

簡易マルチモーショ画像システムの開発と力学実験への応用

三 伸 啓*・宮 川 貴 裕**

(2010年10月26日 受理)

Development of a Simple Multi-Motion Image System and its Application to Dynamics Experiments

MINAKA Akira, MIYAKAWA Takahiro

要約

運動物体を連続撮影し、その複数の画像から運動物体を取り出し、ストロボ写真のように表示したり、各画像から運動物体を含む領域を切り取り、それらを時間の順に並べて表示したりすることができるソフトウェアを開発した。小型コンピュータに接続したUSBカメラを用いるシステムであるので、一般的なUSBカメラとここで開発したソフトウェアがあれば、簡便に運動物体の移動画像（マルチモーショ画像）が作成できる。本稿では、開発したソフトウェアの概要と、本システムを力学の教育用実験に利用した例を紹介する。

キーワード：運動物体，画像処理，ストロボ，マルチモーショ，力学実験

1. はじめに

運動物体を含む力学実験の分析には、ストロボ写真やビデオ映像が使われてきた [文献1]。最近では、ビデオ映像からストロボ写真のような画像を取り出すソフトウェアも使われるようになっており、力学の実験などにも利用されはじめた [文献2, 3]。デジタルカメラの中には、静止画を連写した後、ストロボ写真のような画像を自動的に作成する機能を持った製品も登場している [文献4]。また、市販の画像編集ソフトウェアの中には、連続写真からマルチモーショ画像を作れるものもある [文献5]。しかしながら、いずれも、学校現場にとってはやや高価であったり、扱える物体に制限があったり、表示できる物体の数や時間間隔などに制約があったりするという問題点がある。

* 鹿児島大学教育学部 教授

** 鹿児島大学教育学研究科 大学院生

ここでは、インターネットのビデオ電話などに使用されている一般的な USB カメラを使用して、運動物体の時間変化を 1 枚の画像に記録するシステムを開発した。これにより、特別な費用をかけずに、教室内で物体の運動を演示したり、力学実験の半定量的な分析を行ったりすることが可能になると思われる。

一定時間間隔ごとの物体の映像を 1 枚の画像にまとめたものは、最近マルチモーショ画像と呼ばれることが多い。ここでは、図 1 に示すような 2 種類のマルチモーショ画像を扱うので、それぞれにストロボ型、スライス型という短い名前を付けることにした。

(a) ストロボ型

ストロボ写真と同様に、不動の背景の中に、異なる時刻の運動物体を複数表示するものである。

(b) スライス型

物体の運動が鉛直方向または水平方向の場合に、物体の軌跡が納まる帯状の部分だけを切り出し、それを水平方向または鉛直方向に並べて表示するものである。ストロボ型では適切に表示できないものでも、スライス型では表示できる場合がある。

本システムでは、いずれの型においても、ほとんど自動的に画像が作成されるが、利用者による詳細設定もできるようにしてある。本稿では、両方の型を使用した、いくつかの実験例も紹介する。

次の、第 2 章では開発したシステムの概要を述べ、そこで使用した画像処理に関する技術的な事項は付録にまとめている。第 3 章では、ストロボ型とスライス型による実験例を示し、最後の章では、本システムの有効性と可能性、使用上の注意事項などをまとめる。

2. システムの概要

(1) システムの要件

ハードウェアは、一般的なパーソナルコンピュータと USB カメラが必要である。コンピュータはノート型のものが実験には便利であるが、USB カメラが使えればどのような型のものでも利用できる。メモリの容量が少ないとトラブルが起こる可能性があるが、512 MB 以上あれば問題は無いと思われる。USB カメラは、旧式のものでも使用可能であり、特に制約はない。現在、ビデオ電話などに使われている一般的なもので十分である。

