

## 幾何光学実験における実寸シミュレーション投影システムの利用

三 仲 啓〔鹿児島大学教育学部(理科教育)〕・増 田 覚〔鹿児島大学大学院教育学研究科〕

### Usage of the Real-Size Projection System for Computer-Simulation in the Experiment of Geometrical Optics

MINAKA Akira・MASUDA Satoru

キーワード：演示実験、液晶プロジェクタ、実寸投影、レンズと鏡、視差

#### 1. はじめに

物理学の学習には、実体に対するイメージが不可欠であるが、そのイメージは時間的・空間的な広がりをもったものが多く、図だけでは表現しきれないことも多い。そこで、授業の中でも実験を行ったり、ビデオ映像やコンピュータシミュレーションを利用したりする必要性が生じる。

さて、この実験やそのビデオ映像、コンピュータシミュレーションにもそれぞれ長所と短所がある。例えば、実験やビデオでは、力学において本質的な力や加速度は直接目には見えないが、シミュレーションでは容易に表示することができる。また、シミュレーションでは様々な条件に対する結果を即座に表示することができる。しかしながら、シミュレーションは、まず学習者が実体の挙動をある程度把握していなければ、無意味なものになってしまう。

筆者らは実験とシミュレーションの両方の長所を持つものとして、実物による実験に、液晶プロジェクタにより実寸大のシミュレーションを重ね合わせて表示するシステムを考案した。文献1では、システムの設計とその応用例として回折格子の実験が扱われている。文献2では、凸レンズの実験が追加されているが、実際には使用する機会が無かった。

本稿では、凸レンズ以外に凹レンズや球面鏡、平面鏡を含む幾何光学実験を扱うシステムを開発し、教育学部の授業で使用した結果を基に、本システムの有効利用について議論する。ここで扱う教材は、中学生・高校生にも十分理解できるものである。本稿の議論は中学校や高等学校で本

システムを利用する場合にも、ほとんどそのまま当てはまると思われる。

次章では、幾何光学の学習上の問題点とその解決策について述べる。3章では本システム用に開発した幾何光学実験用のソフトウェアを紹介し、4章では実際に授業で使用する際の手順や留意点をまとめている。最後の章では、結論と本システムのさらなる可能性を述べる。

#### 2. 幾何光学の学習上の問題点

##### 2.1 光線による像の作図

幾何光学の学習では、光線を使った作図により像の位置を求める。凸レンズの場合は、レンズの中心を通る光線と光軸に平行な光線のように作図に便利な光線（以下、基本光線と呼ぶ）を2本使って像を作図する（図1a）。凹レンズ、凹面鏡、凸面鏡の場合も同様である。

基本光線の進み方さえ知っておれば像の作図を行うことができるので、多くの学習者は像の作図までは機械的にできるようになる。問題は、作図した像についてどの程度具体的なイメージを持っているかという点にある。

実像が目に見えるのは、像の各点から放射状に出た光線が目に入るからであり、虚像の場合も、そこから放射状に出たかのような光線が目に入るからである。したがって、まず直接ものを見る時に、放射状の光線が目に入っていることを理解しておく必要がある。

実像の作図ができれば、次に基本光線以外の任意の光線を描く作業が像を理解する上で重要であろう（図1b）。

さらに像がどのように見えるのかを理解するには、レンズを通る全光線（実際にはレンズの周辺を通る光線のみでよい）を描く作業が必要になる（図1c）。この作図から、像が見える目の位置が図1cの斜線部になることがわかる。また、この図から、像はレンズの面内にしか見えないこともわかる。

しかしながら、これらの作図だけで、物体・レンズ・像・目の位置関係や空間的な広がりや把握して、実際に自分の目で見たときにどのように見えるのかを想像することが困難な学習者も多い。作図は幾何光学の学習における基本的なステップであるが、それだけでは実感を得ることが難しく、実験・観察も不可欠である。

