

Basic Observation Training by a Small Telescope (2017)

平成 29 年 10 月 17 日

1 Purpose

This course is to carry out basic astronomical observations by a CCD camera, utilizing the 21cm telescope at IoA. The main goal is to master the basic technique to operate a telescope, to understand the basic concepts of observations under the equatorial coordinate system (RA, Dec), and to master the observation methods using a CCD.

Every year, we attempt to improve the sensitivity by upgrading the CCD camera system and the telescope system, and confirm if it is achieved through real observations. Through these processes, we expect you to develop deeper understanding of the concept of “limiting magnitude”.

The telescope and the equator mount system is renewed in 2016, and also various new filters are introduced including standard *UBVRI* as well as narrow-band filters ($H\beta$, [OIII], $H\alpha$, [SII]), however, their performances are not fully verified yet.

Thus, we will work on following items this year ;

Master the operation of the telescope and the equator mount.

Verify the performance of the CCD camera, such as pixel scale and readout noise

Verify the performance of the new filters

Estimate limiting magnitudes

Verify the limiting magnitudes through follow-up observations

Manuals and documents of the telescope system are available at
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/>

Select 「講義など」 → 「2017 基礎天文学観測」 in the menubar of
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/wiki/> for the website of this course
(Shortened URL :<https://goo.gl/ojMWTu>)

2 Limiting Magnitude

2.1 System Efficiency

System efficiency is defined as

“fraction of photons detected as electrons in the CCD to those entered a telescope aperture”.

Number of photons from a target object (s_i (/s)) is

$$s_i = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \frac{\Delta\lambda F_\lambda}{h\nu} \quad (1)$$

where

D :aperture of the telescope
 F_λ :flux of the object
 $\Delta\lambda$:wavelength range of a filter

and number of electrons generated at the CCD (n_i (e^- /s)) is

$$n_i = \frac{N f_{conv}}{t} \quad (2)$$

where

N :counts on an image
 f_{conv} :conversion factor
 t :integration time.

Therefore, the system efficiency η can be written as

$$\eta = \frac{n_i}{s_i} \quad (3)$$

2.2 Limiting magnitude (in case of a single pixel)

To define a limiting magnitude, we introduce a quantity S/N , a signal-to-noise ratio, and if the incoming signal is larger than the noise level by a factor of S/N , we consider the signal to be detected. In the optical-IR imaging, $S/N = 5$ is often used as a threshold.

In our case, S/N can be written as

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{n_i t}{N_{\text{noise}}} \\ &= \frac{\eta s_i t}{N_{\text{noise}}} \end{aligned} \quad (4)$$

, where N_{noise} is the noise and t the integration time.

The noise consists of the Poisson noise of the incoming photons and the readout noise of the CCD, and can be written as

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i t + n_{\text{sky}} t + n_{\text{dark}} t + N_{\text{read}}^2} \quad (5)$$

, where n_{sky} ($e^-/\text{s}/\text{pix}$) is the detected background photon count rate per pixel, n_{dark} ($e^-/\text{s}/\text{pix}$) the dark current electron rate per pixel, and N_{read} ($e^- \text{ r.m.s.}/\text{pix}$) the readout noise of the CCD per pixel per readout.

2.3 Limiting magnitude (in case of multiple pixels)

What's going to happen when the stellar image is extended over several pixels of the CCD?

In that case, we have to consider the noises from multiple pixels, and add them statistically, that is, when the stellar image is extended to m pixels, the noise N_{noise} can be written as

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_i t + m n_{\text{sky}} t + m n_{\text{dark}} t + m N_{\text{read}}^2} \quad (6)$$

3 CCD Camera

3.1 Functional Principle of CCD

- Principle of CCD is available at <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/LECTURE/OBS/detector.html>
- For its data reduction, refer to 西浦版『可視光域データ・リダクション法』.

3.2 How to use the FLI CCD camera

3.2.1 Power-on

- Turn on the power by connecting the power cable to the CCD camera.
- Boot to linux not PC to control the CCD camera
- Login username is tct2017 (password will be delivered on the first day of the course)
- Wait for ~10 min for the CCD camera to be cooled down.