ソフトウェアは、Visual Studio 2008 (C#.NET) で開発したので、Microsoft .NET Framework 2.0

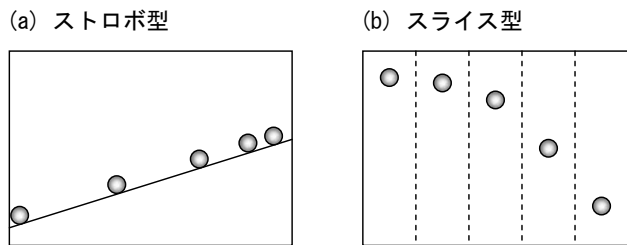


図 1 本システムで作成できるマルチモーショ画像

以上の環境が必要になる。また、USBカメラからの画像の取得にはDirect Xに含まれるDirectShowを利用しているため、Direct X 8.1以降も必要になる。したがって、OSも事実上Microsoft Windows XP以降に限られる。

なお、DirectShowを利用する際には、DirectShow.NET [文献6]を利用させてもらったが、これは本システムのソフトウェアに組み込まれている。

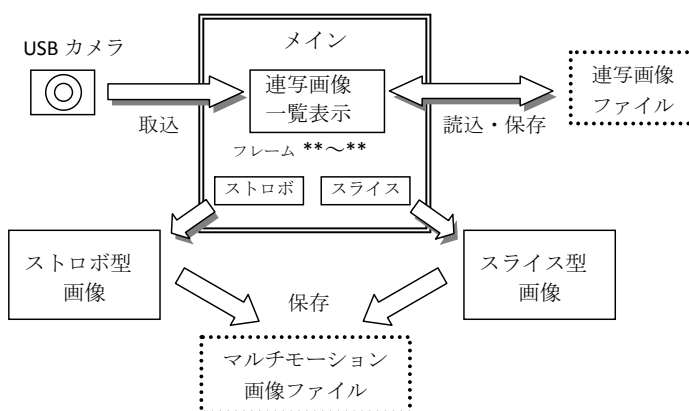


図2 本システムのソフトウェアの基本機能

(2) ソフトウェアの概要

学校現場で簡便に利用できること、はじめて使用する人にも操作法がわかりやすいことを最も重要な点と考えて、ソフトウェアの開発を行った。その概要を図2に示してある。以下では、この各部分について簡単に説明する。

(a) 起動直後

本ソフトウェアを起動すると、メイン画面が表示される。ここには、通常、一連の連写画像が表示されるようになっているが、起動直後には連写画像が指定されていない。

利用者は、USBカメラからの取込か、すでに保存してある連写画像の読込かのいずれかを選択する。

(b) USBカメラからの取込

カメラからの取り込みを選択したとき、USBカメラ（一般にキャプチャーデバイス）が複数ある場合には、その一覧が表示されるので、その中から1つを選ぶ。カメラが1つしか接続されていない場合は、自動的にそれが選択され、カメラが全く接続されていない場合はエラーメッセージが表示される。

使用するカメラが決まると、次は、画像のサイズと1秒間のフレーム数（fps）を選択する。それぞれの最大値はカメラにより異なるが、640×480画素、15fpsまで使用できるものが一般的である。この段階で、カメラのプレビュー画面が表示される。

最後に、撮影時間（sec）を選択し、運動物体を用意して、撮影ボタンをクリックする。すると、メイン画面に戻り、連写画像が一覧表示されるとともに、特定の1画面が原寸表示される。

(c) 連写画像の保存と読込

メイン画面に表示されている連写画像は保存することができる。一度撮影したものを保存しておけば、後にそれを読み込むことにより、マルチモーション画像を再作成することができる。

(d) ストロボ型画像の作成

まず、一覧表示された画像の中のどのフレームからどのフレームまでを使用するかを設定する。これは、次のスライス型と共通の設定になる。既定値は、表示されている全フレームになっている。

ストロボ型画像を作成するには、「自動作成」または「背景指定」のいずれかを選ぶ。

「自動作成」ボタンをクリックすると、完成したストロボ型画像が別ウィンドウで表示される。

運動物体が写っていない背景のみのフレームがある場合は、「背景指定」ボタンをクリックし、そのフレーム番号を設定する。すると、完成した画像が別ウィンドウで表示される。

