

SkyEye
Podręcznik użytkownika

Arkadiusz Kalicki

18 listopada 2004

*Składam szczególne podziękowania wszystkim,
którzy przyczynili się do powstania tej pracy.*

*W szczególności zaś:
dr hab. Grzegorzowi Wrochnie,
dr hab. Lechowi Mankiewiczowi,
Kolegom z grupy **Pi of the sky**.*

Spis treści

1	Wstęp	4
2	Zestaw obserwacyjny	5
3	Instalacja, kompilacja	6
3.1	Linux	6
3.2	Windows	7
4	SkyEye	8
4.1	Ogólny schemat działania	8
4.2	Uruchomienie programu AudeLa	8
4.2.1	Linux	8
4.2.2	Windows	8
4.3	Interfejs graficzny programu AudeLa	8
4.4	Uruchomienie SkyEye	10
4.5	Panel Variable stars	10
4.5.1	Source, Camera	11
4.5.2	Source, Files	12
4.5.3	Dark Frame	13
4.5.4	Preprocessing	14
4.5.5	Recognition	15
4.5.6	Photometry	16
4.5.7	Astrometry	18
4.5.8	Photometry calibration	20
4.5.9	Results	20
4.6	Panel Data analysis	21
4.6.1	Database	22
4.6.2	Region	22
4.6.3	Diagram	23
4.7	Dodatkowe polecenia	24
4.7.1	Dodatkowe polecenia biblioteki „libwebcam” dla systemu Linux	24
4.7.2	Biblioteka „libskyeye” – obiekty i polecenia	25
5	Algorytmy	29
5.1	Pobieranie obrazów	29
5.1.1	Implementacja kamery internetowej pod systemem Linux	29
5.1.2	Sterowanie czasem ekspozycji	30
5.2	Nakładanie klitek	30
5.3	Automatyczna detekcja gwiazd	31
5.3.1	Odnajdywanie lokalnych maksimum jasności	32
5.3.2	Eliminacja obiektów niegwiazdowych	33
5.4	Fotometria aperturowa	34
5.5	Astrometria	34
5.5.1	Katalog Tycho-2	35
5.5.2	Kalibracja astrometryczna	36
5.6	Kalibracja fotometryczna	37

5.7	Gromadzenie danych, tworzenie wykresów zmienności blasku gwiazd i typowanie gwiazd zmiennych	37
6	Dodatki	39
6.1	Gwiazdy zmienne, zaćmieniowe	39

1 Wstęp

Gwiazdy zmienne to gwiazdy które zmieniają w sposób zauważalny swoją jasność. Praktycznie każda gwiazda wykazuje drobne fluktuacje jasności, ale są one w większości przypadków niemierzalne. Gwiazdy zmienne można podzielić na główne grupy: gwiazdy pulsujące, gwiazdy wybuchowe i gwiazdy zaćmieniowe.

Obserwacje gwiazd zmiennych są bardzo ciekawe, dostarczają wielu cennych wiadomości o ich własnościach fizycznych, budowie i ewolucji. Każdy z miłośników astronomii, ponosząc niewielkie koszty, może je prowadzić i uzyskać wartościowe naukowo wyniki. Projekt **SkyEye** ma na celu ułatwienie tych obserwacji.

Powstał on jako edukacyjna część projektu **Pi of the sky** [14], który obejmuje udane wykonanie i wdrożenie systemu do wykrywania błysków gamma, ich widzialnej części widma. Szerokokątne obserwacje nieba prowadzone są w polskim obserwatorium w Las Campanas w Chile.

Cel postawiony **SkyEye** to stworzenie oprogramowania edukacyjnego do pomiarów blasku gwiazd zmiennych. Przez automatyzację wielu czynności, łatwy w użyciu interfejs użytkownika i zastosowanie do obserwacji tanich kamer internetowych ma umożliwić uczniom i amatorom astronomii samodzielne wykonywanie pomiarów i analizę danych.

Zadanie zostało wykonane na bazie francuskiego projektu **AudeLa** jako dodatkowe biblioteki napisane w języku **C/C++** oraz zestaw użytecznych skryptów w języku **TCL**.

W dokumencie tym opisano podstawowe wiadomości na temat obserwacji astronomicznych kamerą internetową, następnie przedstawiony został sposób instalacji i kompilacji programu **AudeLa** oraz **SkyEye**. W dalszej części opisano działanie i zasadę posługiwania się **SkyEye**. Na koniec przedstawiono algorytmy wykorzystane w projekcie.

