35 pixel で、 ± 0.1 pixel 程度のばらつきがあるものの、ホドグラム（図11(a)）もなめらかな曲線として得られた。エネルギーについては、Y 座標の読み取りがしやすく、位置エネルギーの精度が高くなる反面、運動エネルギーの決定精度が問題になることがわかった（図11(b)）。特に振動がひとつの円直面からはずれて楕円を描くためと思われる右向き・左向きの速度の差異が見えた。また、エネルギーの総和のばらつきも極めて小さくなったが、位置エネルギーと運動エネルギーが同量になる付近でエネルギーの総和が低くなるという傾向が見られた。これはスケール係数の誤差では説明できない。遠近法によるカメラの視野の変形や振幅が大きいため調和性からの外れも視野に入れて、現在検討中である。

3.3.3 小型の振り子実験（振り子PDL）（図8(c)）

PDLの振り子実験では卓上 30 cm ほどの位置に支点をもつ質量 0.0039 kg の真鍮製、直径 0.955 cm 球をおもりとして使う。この振り子はひもの長さが 25 cm 程

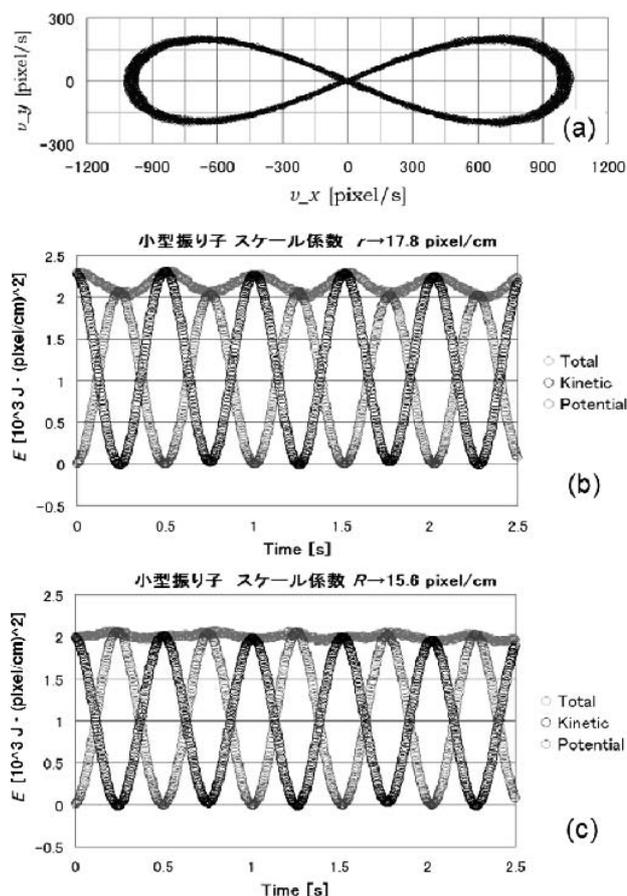


図12 小型の振り子での(a)ホドグラムと(b)(c)エネルギー。ただし、スケール係数は(b)では球直径による 17.8 pixel/cm、(c)ではフィッティングによる 15.5 pixel/cmを適用した。

度と短く、軌道が膨らんで振動がひとつの鉛直平面から外れていないかどうかの確認は、目視ではかなり厳しい。

この振り子を蛍光灯の照明下で、最大振れ角約 23.95° で振り、撮影した。カメラ距離 31 cm で撮影した画像上の直径は 17 pixel で、これによるスケール係数は 17.8 pixel/cm である。フィッティングによる軌道の半径は 396 pixel で、これがひもの長さ と 球半径から求まる 25.5 cm と対応することからスケール係数を決めなおすと、14.5% 小さい 15.5 pixel/cm になる。座標軸の傾斜は 0.04° であった。

X 座標は ± 160 pixel、Y 座標は 0 ~ 33.8 pixel の範囲を動き、読み取った座標はなめらかに変化するものの、軌道が原点付近でわずかにずれて見えた。鉛直方向に対して、ずれの幅は 0.08 pixel 程度であった。ボルダ振り子の実験と同様に、わずかに軌道が膨らみ、この付近のカメラの撮影角度が水平でないという可能性がある。これに対応してホドグラム（図12(a)）の右端・左端も、軌道の原点に対応して線が太くなっている。

球直径だけから算出したスケール係数 17.8 pixel/cm を用いたエネルギー評価（図12(b)）では、運動エネルギーが位置エネルギーにくらべ、極端に低い。一方、フィッティングによるスケール係数 15.5 pixel/cm を用いた場合（図12(c)）はこれらのバランスがよい。したがって、スケール係数を決める際には、球直径の 17 pixel のよう