いずれの場合も、完成した画像を保存することができる。

なお、ストロボ型画像の作り方は、詳細設定で条件を選択・指定することもできるが、通常は既定の設定値のままでも問題ないだろう。ここで行われる画像処理の概略は、付録(1)に示してある。

(e) スライス型画像の作成

スライス型でも開始フレームと終了フレームの設定が有効になる。

物体が自由落下のように鉛直運動をしている場合は、運動物体を含む領域が縦に細長くなるので、各フレームから横幅を狭くした共通の領域を切り出して、それらを左から右へ順に並べた画像を作成する。物体の運動が水平方向である場合は、高さを制限した領域を切り出して、それを上から下へ並べることになる。

スライス型画像を作成するには、「自動作成」または「領域指定」のいずれかを選ぶ。

「自動作成」ボタンをクリックすると、物体の運動が水平方向か鉛直方向かを自動的に認識し、また領域の幅も自動的に選ばれる。並べ方は、水平運動なら上から、鉛直運動なら左からという向きになる。スライス型自動作成モードで必要となる画像処理の概略は、付録(2)に示してある。

領域の幅を自分で自由に設定したい場合は、「領域指定」ボタンをクリックする。領域の指定画面が現れ最初のフレームが表示されるので、まず横か縦をラジオボタンで選択する。この画面をドラッグ・ドロップして、領域の幅を指定する。「横」のときは、水平運動に対応するので、運動物体が含まれる上下方向の幅を指定し、「縦」のときは、左右方向の幅を指定することになる。

いずれの場合も、完成したスライス型の画像は別ウィンドウで表示され、これを保存することができる。

3. マルチモーション画像を利用した力学実験の例

ここでは、いくつかの運動物体を本システムで撮影し、教育利用の可能性を議論する。

USB カメラとしては、手元にある古いものから新しいものまで数種類のものを試用したが、画像サイズや1秒間のフレーム数 (fps) などの上限値には差があるものの、いずれも十分実用になり、画質にも大きな差は見られなかった。以下では、Logicool Webcam Pro9000 (最大フレームレート 30 fps) を使用した画像を示す。

また、使用したノート型コンピュータは、Dell Inspiron 2200 (CPU=Celeron 1.3GHz, メモリ=504MB) であり、OS は Windows XP SP3 であった。

(1) 自由落下

自由落下する物体はかなり速いため、カメラで落下物体を明瞭に写すには、シャッター速度を速く (開放時間を短く) する必要がある。しかし、通常の USB カメラではシャッター速度は自動的に決まるので、シャッター速度を速くするには明るい環境で撮影する必要がある。

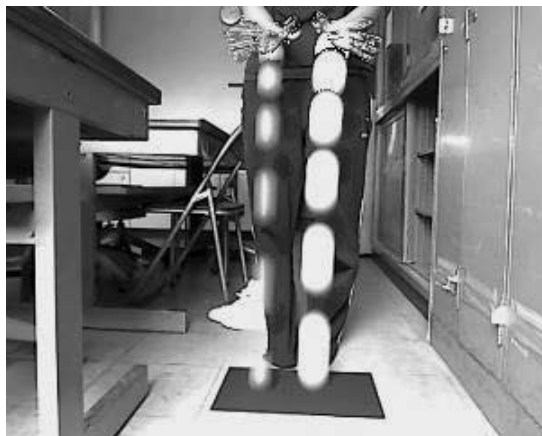


図3 物体の自由落下 (15 fps)
曇った日の室内で照明なし。

曇りの日の室内で、特別な照明なしに撮影した映像を図3に示している。これは、ゴム球と発泡スチロール球を同時に落とした場合のストロボ型画像である。物体は流れた形で写るが、いずれも加速度運動をしていることや、両者の加速度に違いがあることが見て取れる。授業の導入部などの演示実験としては十分利用できると思われる。