3.2.2 Image Acquisition

Open a terminal on the Linux PC and run the following commands:

- `ds9 &` to start the QL viewer,
- `acqfliframe (e or d) (time)` : Exposure(e) or take dark(d) with the integration time of (time).
- `n_acqfliframe (e or d) (time) (N)` : Exposure(e) or take dark(d) by (N) times with the integration time of (time).

3.3 Filter Exchange

All the filters are housed in the filter wheel, and controlled via USB. The command is ;

`flifilter (filter name)`

where the filter can be chosen either by its name (B, V, R, I, Hb, O3, Ha, S2) or its slot number(1-8).

Name of the filter is inserted to a header of an acquired image.

3.3.1 Setting Parameters

Parameters such as header information of FITS image frames, directory to which the frames are saved, current filter, and installed filters are all managed by mySQL server of the local machine.

List of keywords and their current values can be referred at

`http://localhost/ccd.php`

, or `statal1` command.

To see or change each keyword, use

`status (Keyword)`

`status (Keyword) (Value)`

command.

3.3.2 Important Keywords

Keywords that should be set during observations

- `DATA_DIR_NAME` : data path
- `OBJECT` : object name
- `WEATHER` : weather
- `OBSERVER` : name of observers

Keywords used for FITS header

- `CCD_SERIAL_NUMBER` : frame ID
- `CCD_TEMP_CUR` : current temperature of the CCD chip

4 What to Do before Observation

4.1 今夜の星空のチェック

Use night-sky simulator such as Stellarium. (<http://www.stellarium.org/ja/>)

4.2 Select the Star to Observe

4.2.1 For Measurement of System Efficiency

Use Stellarium, where magnitudes (at V-band) of stars are displayed.

4.2.2 For Measurement of Limiting Magnitudes

As you need to select stars fainter than 10mag, use online-catalogs, such as aladin sky atlas (<http://aladin.u-strasbg.fr/>) which have GUI interface and is easy to use

As catalog magnitude is not always that of the filter band you are using, so you have to make some estimate in such case.

4.3 Obtain Calibration Data

4.3.1 Bias and Dark Frames

Obtain at least 20 frame for dark and bias. As of dark frames, you have to take them with the exposure time with which you observed.

4.3.2 Flat Frames

Put a white paper in front of the telescope, illuminated by a light, and take images.

4.4 Check Readout Noise

Take two bias frames, and

- subtract each other,
- divide by $\sqrt{2}$,
- and get statistics by `imstat nclip=3 (filename)`, then the stddev is the readout noise in ADU unit.

5 Data Reduction

5.1 Computers to Use

Linux machines (ioa09, ioa10, ioa11) are available at the laboratory, but we recommend to use your own PC if you have.

If you use your PC, please install linux environment and IRAF in it (Ask your tutor how to do it).

5.2 Account Name and Password

Account name is

```
tctcam
```

.

5.2.1 Transfer Frames

To transfer the acquired frames to ioa09, ioa10, and ioa11, you have to copy via network. If you want to transfer `/home/ccdimages/test.FTS` to the home directory of a user `tct2017` at ioa10, execute

```
scp /home/ccdimages/test.FTS tct2017@ioa10:test.fits
```

at command prompt. Another application of this is

- If you want to transfer the directory `/home/ccdimages/hogehoge` to the home directory of a user `tct2017` at ioa 10,

```
scp -r /home/ccdimages/hogehoge tct2017@ioa10:
```

- If you want to transfer `/home/ccdimages/test.FTS` to the directory `obs` at the home directory of a user `tct2017` at ioa 10,

```
scp /home/ccdimages/test.FTS tct2016@ioa10:/obs/
```

- Transfer all the files starting with “test” such as `/home/ccdimages/test1.FTS,` `/home/ccdimages/test100` to the directory `obs` at the home directory of a user `tct2017` at ioa 10,

```
scp /home/ccdimages/test*.FTS tct2016@vw:/obs/
```