Program jest nadal rozwijany, najnowsze wersje jak i dokumentacje można znaleźć w Internecie na stronie [13].

2 Zestaw obserwacyjny

Najprostszy i najtańszy zestaw do obserwacji astronomicznych można zbudować wykorzystując:

- kamerę internetową z sensorem CCD, np. Vesta PCVC 750K, firmy **Philips**,
- obiektyw fotograficzny, np. 58 mm f/2,0 od aparatu **Zenith**, 50 mm f/1,8 od aparatu **Praktica**,
- przejściówkę obiektyw – kamera,
- statyw,
- komputer z portem USB i odpowiednim oprogramowaniem – w opisywanym przypadku program **AudeLa** i **SkyEye**.

Przykładowy zestaw pokazano na rysunku 1.



Rysunek 1: Przykładowy zestaw do obserwacji astronomicznych.

Zestaw ten daje pole widzenia ok. $4^{\circ} \times 3^{\circ}$. W kamerach **Philips** zastosowano matrycę **CCD Sony ICX098AK** o przekątnej 1/4 cala, o wymiarach **640 x 480** pikseli, rozmiar piksela **5,6 x 5,6 μm** .

Najpoważniejszym ograniczeniem kamer internetowych jest krótki czas naświetlania, bez przerabiania układu elektronicznego kamery można osiągnąć maksymalnie 0,2 s. Taki krótki czas naświetlania ma jednak jedną zaletę, w proponowanym zestawie niepotrzebny jest mechanizm prowadzący. Maksymalne przesunięcie obrazu gwiazdy spowodowane obrotem Ziemi, przy czasie naświetlania 0,2 s, nie przekracza rozmiaru piksela.

Możliwa jest także modyfikacja układu elektronicznego kamery pozwalająca na prowadzenie dowolnie długich ekspozycji. Szczegóły modyfikacji można znaleźć na stronach [10], [11].

3 Instalacja, kompilacja

Pakiet **AudeLa** (bazowy dla projektu **SkyEye**) dostępny jest na stronie [12] (źródła, wersja instalacyjna dla Windows), biblioteka **libskyeye** oraz niezbędne skrypty dostępne są na stronie [13]. Katalog **Tycho-2** dostępny jest na oficjalnej stronie [9] lub na stronie [13]. Należy go skopiować do dowolnego katalogu na dysku i ustawić jego położenie w konfiguracji programu **AudeLa** – menu **Setup/Aud’ACE/Folders...**, pole **Catalogue Folder**.

3.1 Linux

AudeLa (wersja 1.2.3), prócz podstawowych pakietów (gcc, autoconf, make) wymaga wcześniejszego zainstalowania:

- tcl wersja ≥ 8.4 ,
- tk wersja ≥ 8.4 ,
- gsl,
- BLT2.4z,
- pwc (sterownik kamer internetowych Philips) wersja ≥ 8.8 , (dostępny w jądrze Linux $\geq 2.4.21$).

Ściągnięte źródła pakietu należy rozpakować w katalogu domowym, następnie przejść do katalogu `~/audela-x.x/dev` (`x.x` oznacza numer aktualnej wersji), stworzyć i wywołać skrypt konfiguracyjny, za pomocą programu `make` rozpocząć kompilację:

```
> cd ~/audela-x.x/dev
> autoconf configure.in > configure
> chmod +x configure
> ./configure
> make
```

Przed uruchomieniem pakietu należy dodać do zmiennej środowiskowej **LD_LIBRARY_PATH** ścieżkę do `~/audela-x.x/binlinux`:

```
> export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$HOME/audela-x.x/binlinux
```

Program **AudeLa** należy uruchamiać z katalogu `~/audela-x.x/binlinux`

```
> cd ~/audela-x.x/binlinux
> ./audela
```

Szczegółowy opis instalacji konkretnej wersji pakietu znajduje się w pliku `~/audela-x.x/dev/readme.txt`

3.2 Windows

Najprostrzym sposobem instalacji pakietu **AudeLa** jest ściągnięcie i uruchomienie wersji instalacyjnej, pliku `audela-x.x.exe`. Aby dokonywać zmian w oprogramowaniu należy ściągnąć jego źródła. Do ich kompilacji potrzebny jest program **Visual Studio C++** wersja ≥ 6.0 .