図4 ボールの鉛直落下 (30 fps)
(a) ストロボ型 (b) スライス型

以下では、照明も用いて、物体が鮮明に写るようにした画像を示す。

図4は、ボールの鉛直落下を (a) ストロボ型と (b) スライス型で示したものである。

ボールが床でバウンドする場合、ストロボ型は着地までの映像に制限しないと見にくくなる。一方、スライス型は、何度かバウンドする様子も記録できる。

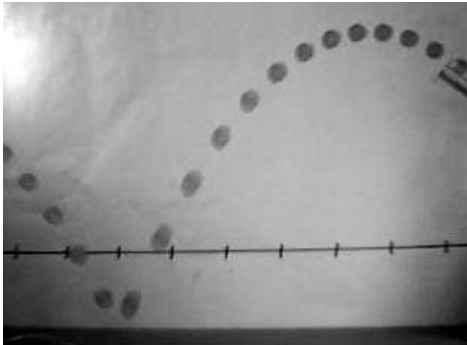


図5 ボールの放物運動 (30 fps)
斜面を使い斜め上に投射したもの。

この実験の場合、高さ 70 cm からの落下であったので、空気抵抗を無視した場合の落下時間は 0.38 秒となる。一方、30 fps のスライス画像では、手を離れた瞬間が正確にはわからないが、落下までに 11 ないし 12 フレーム、すなわち、0.363 ないし 0.396 秒となっている。

分析的な実験を行う際には、高速な運動であるため 1 割程度の誤差は避けられないことを覚えておかなければならない。

図 5 は、放物運動をストロボ型で示したもので、図 4 のスライス型と同様な画像になる。

(2) 振り子の運動

図 6 (a) は、長さ 1 m の振り子の運動を 10fps で撮影し、半周期の運動をストロボ型にしたものである。1 m の振り子の半周期は理論では約 1 秒であるが、図に写っている球体の数が 10 個であることから実際に 1 秒間であることが確認できる。

振幅が小さければ、おもりはほぼ水平な運動になるので、スライス型の表示も可能になる(図 6 (b))。この図から、おもりの位置は、時間の正弦関数で近似できることが読み取れる。

ストロボ型では半周期の運動しか表示できないが、スライス型は数周期の運動が記録できる。これは、スライス型の大きな利点である。

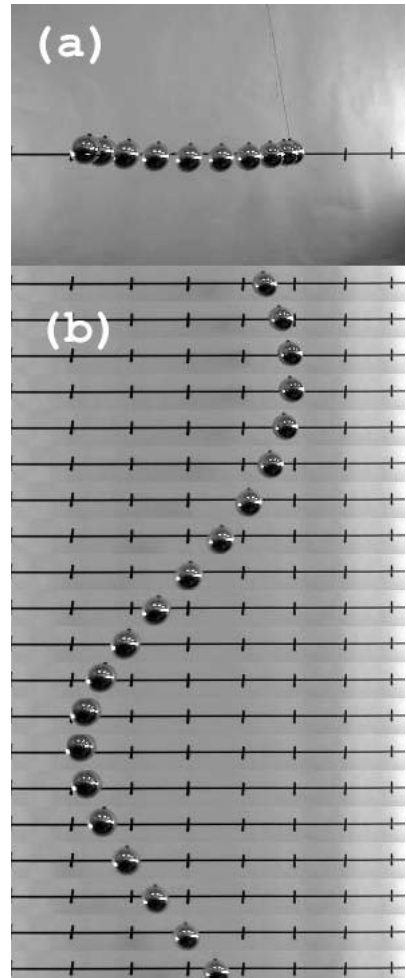


図6 振り子の運動 (10 fps)
(a) ストロボ型 (b) スライス型

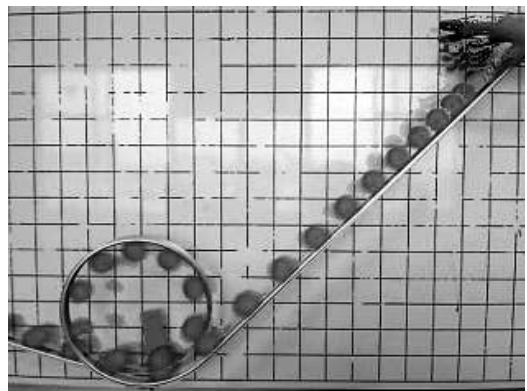


図7 斜面を転がるボール (30fps)