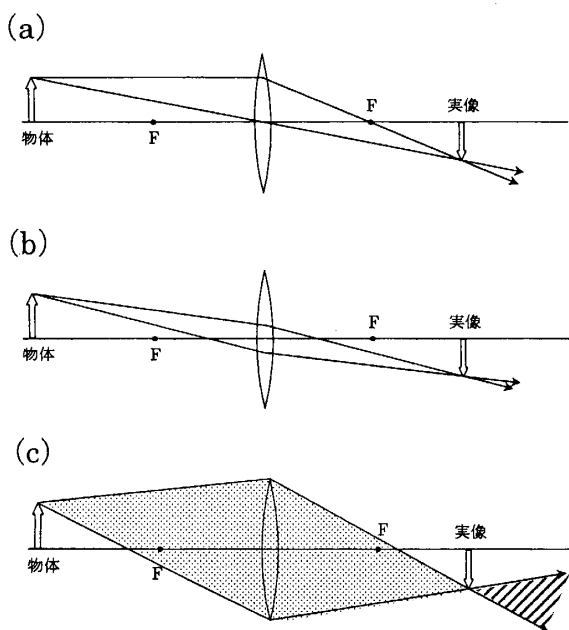


図1 像の作図（凸レンズの例）

(a) 基本光線による像の作図。(b) レンズを通る任意の光線。(c) レンズを通る全光線。斜線部は像が見える目の位置の範囲。

## 2.2 実験上の問題

レンズや球面鏡の実験は、光学台、光源、スクリーンなどを用いて行うのが普通である。実験を行えば、作図だけではイメージしにくかった像の見え方を体験できる。実際に自分の目で見る経験が無ければ、幾何光学は理解できないと言っても過言ではない。しかし、この光学実験にもいくつかの問題点がある。

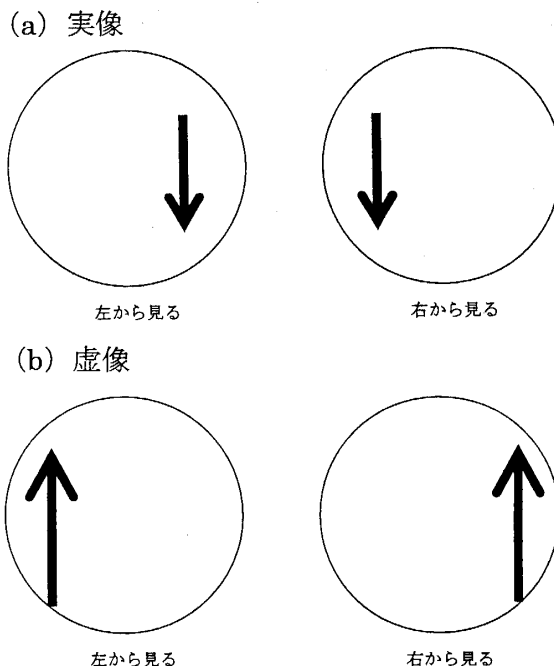


図2 凸レンズと像の位置関係（視差の利用）

目を左右に動かしたときの両者の相対位置により、いずれが遠方にあるかがわかる。

(a) 実像は凸レンズの手前にある。(b) 虚像は凸レンズの向こう側にある。

光線が見えないということがその一つである。幾何光学において決定的に重要で、作図では最も基本的な要素である光線が、実験では見ることができない。レーザー光と煙などを使って可視化できるが、高々数本の光線しか見せることができず、また安定した演示はむずかしい。この問題の解決のために、本稿で述べる、実験装置にコンピュータシミュレーションを実寸大で重ねて表示するシステムが有効である。このシステムの詳細は次章以降で説明する。

別な問題点として、像の位置が感覚的にはわかりにくいという点がある。実像の場合は、その位置にスクリーンを置くことにより、位置が確認できるが、直接目で見た場合は位置がわかりにくい。特に、虚像の場合はスクリーンを使うことができない。

実像の場合、スクリーンで位置を確認した後であっても、直接目で見ると、像はレンズの向こう側にあると錯覚する者が多い。これは、実像がレンズの面内にしか見えないため、ちょうど穴（レンズ面）を通して物体を見るのと同様な感覚にと

られるためである。

実像はレンズの手前にあり、虚像はレンズの向こう側にあることを納得させるには、視差を用いるとよい。すなわち、遠近2つの位置にある物体を見ているとき、目を左右に（または上下に）動かすと、遠くの物体は相対的に目と同じ方向にずれて見えることを利用する。レンズと実像を見ているときには、実像は目の動く方向と逆向きにずれる（図2a）。逆に、レンズと虚像を見るときは、虚像は目の動きと同じ方向にずれることになる（図2b）。視差の利用は、何一つ道具を必要としない便利な方法である。