Ściągnięte źródła należy rozpakować w katalogu głównym na dysku **C:**, następnie przejść do katalogu `C:\audela-x.x\dev\libaudela\vc60` i kliknąć na `libaudela.mdp`, wybrać sposób kompilacji: **Release**. Operację należy powtórzyć dla każdej biblioteki (katalogu) w `C:\audela-x.x\dev`.

Szczegółowy opis instalacji konkretnej wersji pakietu znajduje się w pliku `C:\audela-x.x\dev\readme.txt`.

Instalacja **SkyEye** polega na przekopiowaniu pobranych ze strony [13] biblioteki `libskyeye.dll` do katalogu `C:\audela-x.x\binwin` oraz sktyptu `skyeye_interface.tcl` do katalogu `C:\audela-x.x\scripts`.

4 SkyEye

4.1 Ogólny schemat działania

Ogólny schemat działania algorytmu pomiaru blasku gwiazd zmiennych, zaimplementowanego w projekcie **SkyEye**, przedstawiono na rysunku 2. **SkyEye** jest kompletnym systemem, który zbiera i analizuje pomiary. W celu wizualizacji algorytmu możliwa jest praca krokowa programu.

Pierwszym etapem jest uzyskanie zdjęć nieba, które mogą pochodzić bezpośrednio z kamery internetowej lub plików FITS.

Następnym etapem jest przetwarzanie wstępne. Od zebranych obrazów odejmowana jest, wcześniej przygotowana, „ciemna klatka”. Gdy użytkownik tego zażąda kilka kolejnych zdjęć zostanie odpowiednio przesuniętych i nałożonych na siebie (daje to zwiększenie zasięgu obserwacji przy krótkich czasach naświetlania).

Następnym etapem jest detekcja gwiazd, eliminacja obiektów nie gwiazdowych i fotometria aperturowa. W ten sposób tworzone są instrumentalne listy gwiazd, mogą zostać zapisane do plików tekstowych bądź pozostać w pamięci operacyjnej do dalszego wykorzystania.

Kolejny etap to kalibracja astrometryczna. Każde zdjęcie (obiekt **buf**) powinno posiadać współrzędne środka ekspozycji oraz rozmiar piksela. Jeśli brak tych zmiennych w nagłówku FITS pliku ze zdjęciem, użytkownik musi zadeklarować je ręcznie. Znając przybliżony obszar, jaki zajmuje zdjęcie na niebie, pobierana jest z katalogu **TYCHO-2** lista gwiazd mu odpowiadająca. Następnie obie listy są dopasowywane, współrzędne z listy instrumentalnej zostają przeliczone na współrzędne równikowe równonocne.

Kolejnym etapem jest kalibracja fotometryczna, jasności instrumentalne gwiazd przeliczane są na jasności obserwowane. Tak powstałe listy gwiazd zostają uzupełnione o czas i datę ekspozycji i zapisane w bazie pomiarów.

Po zakończeniu obserwacji użytkownik może wybrać z bazy konkretną gwiazdę i wykreślić jej krzywą blasku, lub wykreślić diagram zmienności dla obserwowanego pola – pozwala to typować gwiazdy zmienne.

4.2 Uruchomienie programu AudeLa

4.2.1 Linux

Przejdź do katalogu `~/audela.x.x/binlinux` i wykonaj komendę `./audela`.