(3) 斜面

図7は、宙返り (loop-the-loop) を含む斜面上のボールの運動を示したものである。このような運動の表示は、ストロボ型でしか扱えない。これは 30fps の画像だが、高さによる速さの変化が見て取れる。定量的な分析も可能だろうが、力学的エネルギー保存則の学習の導入やまとめの際の演示実験として利用すれば有効であろう。

(4) 力学台車

図8は、実験台上の台車の運動のスライス型画像である。台車には糸が付けられており、その糸は実験台の端の滑車を通しておもりに引かれている。おもりが床に着くときの台車の位置にはペンを立てて目印にしてある。等加速度運動から等速運動への変化が直感的にわかる画像になっている。

(5) ばね振子

図9は、ばねの下端に重りを2個下げて振動させた場合のスライス型画像である。

つりあいの状態にあるときの下のおもりの位置にマークを付けてある。変位は、ほぼ正弦関数の時間変化をすることがわかる。

(6) ばねのみの振動

図10は、鉛直にしたばねの上端を固定し、下端を自由端にして振動させた場合のスライス型画像である。

使用したばねは、縦波観察用のもので、自然長のときにはほとんど隙間が無いものである。最初は自然長になるよう縮めておき、下端の手を

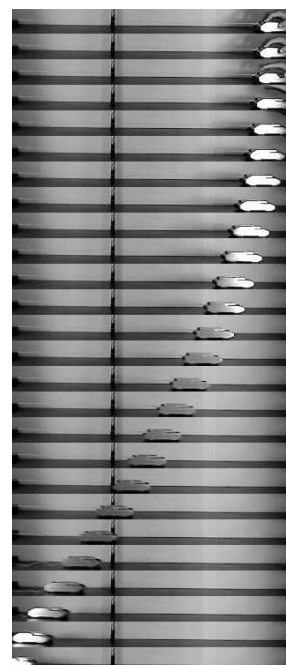


図8 力学台車 (20 fps)
力が0となる位置に目印を付けた。

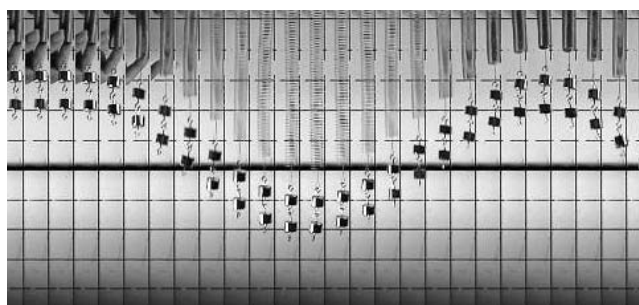


図9 ばね振子 (30 fps)
つり合いの位置に目印を付けた。

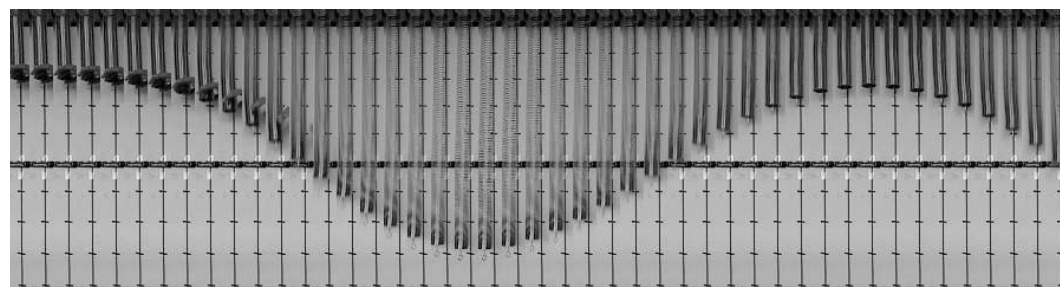


図10 ばねの自重による振動 (30 fps)
つり合いの位置に目印を付けた。

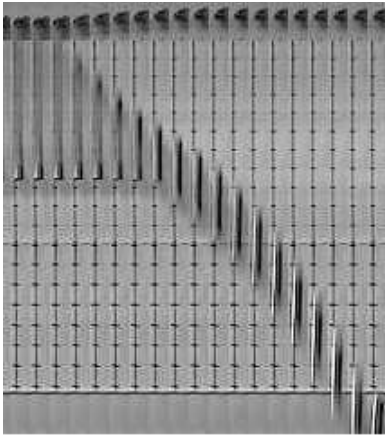


図11 ばねの自由落下 (30fps)
ほぼ理論通りの形が観察できる。

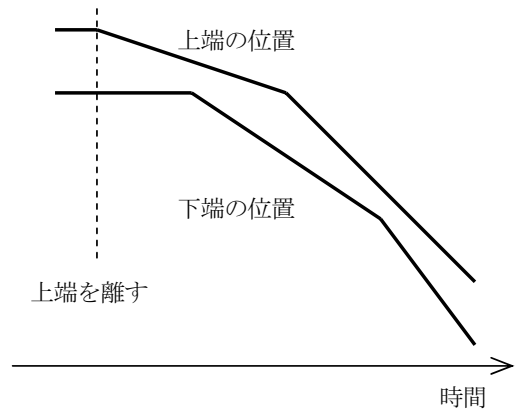


図12 理論によるばねの上端、下端の位置

離して振動させる。最初は、ばねの下部はばねから力を受けないので自由落下する。このとき、ばねは上部から順に伸びていくが、その様子も映像からわかる。