5.3 UNIX コマンドたちを使いましょう

5.3.1 ディレクトリに関する基本的な約束ごとなど

- 現在のディレクトリは
.
- 一つ上のディレクトリは
..
- ということは、もう一つ上のディレクトリは
../..
- ホームディレクトリは ~/

と表される。

現在のディレクトリを知りたい場合は

```
pwd
```

と打つ。

なお、一般的なディレクトリ構造は下図のようになっている。

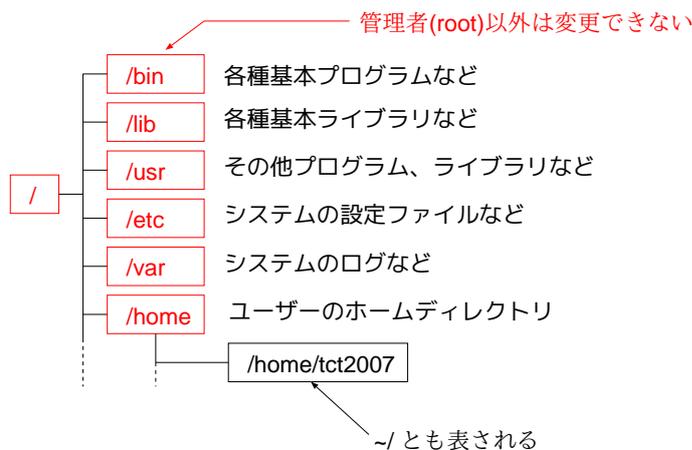


図 1: UNIX 系 OS のディレクトリ構造の一例

5.3.2 正規表現

文字列の集合を表現する約束ごと。いろいろあるが、とりあえず役に立ちそうなものを以下に示す。

- * : 任意の文字集合
たとえば、あるディレクトリで tmp で始まるファイルだけを表示したい場合は

```
ls tmp*
```

とする。あるいは、.FTS という拡張子をもつものだったら

```
ls *.FTS
```

とする。

- `?` : 任意の一文字
*が複数文字を代用するのに対して、一文字だけを表す。
たとえば、拡張子が2文字のファイルだけを表示する場合は

```
ls *.*??
```

とする。ls *.* とすると `.` が入っているファイルすべてが表示されてしまう。

- `[]` : 括弧内に含まれる一文字
たとえば、test のあとに数字一文字がついた.FTS をホームディレクトリにコピーしたい場合は

```
cp test[0123456789].FTS ~/
```

とする。これは代わりに

```
cp test[0-9].FTS ~/
```

と書くことも可能。
二桁の数字がつくファイルの場合には

```
cp test[0-9][0-9].FTS ~/
```

とすればいい。

5.3.3 ssh/scp

他のワークステーションにログインする。コピーする

- foo.ioa.s.u-tokyo.ac.jp に bar というユーザー名でログインしたいときは

```
ssh foo.ioa.s.u-tokyo.ac.jp -l bar
```
- foo.ioa.s.u-tokyo.ac.jp に bar というユーザー名のホーム下にある aho.txt というファイルを
カレントディレクトリにコピーしたいとき

```
scp bar@foo.ioa.s.u-tokyo.ac.jp:aho.txt .
```

5.3.4 less, more, cat

ファイルの中身を見たいときに使う。less, more は端末に出せるところまで表示して、続きはスペースキーなどで見ていくことが可能。cat はファイル全部を一気に端末に流し出す。

5.3.5 テキストファイルの編集

テキストファイルの編集をおこなうメジャーなものは vi と emacs が挙げられる。他にも色々あるが。

emacs aho.txt のように編集したいファイルを指定して起動。

基本的にマウスではなく、いろんなキー操作で編集するので、詳しいことはマニュアル本を見よ。

5.3.6 gawk

gawk はファイルテーブルの操作や、様々な計算が簡単にできる。

- たとえば

```
1 4 20.31
2 50 40.1
3 5 60.3
```

というテーブルが aho.txt という形であって、各行で 2 番目と 3 番目の要素を足し合わせて多テーブルに変換したい場合

```
gawk '{print($1,$2+$3)}' aho.txt
```

とすればいい。さらに、その結果を boke.txt に書き込みたいのなら

```
gawk '{print($1,$2+$3)}' aho.txt > boke.txt
```