### 3. ソフトウェア

#### 3.1 座標系の設定

コンピュータシミュレーションをプロジェクタにより実寸大に投影するためには、コンピュータ画面の座標（ソフトのウィンドウ内の座標）とスクリーン上の座標の変換が必要になる。その座標変換のパラメータは、スクリーン上に、一定距離（1m）にある2点の組をいくつか用意し、それらの点をマウスでクリックしていくことで決定できる。パラメータの計算法については文献1を参照していただきたい。

この方法には、鉛直の位置にある2点を使う方法（方法1）と、鉛直位置にある2点の他に水平位置にある2点も使う方法（方法2）の2つが用意されている。鉛直位置は1mの尺度をぶら下げるだけで決められるが、水平位置の決定は黒板の縁などを利用する場合を除くとやや面倒になる。壁面をスクリーンとする幾何光学の実験では、方法1のみを使っている。より具体的な操作は、次章で説明する。

また、座標原点は、上記の操作が終わった後に、スクリーン上の点をクリックすることにより、何度でも自由に変更できる。なお、投影用のウィンドウは実験の途中で位置がずれないように、最初の段階で全画面化（最大化）しておく。

投影画面における誤差は1mにつき1cm（1%）以下になるので、多くの演示実験には十分な精度である。

#### 3.2 レンズの実験

レンズの実験用のソフトは、凸レンズと凹レンズを同じウィンドウで扱えるように制作した。

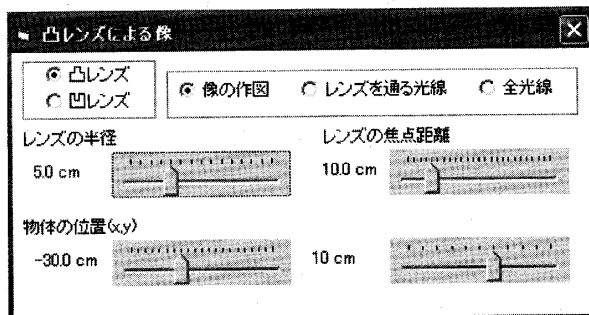


図3 レンズの実験の設定用ウィンドウ

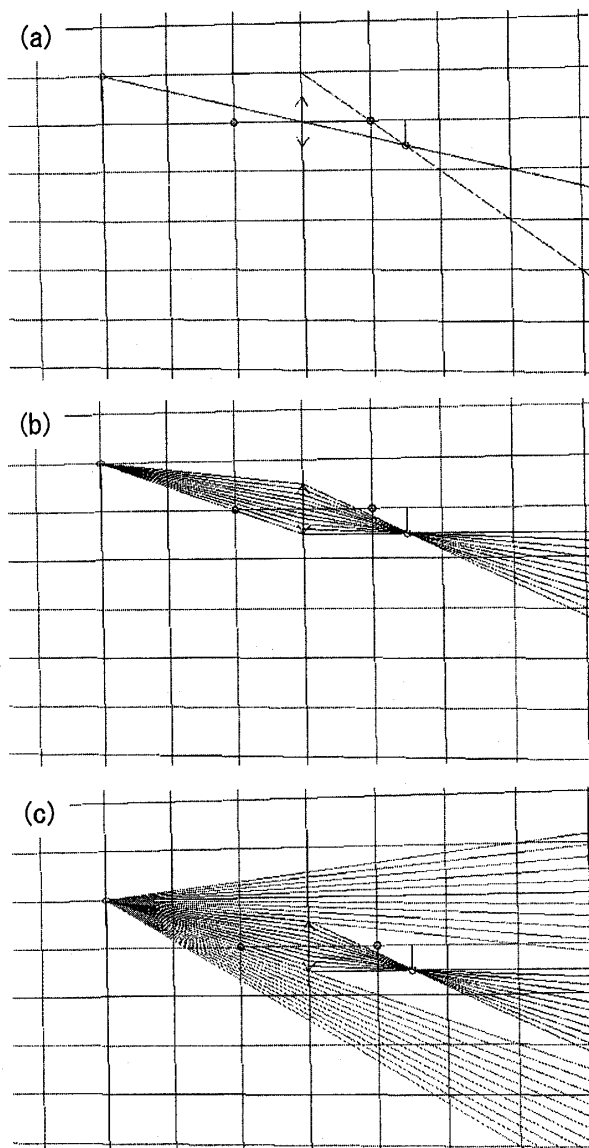


図4 凸レンズの実験の投影用画面

(a) オプションボタンが「像の作図」の場合 (b) 「レンズを通る光線」の場合 (c) 「全光線」の場合

原点はレンズの中心とし、

- ・ レンズの半径 (1.0~15.0cm, 0.5cm間隔)
- ・ レンズの焦点距離 (2.0~50.0cm, 0.2cm間隔)
- ・ 物体の水平位置 (-100~100cm, 0.5cm間隔)
- ・ 物体の鉛直位置 (-50~50cm, 1cm間隔)