ばねが自重により伸びて、つりあったときの下端の位置にマークを付けてある。理論では、下端の位置は、つりあいの位置の上下に、それぞれ上に凸、下に凸の放物線を描くことになる。

(7) ばねの自由落下

図11は、ばねの上端を持ち、ばねが自重で伸び、つりあって静止している状態で、上端を離した場合のスライス型画像である。最初、ばねの下部は重力とばねの張力がつりあっているので静止したままになり、ばねは上部から縮んでくる。

この運動は波動方程式を解けば決定でき、その結果は図12のように、ばねの上端、下端ともに波動が1往復する間は等速運動をする。下端が落ち始める時の速度は、上端の速度の2倍になり、次に上端の速度が変わるときには、最初の速度の3倍になるというように、上端、下端の速度が交互に変わっていく。一方で、ばね全体の重心は等加速度運動になっているという興味深い運動になる。ただし、この理論は、ばねが自然長からさらに縮むことができることを前提にしている。

実験の写真でも、ほぼ理論と同じような動きがみられるが、ここで使用したばねは自然長より縮むことができない。そのため、ばねが縮んできたときには、理論とのずれも見る事ができる。

4. おわりに

本稿では、一般に普及しているUSBカメラを使って、ストロボ型とスライス型という2種類のマルチモーション画像を簡便に作成できるシステムを開発し、力学の実験への応用例をいくつか示した。その結果、非常に簡便に教育利用できる画像が作成できることが確認できた。

撮影上の注意点としては、できるだけ明るい環境で撮影することが挙げられる。鮮明な画像を撮影するには、シャッター速度を速く（開放時間を短く）する必要があるが、一般の USB カメラでは、シャッター速度は明るさで自動的に決まるからである。

また、画面の中に、スタート位置や力が変わる位置などがわかるように目印を写し込んでおくことと便利である。物体を手で放って運動を開始する場合には、できるだけ瞬時に開放し、その後手が動かないようにするなど、手の動かし方にも配慮すべきである。

当初は、ストロボ型の画像を中心に考えていたが、使用してみると、スライス型の画像の有効性を感じる場合が多かった。スライス型の画像は、ビデオフィードバックを利用する方法 [文献 7] でも作成できるが、今回開発したシステムを利用する方がはるかに簡便で、利用できる場面も多い。