とする。

- 電卓のようにしても使える。

$$10 \times 2 \times \frac{5}{2 \times \sin(5)} \times \exp(10.4/300)$$

だと

```
gawk 'BEGIN{print(10*2*5/(2*sin(5))*exp(10.4/300))}'
```

とすればいい。

変数を定義して使うこともできる。 $a = 10\sqrt{5}$, $c = 3 \times 10^{10}$ として

$$100 * a/c$$

を計算したいのであれば、

```
gawk 'BEGIN{a=10*sqrt(5);c=3e10;print(100*a/c)}'
```

とする。

常用対数関数がないので要注意である。

```
gawk 'BEGIN{print(log(100))}'
```

は $\ln(100)$ を表示する。

他にもいろんなことができる。詳しくはマニュアルとかを見よ。

5.3.7 リダイレクト、パイプ

あるコマンドの出力を、ファイルに流し込みたいときはリダイレクト。" > "を使う。さっきの
gawk '{print(\$1,\$2+\$3)}' aho.txt > boke.txt
とか。

さらにその出力をべつのコマンドに流し込みたいときはパイプ " | "を使う。さっきの
gawk '{print(\$1,\$2+\$3)}' aho.txt | gawk '{print(\$2-\$1)}'
のようにする。

5.4 How to Use IRAF

- Before you start, execute
mkiraf
at the directory you work in. It will then ask you the terminal type, so answer xterm, or
if you are using xgterm, xgterm.
- Execute
xterm &
to run a terminal.
- Execute
ds9 &
to run image viewer.
- Execute
c1
in the terminal.

Below is various command of iRAF. Arguments shown with () is mandatory, and with [] optional.

For more detailed information, use

epar (command) to get a help for arguments,
help (command) to get a help of the command.

- display (filename) (frame) [fi+] [zr-] [zs-] [z1=xxxxx] [z2=xxxxx]
Display image to frame number (frame) of ds9

use fi+ to display full-frame,

use zr- zs- to turn off automatic scaling, so you have to specify the display scale
using argumentsz1=xxxx z2=xxxx.

- imstat (filename)
画像の統計量を調べる

- imhead (filename)
画像のヘッダ情報を表示する。
全ヘッダ情報は
imhead (filename) longhea+
で見れる。
 - imcombine (filelist) (output)
(filelist) で指定したファイルをすべてたし合わせて平均する (オプションで和にも
できる)。 (filelist) は
 - * filename1,filename2,filename3,...
のようにコンマで書き連ねるか、
 - * ファイル名リストを羅列した filename.list のようなファイルを用意して
@filename.list
のように指定してもいい。
 - imarith (filename1) (+-*/) (filename2) (output)
(filename1) と (filename2) の加減乗除 (+-*/) を行う。
 - imexam [filename]
(filename) で指定したファイルの性質をインタラクティブに調べる。 ds9 上にカーソ
ルを持って行き、そこでキーボードを操作することによって実現する。たとえば、
 - * a カーソル位置にあるピークの統計を調べる。FWHM、フラックス、バックグラ
ウンドレベルなど。
 - * e カーソル位置のコントアを描く。
 - * z カーソル位置周辺のピクセルの値の一覧を出す。
 - * m カーソル位置周辺のピクセルの統計値を計算する
 - * q 終了
- 等

- IRAF で測光

apphot パッケージを使う。まずは IRAF を立ち上げて

```
noao
digi
apphot
```

とする。そのあと各種パラメータの設定

- epar phot
を実行
- photpar にカーソルを移動して、:e と打つ
 - * apertur を適当な値 (アパーチャー直径が FWHM の倍以上になるように)
 - * zmag は求めておいた値 (あるいはそのままでもいい)
 - * 終わったら、:q と打つ

- fitskyp にカーソルを移動して、:e と打つ
 - * annulus を適当な値 (直径が FWHM の 3 倍以上になるように)
 - * 終わったら、:q と打つ
- datapar にカーソルを移動して、:e と打つ
 - * itime に露出時間の値 (秒) を入れる
 - * 終わったら、:q と打つ
- 終わったら、:q と打つ