などがスライダーで調節できる (図3)。これらは、実験装置と投影したシミュレーションを重ね合わせるために使用する。スライダーは、マウスまたはカーソルキーで操作できるが、微調整はカーソルキーの方が便利である。

光線の描画法として、像の作図に必要な基本光線 (図4a)、レンズを通る10本の光線 (図4b)、さらにレンズを通らない光線も含めた全光線 (図4c) の3つをオプションボタンで選択できるようにした。

### 3.3 鏡の実験

レンズの場合と同様に、凹面鏡、凸面鏡および平面鏡の実験を1つのウィンドウで扱えるようにし、4つのパラメータはスライダーで調節できるようにした (図5)。ただし、平面鏡の場合は焦点がないので、オプションボタンが平面鏡の時、焦点距離のスライダーを非表示にしている。

4つのパラメータ (鏡の半径、焦点距離、物体の水平位置、鉛直位置) の範囲もレンズの場合と同様である。

表示する光線もレンズの場合と同様に、作図用の光線、鏡で反射する光線束、全光線の3通りとしている。図6に凹面鏡による虚像の場合の投影用画面を示す。

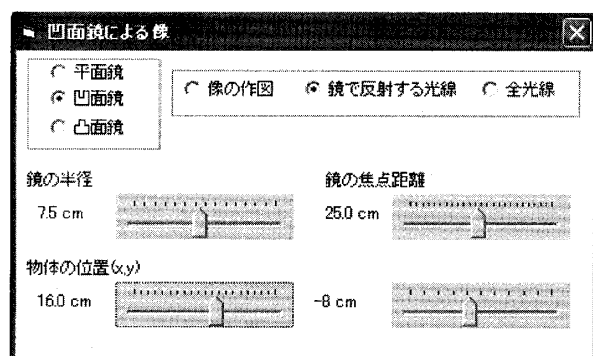


図5 鏡の実験の設定用ウィンドウ

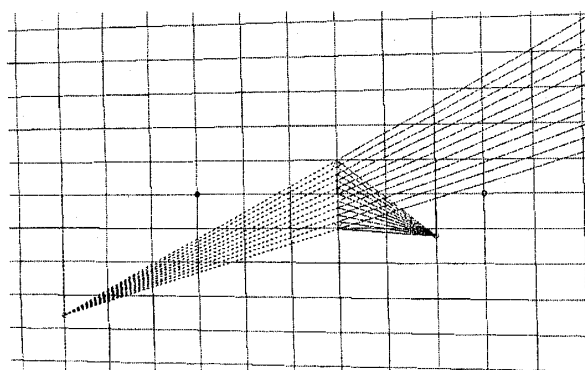


図6 凹面鏡による虚像の場合の投影画面

## 4. 授業での使用

本システムを用いた幾何光学の授業を鹿児島大学教育学部における2004年度と2005年度前期の物理学概説IIの中で実施した。ここでは、その経験に基づき、準備すべきことや演示手順をまとめておく。

### 4.1 事前の教育内容

本システムによる演示実験は、ある程度の準備が必要なので、幾何光学の実験をまとめて行うことにした。したがって、事前に、

- ・ 基本光線による球面鏡やレンズの像の作図
- ・ 任意の光線や像が見える目の位置の作図

などの練習を行っておく。その際には、実物の鏡やレンズを使った演示なども行う。

また、像の位置を確認させるために必要となる視差についても説明しておく必要がある。(これは、実験の開始時に行ってもよい。)