4.2.2 Windows

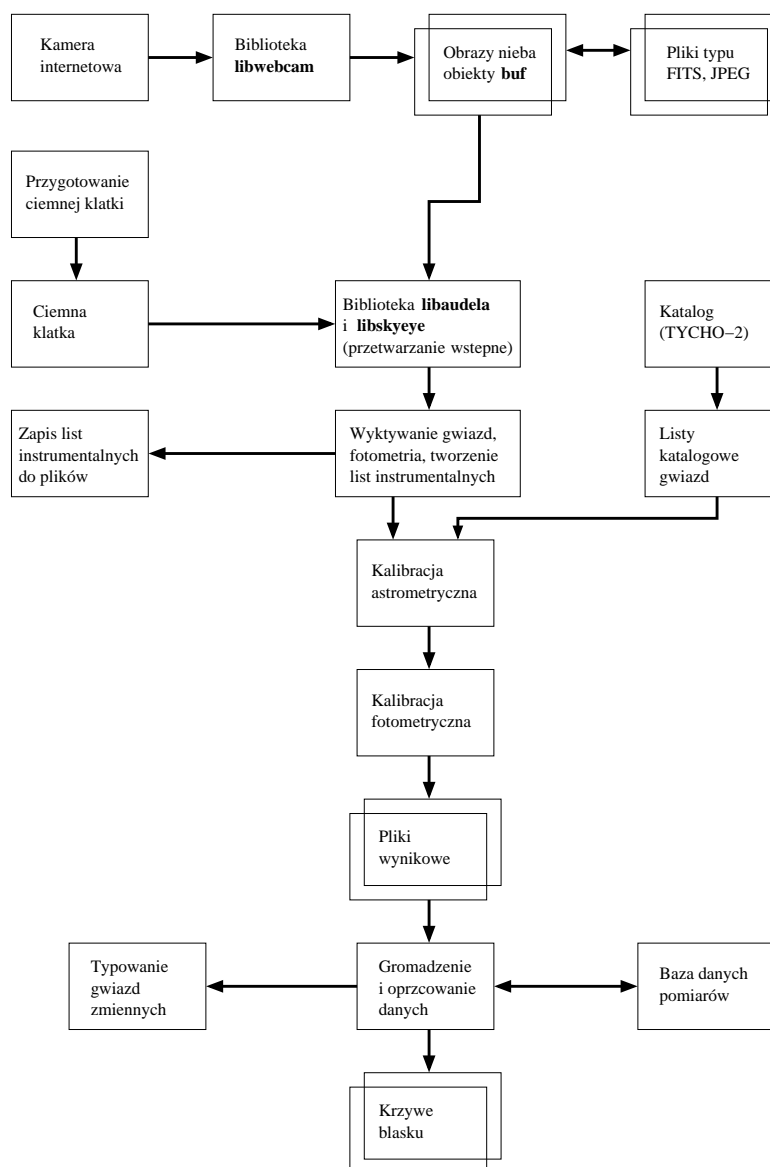
Przejdź do katalogu `C:\audela-x.x\binwin` i wskaźnikiem stałokulotocznym wykonaj dwukrotnie kliknięcie na pliku `audela.exe` lub ikonkę **AudeLa** znajdującej się na pulpicie.

4.3 Interfejs graficzny programu AudeLa

W skład interfejsu graficznego pakietu **AudeLa** wchodzi (rysunek 3):

- główne okno
- konsola

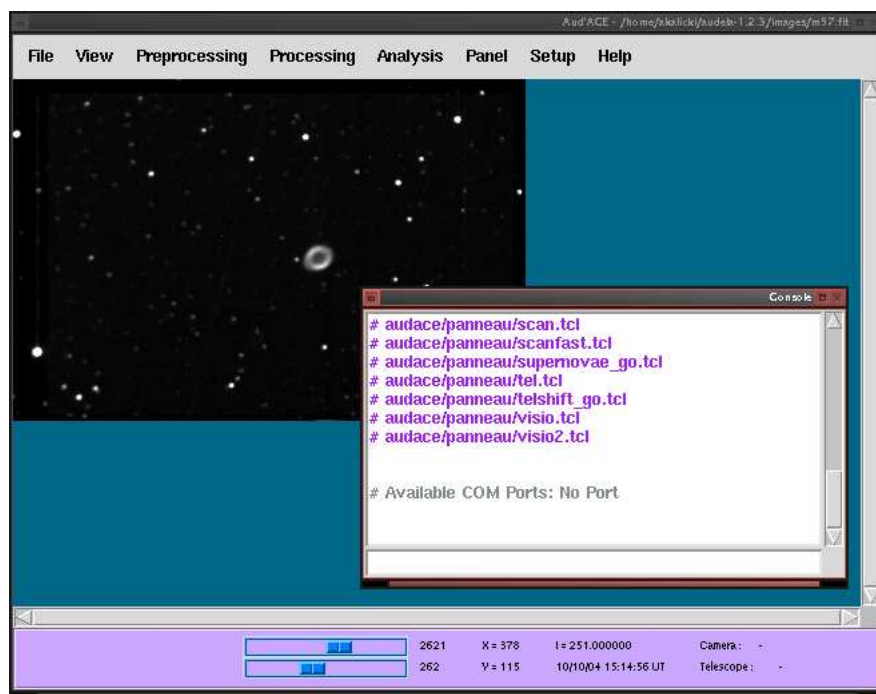
Główne okno wyposażone jest w menu:



Rysunek 2: Schemat pomiarów zmian blasku gwiazd zmiennych.