次に、測光を行う。

phot (画像ファイル名)

で ds9 に画像が表示されるので、測光したい星にカーソルを持っていてスペースキーを押す。複数の星を測定することも可能。

終わったら q を 2 回打つ。

結果は (画像ファイル名).mag.[1-9] というファイルに保存される。中身は以下のようになっている。(# で始まる行はコメント行)

```
test.fits          2082.000 2449.000 2      nullfile          0      \
 2081.515  2448.083  -0.485  -0.917  0.575  0.777          0  NoError  \
 0.001193246  0.01377304  0.0068786  911  29          0  NoError  \
 1.          INDEF          INDEF          INDEF          \
 3.00  4.924091  28.69609  4.88985  23.277 0.491 0  NoError
```

このなかで、最後の行が重要で

- (アパーチャー半径)
- (アパーチャー内のカウント [スカイ込み])
- (アパーチャー面積)
- (スカイを引いたアパーチャー内のフラックスカウント)
- (等級に変換した値 [上の zmag を用いている])
- (等級誤差)

となっている。

5.5 解析の実際

西浦版『可視光域データ・リダクション法』を参照。

実際に行うことは、

- データのバイアス引き、ダーク引き、フラットフィールドを行う
- imexam で星からのフラックス量を算出。
- それを電子数に換算して n_i を算出
- それと計算から出る s_i を比較してシステム効率と conversion factor を出す

という流れになる。

6 実習課題

6.1 フィルタ特性評価

6.1.1 フィルタ透過率データの取得

フィルタ透過率のデータが、

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/camera/index.html>

に、

CCD の量子効率が

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/camera/mod-ccd-qe.dat>

にあるので、それをダウンロードする。

6.1.2 実効透過率の評価

いずれか一つのフィルタについて、CCD の量子効率と合わせた時の実効透過率曲線をプロットし、

- 中心波長 (λ_{eff})
- 半値全幅 ($\Delta\lambda$)
- 平均透過率 (T_{eff})

を求めよ。

なお、透過率の波長依存性を $T(\lambda)$ とした場合、

•

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{\infty} \lambda T(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} T(\lambda) d\lambda}$$

•

$$T_{\text{eff}} = \frac{\int_{\lambda_{\text{eff}} - \Delta\lambda/2}^{\lambda_{\text{eff}} + \Delta\lambda/2} T(\lambda) d\lambda}{\Delta\lambda}$$

と定義する。

以下の作業は、上記のフィルタに対して行うこと。

6.2 カメラの視野とピクセルスケール

- 望遠鏡の焦点距離及び CCD のピクセルサイズから、ピクセルスケール (arcsec/pixel) を計算せよ。
- 既知の二重星、或いは間隔のわかっている二つの星を同時に撮影し、画像上での距離からピクセルスケールを算出せよ。また、上記の値とどれくらい一致したかを評価せよ。

6.3 システム効率

- 適当な明るさの星を適当な積分時間で撮影し、検出されたカウントを測定せよ。
- その星から望遠鏡に入射した光子の数を計算せよ。
- 上記2つを比較してシステム効率 (式 3) を求めよ。

6.4 等級原点

等級原点 Z_{mag} は、あるカメラシステムで 1 秒間の露出で 1 カウントの信号を生じさせる天体の等級のことである。たとえば、8 等級の星を 5 秒露出したときに 100 カウントの信号が検出されたとすると、このカメラシステムでの等級原点は

$$\begin{aligned} Z_{\text{mag}} &= 8 + 2.5 * \log \frac{100}{5} \\ &\sim 11.3 \end{aligned}$$

となる。これを、上記のデータより算出せよ。

6.5 空の背景光

星の写っていない領域に入射している光の量を [photons/s/arcsec²]、および [mag/arcsec²] で算出せよ。

6.6 限界等級

- 適当に星を選び、適当な積分時間で露出を行い、その等級と等級誤差を測定せよ。さらに、S/N を計算せよ。
- 予想される S/N 値を式 (6) から計算せよ。
- 実際に検出された S/N 比を上記の計算値と比較し、一致しない場合はその原因を考察せよ。