### 4.2 実施準備

本システムを使った幾何光学実験では、光学台とスクリーンを平行に、かつできるだけ接近させて配置しなければならない。回折格子の実験の場合 [文献1] とは異なり、プロジェクタもスクリーンに対してできるだけ直角に投影できるように配置する必要がある。

今回は、物理実験室後面の白壁をスクリーンとし、光学台は適当な高さになるように机や台に乗せて壁面の前に置いた。

また、3.1で述べた座標設定のために、鉛直位置にある2点を2組と、任意の傾きの2点を2組使用するので、壁面に予めそれらの点を小さな円形シールでマークしておく。2点の間隔はすべ

て1mである。実際には図7のような6点にシールを貼ってある。これは一度用意すれば、何度でも使用することができるので、実験後もそのまま残してある。

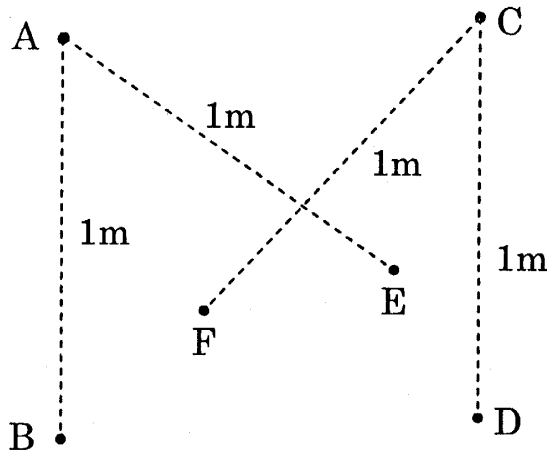


図7 スクリーン上のマーク位置

壁面の点A～Fの位置に小さなシールを貼っておくと、座標設定は即座に行える。

なお、光源（物体）としては、ろうそくや電球よりも小さい高輝度LEDを使用した。これは物体や像の位置を正確に決めるためであったが、LED自体がレンズ構造を持っているため実質的な光源の位置がわずかにずれる。このずれは、本演示実験では問題にならない程度であるが、このことを意識しておく、より正確な実験が行える。

この演示を行う授業の受講者数は20名以上であるので、全員に像を直接見て確認してもらう時間的余裕はない。そこで、ビデオカメラとモニターを用意し、全員に像の映像が見えるようにした。

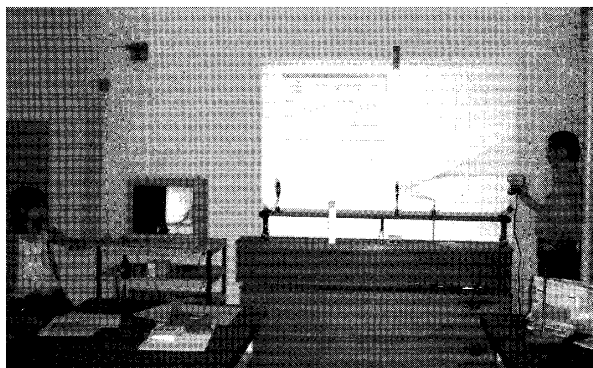


図8 授業風景

凹面鏡の実像をビデオカメラでとらえ、モニターに表示しながら説明している。

#### 4.3 授業の展開例

ここでは、凸レンズの実験の演示手順だけを詳しく述べるが、他も同様である。

##### (1) 座標設定

壁面に用意したマークをクリックし座標変換のパラメータを決定する。この作業は20秒程度で完了し、授業の中で1回行うだけである。

##### (2) レンズの位置合わせ

シミュレーションの原点は凸レンズの中心となっているので、メニューの「原点指定」を選択し実物のレンズの中心にマウスカーソルを合わせてクリックする。さらにスライダーを使って、レンズの大きさを合わせる。