な小さな長さを元にするよりも、たとえ画像として取まっていなくても、軌道半径の 396 pixel のような大きな長さを元にするべきであることがよくわかる。

第 4 章 まとめと課題

単色円形静止物体の読み取りから、80 pixel ほどの直径（外周に沿って約 250 pixel）があれば画像の分解能としての 1 pixel よりもはるかに小さい精度の 1/40 pixel 程度（この場合は外形の 0.03%）で位置決定が可能である。これは円形の直径が 2.3 cm であれば 6.5 μ m に相当し、驚くほど精度がよい。現在採用している手法では、入力画像・テンプレート画像の物体の輪郭部分での輝度差がマッチングでの輝度差二乗和の計算時にゼロでない値になるので、画像上で物体が 1/40 pixel 程度ずれたとき、輪郭に沿う 250 pixel かその数倍の画素がどこかで輝度の変化を示し、ずれが検出されることになるのだと考えられる。また、蛍光灯の照明の下でちらつきがあるなど、背景に多少の乱れがあっても大きな問題にはならなかった。振り子運動の鉛直座標のようなわずかな動きが十分な精度で容易に取得できることがわかった。

また、このように精度よく物体位置が取得されると、実験の際に肉眼で注意深く見てもわからないような、振動軌道の膨らみのようなわずかなずれが明確になってしまう。これが問題になる精度で議論を進めるためには、物体運動そのものにも十分な精度での条件設定が必要となる。今回の振り子の振動軌道の膨らみに関しては、理想的な撮影角度なら数値上ではもっと抑えることも可能なのである。撮影時点での注意点を確立し、また、カメラとの遠近による画像変形の効果を調べる必要がある。また一方、膨らみそのものを抑えるために、2本のひもでV字型につった振り子でも撮影し、より理想的なデータでの解析を試みたい。

現段階のプログラムでは、毎回のマッチング時にテンプレート更新をしているが、最初に作成したテンプレートが突然選ばれる場合もしばしば見られた。照度の変化、移動速度が大きいときの輪郭のぼけなどもそうなった原因だと思われるが、仮にテンプレートを徐々に更新し続けることが可能であれば、物体の傾きにも追従できる可能性がある。現段階では球形の物体を撮影対象としているが、一般の外形で物体が少しずつ回転する場合でも追従し、位置とともに回転角を取得するようなプログラミングも可能であろうと思われる。もちろん、単純にテンプレートを回転しながらマッチングを取りなおすことも出来るが、プログラムの処理に要する時間が問題になる。環境にもよると思われるが、われわれが使用したワークステーションでは我々の方法で 3,000 フレームの処理時間が 10 分弱かかる。メインの処理の前後にある AVI ファイルへの変換や取得結果の確認用のビデオ出力まで考慮すると、解析時間は慣れた場合でも 15 分~20 分程

度は必要である。さらに読み取り精度が上がる可能性として、撮影した映像のコントラストを変えたり、物体の輪郭を強調したりする処理があり得るが、時間はもっと長くかかる。結局のところは、処理時間と結果に精度などのバランスを最適化する必要がある。

また、プログラムを実行するときのノウハウのなかに、明確化できていない問題が残っている。最も大きな問題は閾値の上限・下限の指定はどうすればよいかというもので、最初に決めた値が全フレームでの作業に使われるため十分な注意が必要である。現段階では試行錯誤して最適な設定を探しながら行っている。他には、テンプレートが無駄が大きくなると、読み取り座標のばらつきも増大することが分かっている。こちらは、探索物体以外の部分をなるべく含めないように切り取ることや、初期のテンプレート作成に使う入力画像に適切なものを選ぶことで、無理なく抑えることができる。このような一般者向けガイドラインを加えながら、今後プログラムを手直しし、広く使っていただけるような形で公開^[15]したい。

参考文献

- [1] http://dc.casio.jp/products/ex_f1/spec.html
- [2] <http://www.solidphysics.co.jp/direct.htm>
- [3] http://dc.casio.jp/products/ex_f1/enhance.html
- [4] <http://ffmpeg.org/>
- [5] http://winff.org/html_new/
- [6] 加藤徹也, 本田敦也「低解像度高速カメラを用いた身近な運動の教材化の課題」日本物理学会講演 2008年第63回年回(近畿大学), 2008. 3. 24.
- [7] 本田敦也 卒業論文「身近な運動物体における公式適用限界の研究」千葉大学教育学部, 2008. 3.
- [8] http://www2.kanazawa-it.ac.jp/robocup/tdp_file/2P1-J17.pdf
- [9] <http://opencv.jp/>
- [10] 永田雅人「実践OpenCV 映像処理&解析」カットシステム, 2009.
- [11] 奈良先端科学技術大学院大学「OpenCV プログラミングブック」毎日コミュニケーションズ, 2007.
- [12] スー・カリヤン「物理実験机上組立式装置パーソナルデスクラボPDLの開発」千葉大学大学院教育学研究科修士論文, 2008. 3. <http://mitizane.ll.chiba-u.jp/metadb/up/irwg10/R-KR-K-03.pdf>
- [13] 高谷(中山)博史, 渡部裕一「パーソナルデスクラボを使用した文科系学生のための物理実験教育」大学の物理教育 第15巻(2009) pp. 82-86.
- [14] <http://www.imagemagick.org/script/>
- [15] <http://www.e.chiba-u.jp/~tkato/BorderlessPhysicsEducation/index.html> に掲載予定。