- **File:** odczytanie, zapisanie obrazu, stworzenie, edycja i wykonanie skryptów, wyjście z programu.
- **View:** sposób wizualizacji, powiększenie, wizualizacja nagłówka FITS.
- **Preprocessing:** przetwarzanie wstępne otwartego obrazu, różnego rodzaju filtry.
- **Analysis:** analiza obrazu, np. histogram, statystyki, dopasowanie funkcji Gaussa.
- **Panel:** wybór panelu np. do akwizycji obrazów czy animacji serii obrazów.
- **Setup:** ustawienia programu, np. kamery, teleskopu, miejsca obserwacji,
- **Help:** informacje o autorach, spis funkcji, skrót do oficjalnej strony projektu.

Konsola posiada dwa pola, w górnym wyświetlane są komunikaty, z dolnego możliwe jest wydawanie poleceń (w języku **TCL** [15]).



Rysunek 3: AudeLa – interfejs graficzny.

4.4 Uruchomienie SkyEye

W menu **File** należy kliknąć **Run a script** i wybrać plik `skyeye_interface.tcl`. Uruchomi się okno dialogowe **SkyEye** z wyborem **Preprocessing** – panel **Variable stars** lub **Data analysis**. Obydwa panele opisano poniżej.

Dla ułatwienia zrozumienia obsługi **SkyEye**, przy okazji opisu parametrów programu, przedstawione zostaną ustawienia dla przykładowej obserwacji gwiazdy **RZ Cassiopeiae (RZCas)**, przeprowadzonej podczas zaćmienia głównego w nocy 12.02.2003 / 13.02.2003. Obserwacje wykonane były jako kilkadziesiąt serii 2,5 sekundowych ekspozycji za pomocą kamery internetowej Philips PCVC750K przystosowanej do długich czasów ekspozycji.

Potrzebne dane można ściągnąć ze strony [13]. Są tam obrazy w formacie FITS z jednej serii obserwacji oraz kompletna baza danych pomiarów z całej obserwacji.

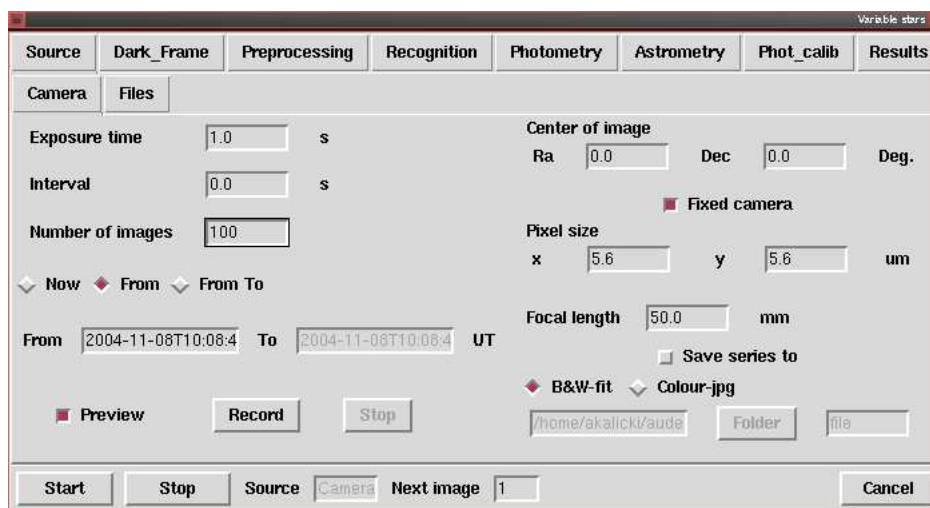
RZ Cassiopeiae to zmienna zaćmieniowa. Wykresy jej zmienności (zaćmienia głównego) przedstawione są na rysunkach 18 i 19. Drugi rysunek powstał poprzez zgrupowanie po trzy i uśrednienie kolejnych punktów. Okres zmienności 1.195247d, położenie (2000) 02h48m56s +69°37'58", zakres zmienności 6.16 do 7.90.