##### (3) 焦点距離

光源（物体）の位置をスライダーで合わせ、作図用の基本光線（図4a）を表示する。ここで、実像をスクリーンに映し出し実像の位置を決める。焦点距離のスライダーを調整して、シミュレーションの実像の位置を実際の実像の位置に合わせる。これにより、焦点距離が測定されたことになる。（予め凸レンズの焦点距離も測定しておき、ここで求めた値が正しいことを確認するとよい。）

##### (4) 像の観察

全光線（図4c）を表示して、像や光源が見える位置を実際に確かめる。（このとき像を見やすいように、光源の高さも調整するとよい。）また、像の位置よりレンズに近づくと像がぼけることも分かる。

まず、数人の学生に様々な位置から観察させ、像が見えるか否かを発言させる。他の学生は、観察者の目と表示された光線の位置関係が確認できる。さらに観察者の代わりにビデオカメラを使いモニターで観察させると、すべての学生に像の見え方と光線の関係を示すことができる（図9）。

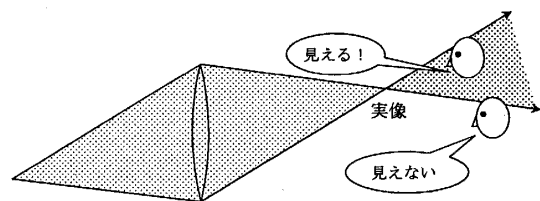


図9 観察者の観察

観察者以外の学生は、観察者の目の位置と光線を比較観察する。この後、観察者の代わりにビデオカメラを使って像を見せながら説明する。

(5) 視差を利用した像の位置の確認

2.2で述べたように、凸レンズの実像を見たときに、その像がレンズの向こう側にあると錯覚しやすい。ビデオカメラを左右または上下に動かすことにより、実際には凸レンズよりも実像の方が手前であることを示す。

(6) 光源の位置の変化

光源の位置を変えて、像の大きさや像が見える位置の変化を確認する。像が虚像になる場合も示し、このときは像がレンズの向こう側にあることを視差により確認する。

凸レンズの実験が一通り終わると、凹レンズ、凹面鏡、凸面鏡、平面鏡も同様であるので、ごく手短かに演示ができる。

ただし、凹レンズや凸面鏡のように通常は虚像しかできないものについては、この演示実験の中で焦点距離を決めることが困難であるので、予め焦点距離を測定しておかなくてはならない。

4.4 アンケート結果

2005年度の授業でこの実験を行った際に、当日の出席者22名(男女各11名)に簡単なアンケート調査を行った。その項目は以下の通りである。

- ・高等学校における理科の履修教科
  - 物理, 化学, 生物, 地学, 理科総合(複数可)
- ・レンズの実験の経験
  - あるorない
- ・鏡の実験の経験
  - あるorない
- ・像が見える目の位置について
  - 四観点(よく理解できた, ほぼ理解できた, あまり理解できなかった, 全く理解できなかった)
- ・視差の使い方について
  - 四観点(上に同じ)
- ・意見, 感想

高等学校において、物理を履修していたものは、9人(40%)であった。レンズの実験は、17人(81%)の学生が経験したことがあった。これには中学校での実験も含まれている。一方、鏡の実験は9人(40%)の学生のみが経験したことがあり、半数以上の学生が未経験であった。像が見える目の位置と視差の使い方が理解できたかとい

う問の結果は図10に示す。

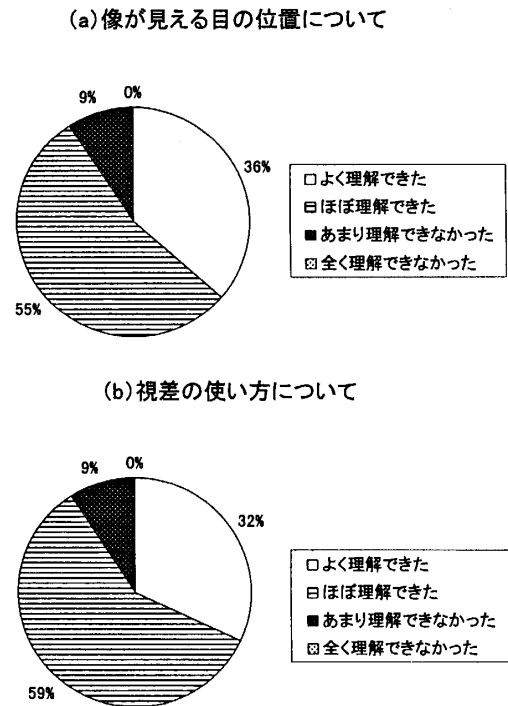


図10 アンケート結果

- (a) 像が見える目の位置についての理解度
- (b) 視差の使い方についての理解度

図10を見ると、本システムを使った授業が効果的であったことが分かる。像の見える目の位置については、全体の91%がよく理解できた、ほぼ理解できたを選んでいる。同様に視差の使い方でも全体の91%がよく理解できた、ほぼ理解できたを選んでいる。