このシステムは学校現場でもすぐに活用できるものと思われるので、ソフトウェアは公開する予定である。

参考文献

- [1] ビデオカメラの映像をコマ送りしながら物体の位置をクリックしていけば、運動の解析が行える Lenox Softworks 社の VideoPoint などが利用された。
- [2] 例えば、インク (INC) 社の FormFinder は、スポーツにおける運動フォームを分析するためのソフトウェアであるが、他の用途にも利用できるだろう。
- [3] USB カメラの動画から運動物体を抽出して表示するソフトウェアとして、「運動リアルタイムアナライザー」がある。(平成 21 年東レ理科教育賞受賞作、末谷健志「簡明なプログラムによる便利な高機能運動解析システム」) これは、運動物体の位置まで自動的に計測するシステムになっている。ただし、運動物体を色により識別しているので、利用範囲には制限がある。
- [4] CASIO のハイスピードデジタルカメラ (EXILIM EX-FC100 など) には、「マルチモーショ」撮影モードがある。画像は美しいが、5 フレームからの抽出画像に制限されている。
- [5] 例えば、COREL 社の PhotoImpact のように、デジタルカメラの連写画像から通行人など動いているものを除去する機能を持った画像処理ソフトもある。この機能を使えば、逆に、動いている物体だけを取り出して表示することもできる。
- [6] DirectShow.NET は、<http://www.codeproject.com/KB/directx/directshownet.aspx> から入手できる。また、このサイトには関連するサンプルコードが登録されている。
- [7] 三仲 啓「ビデオフィードバックを利用した力学演示実験」、鹿児島大学教育学部研究紀要、教育科学編、Vol.61, pp.23-33 (2010)

付録 画像処理の方法

(1) ストロボ型の画像処理

ストロボ型の画像を作るには、運動物体だけを切り出すためのマスクが必要になる。

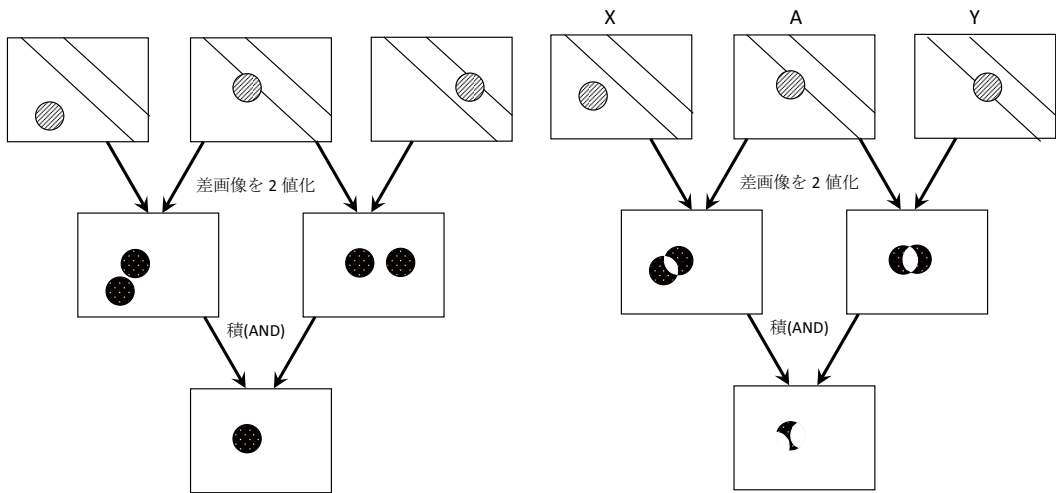
運動物体または背景が単一色で他の部分と区別できる場合は、1 枚の静止画像からでも色によりマスクを作ることができる。しかし、実用上は、単一色の背景を用意するのは面倒であり、運動物体を一色のものに限ると使用できる場合が大きく制限される。