4.5 Panel Variable stars

W skład panelu wchodzi zakładki:

- **Source:** wybór źródła obrazów,
 - **Camera:** źródłem obrazów jest kamera, powinna zostać wcześniej skonfigurowana, menu Setup/Camera, (rysunek 4),
 - **Files:** źródłem obrazów staje się seria plików, (rysunek 5),

- **Dark Frame:** wybranie z pliku lub przygotowanie „ciemnej klatki”,
- **Preprocessing:** przetwarzanie wstępne obrazu,
- **Recognition:** rozpoznawanie gwiazd i eliminacja obiektów niegwiazdowych,
- **Photometry:** fotometria aperturowa,
- **Astrometry:** kalibracja astrometryczna,
- **Photometry calibration:** kalibracja fotometryczna,
- **Results:** baza wyników pomiarów.



Rysunek 4: Panel **Variable stars**, wybór źródła obrazu: kamera.

W dolnej części okna znajduje się pasek komend i stanu aplikacji. Po ustawieniu parametrów (w kolejnych zakładkach) proces pomiarowy uruchamia się za pomocą przycisku **Start**, można go zatrzymać w dowolnym momencie za pomocą **Stop**. Możliwa jest też praca krokowa algorytmu, obserwacja kolejnych etapów – na kolejnych zakładkach za pomocą przycisków **View image** lub **View list**.

Podczas pracy programu wystąpienie błędu lub innego problemu (np. niemożności dopasowania list) zasygnalizowane zostanie wyświetleniem odpowiedniego komunikatu. W zależności od reakcji użytkownika proces będzie dalej kontynuowany lub zostanie przerwany.

4.5.1 Source, Camera

Wybór źródła obrazów: kamera (rysunek 4), należy ustawić tu parametry takie jak:

- czas ekspozycji (**Exposure time**),
- opóźnienie pomiędzy kolejnymi ekspozycjami (**Interval**),
- liczba klatek (**Number of images**)
- zaplanowanie obserwacji:

- **Now** powoduje zapoczątkowanie akwizycji obrazów w momencie uruchomienia procesu pomiarowego,
 - **From** powoduje opóźnienie początku akwizycji obrazów do podanego czasu (format RRRR-MM-DDTgg:mm:ss, w czasie UT),
 - **From To** powoduje przeprowadzenie obserwacji w wybranym przedziale czasowym,
- wizualizacja kolejnych zdjęć pochodzących z kamery, zaznaczenie **Preview**,
 - środek fotografowanego pola nieba **Center of image** (we współrzędnych równikowych) – należy go dokładnie określić dla zapewnienia prawidłowości działania dalszej części aplikacji (np. podać współrzędne obserwowanej gwiazdy),
 - czy kamera jest nieruchoma, jeśli jest nieruchoma zaznaczyć opcję **Fixed camera**. Podany wcześniej środek ekspozycji uznawany jest za środek pierwszego zdjęcia, środki kolejnych obrazów obliczane są ze znajomości czasu i miejsca obserwacji. Miejsce obserwacji należy prawidłowo podać w menu **Setup/Aud’ACE/Observer Location**, czas obserwacji pobierany jest z zegara systemowego – do ustawienia tych parametrów pomocne będą informacje zawarte na stronach [21] i [22],
 - rozmiary piksela zastosowanego sensora CCD **Pixel size** (dla kamer internetowych **Philips** jest to 5,6 x 5,6 μm),
 - długość ogniskowej zastosowanego obiektywu (teleskopu) **Focal length**, np. dla obiektywu od aparatu **Praktica** jest to 50 mm, a **Zenit** 58 mm,
 - **Save series to** – zaznaczenie tej opcji powoduje zapisanie serii obrazów z kamery do podanego katalogu do plików o danym rdzeniu nazwy (np. nazwa1.fit) w formacie czarno-białych plików FITS **B&W-fit** lub kolorowych jpeg **Colour-jpg**,

Sam proces akwizycji obrazów można uruchomić przez naciśnięcie przycisku **Record** a zatrzymać **Stop**.