アンケートの最後の項目として受講者の意見や感想を求めた。その感想の中には、「プロジェクタやビデオカメラを使ったりして、作図の線も目で見ることができ、理解しやすかったです。」「作図上では像のできる位置は分かるが、実際にやるとなると、どのように見えるのかが今まで分からなかった。しかし、ビデオカメラなどを使っていたので、理解しやすかった。」などがあつた。

実際の授業では、視差を使って像の絶対的な位置を求める方法など、やや詳細すぎる内容も扱ったので、難しいと感じた者もいたと思われる。それでも、受講者の反応や上記のアンケート結果から、本システムの教育的効果は高いと考えられる。

## 5. おわりに

幾何光学の実験は、自分の目で像や物体を確認できる長所を持っているが、光線を見ることができないという短所もある。一方シミュレーションは、様々な光線を容易に描き出すことができるが、それだけでは実感を伴わないという短所がある。

本システムは、実験とシミュレーションを併用することで、それぞれの長所を生かしつつ短所を補うことができるため、すぐれた教育効果があると考えられる。2年間にわたり実際に授業で使用した結果も良好であった。

本システムを使った実験は、基本的には演示実験の形態になるが、

- ・表示された光線や像を見ながら説明ができる
- ・像を観察している学生の反応を観察することが、観察者本人以上に理解を深めることになるなどの特長があり、グループや個人で行う学生実験よりも効果的である側面も多い。

実際に行った授業での問題点として、ビデオのカメラのモニタが小さく、またモニタが投影画面の外に置かれているため、同時に両者を見ることにやや不便があったことが挙げられる。この問題は、カメラをコンピュータに接続して、その映像もプロジェクタで投影すれば解決できると思われる。

本システムを使える可能性がある実験として以下のようなものが考えられる。

- ・複数のレンズを組み合わせた実験

凹レンズの焦点距離を求める標準的な実験として、凸レンズと凹レンズを組み合わせて実像を作る方法がある。このような実験へ対応できるようにソフトウェアを拡張することは容易である。

- ・平面による屈折の実験

空気との境界が平面であるガラスや水による屈折像も身近な現象として重要である。この場合の像の位置は、目の位置によって変わってくる。初歩的な幾何光学の例では、像の位置が目の位置によらないものだけを扱うので、すべてがそうであると勘違いしている学生も多い。身近な現象でありながら、作図や計算が困難であるため省略されがちであるが、本システムを使えば、効果的な演

示実験が可能だろう。

- ・光学以外の分野における活用法

現在この実寸投影システムは、回折格子、レンズ、鏡といった光学の分野において利用できるようになっているが、他の分野での利用も可能だと思われる。力学分野などでの動きのある実験にも対応できる可能性がある。なお、斜面上の球の運動については、文献3で開発を行ったが、まだ実用段階には至っていない。

本稿で紹介した光学実験への応用例は、内容を絞ることにより、中学校や高等学校の授業でも効果があると思われるので、そのような実践的研究も有意義であろう。

## 参考文献

- 1) 三仲啓・朱弘范, 「液晶プロジェクタによる実寸シミュレーションを併用した物理学実験—ソフトウェアの設計と光学実験における応用例—」, 鹿児島大学教育学部教育実践研究紀要 Vol. 13, pp. 91-97 (2003)
- 2) 朱弘范, 鹿児島大学大学院教育学研究科修士論文「コンピュータシミュレーションの実寸投影システムの製作とその教育利用」(2004)
- 3) 増田覚, 鹿児島大学教育学部卒業論文「液晶プロジェクタによる実寸シミュレーションを利用した物理学実験」(2005)