次に簡単にマスクを作る方法としては、2枚の静止画の差画像を用いる方法が考えられる。

一方が運動物体の写っていない背景のみの画像であれば、差画像を2値化すれば、それがそのまま運動物体のマスクとして利用できる。この方法は、「背景指定」モードで使われている。

背景のみの画像が無い場合は、図A-1のように3枚の画像から1つのマスクを作ることができる。しかし、マスクを作成するための3枚の画像において、運動物体に重なりがある場合はうまくマスクが作れないことがある(図A-2)。運動物体の各部は同じような色であることが多いが、そのために重なった部分の差画像をとったときに、重なりのある部分が物体と認識されないことが原因である。

隣り合った3フレームからマスクを作ると、次のマスクを作る際に現在の差画像が再利用できるので効率がよくなるが、上記の問題が発生しやすい。そこで、マスク作成に使用する3フレームは、任意のフレーム数だけ離して選べるようにした。既定値では、全フレーム数の約1/3のフレーム数だけ間を開けるようにしている。(最終フレームの次は最初のフレームであるというように、フレームは循環的に扱う。)



図A-1 運動物体のマスクの作成
3枚の静止画像から物体のマスクが作れる。

図A-2 運動物体のマスクの作成(失敗例)
3つの画面で運動物体が重なっていると、適切なマスクが作れない場合がある。

(2) スライス型の画像処理

スライス型の自動作成モードでは、運動物体の軌跡を含む領域を自動的に決定する必要がある。

このために、まず図A-3のように、運動物体の軌跡を2値化画像にし、その縦方向、横方向のヒストグラムを作る。

次に、画像の縦、横のサイズと縦方向、横方向のヒストグラムの最大値を比較して、物体の運

動が鉛直方向か水平方向かを定める。具体的には, 例えば,

$$(\text{横方向ヒストグラム of 最大値}) / (\text{画像の幅}) > 0.4$$

$$\text{かつ } (\text{縦方向ヒストグラム of 最大値}) / (\text{画像の高さ}) < 0.4$$

であれば, 水平方向の運動であると判定すればよい。

運動方向が決まれば, ヒストグラムの最大値の 1/2 を超える位置 u_1 と, その後, 最大値の 1/2 より小さくなる位置 u_2 を求める。($u_2 - u_1$ が小さすぎる場合は次を探す。)

最後に, 切り取る領域は, 中心位置を $(u_1 + u_2) / 2$ とし, 幅を半値幅 $u_2 - u_1$ の数割増しとして決定する。

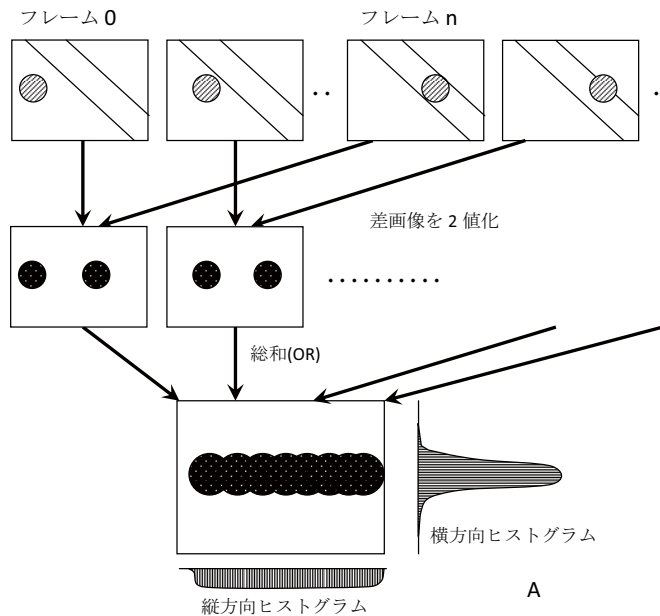


図 A-3 運動物体を含む領域の決定

2つのフレームの差画像を2値化したものの総和 (OR) をとり, その縦方向と横方向のヒストグラムを作る。