4.5.2 Source, Files

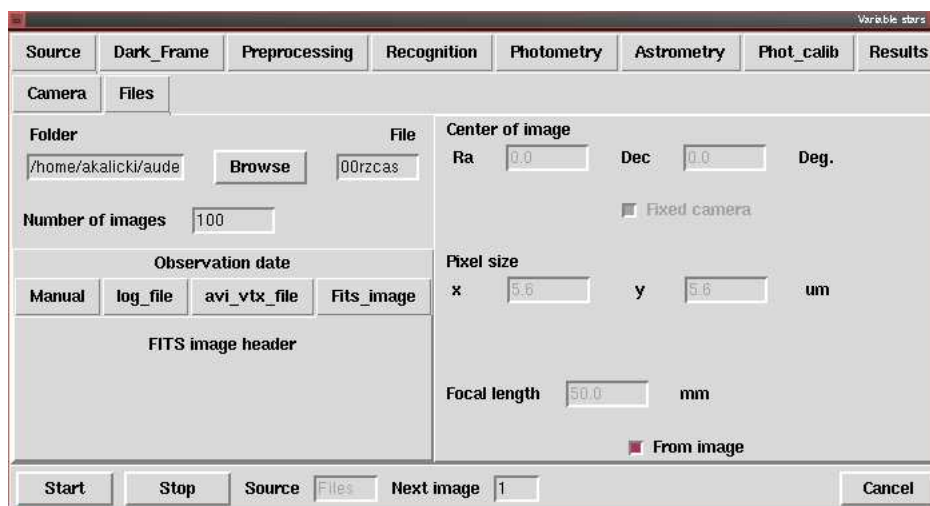
Wybór źródła obrazów: seria plików FITS (rysunek 5) o zadanym rdzeniu nazwy **File** (np. nazwa1.fit), znajdujących się w podanym katalogu **Folder**.

Jeśli nagłówki plików nie zawierają odpowiednich informacji należy odznaczyć opcję **From image** i podać (jak dla kamery) środek pola obserwacji, czy kamera była nieruchoma, rozmiary piksela oraz długość ogniskowej obiektywu.

Aplikacja wymaga, aby w nagłówkach plików FITS znajdowała się informacja o miejscu obserwacji (jeśli jej brak to pobierana jest z ustawień programu **AudeLa**).

Czas obserwacji kolejnych klatek ustawia się w **Observation date**, należy wybrać jedną z klatek:

- **Manual** odpowiada ręcznemu ustawieniu daty początku obserwacji **Observation started**, czasu ekspozycji **Exposure time** (tylko informacyjnie, nie jest liczony do opóźnienia) i opóźnienia pomiędzy kolejnymi klatkami **Interval**,
- **log_file** powoduje odczyt tych danych z pliku .log, generowanych podczas pobierania obrazów przez program **K3CCD Tools** [19],



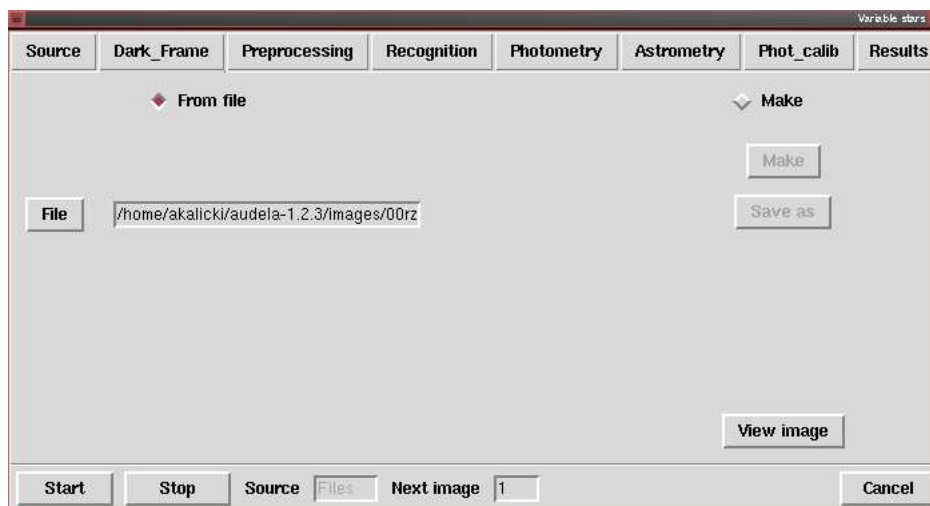
Rysunek 5: Panel **Variable stars**, wybór źródła obrazu: pliki.

- **avi_vtx_file** z pliku .avi .xvt,
- **Fits_image** bezpośrednio z nagłówka odczytywanego pliku FITS.

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** wybieramy źródło obrazów: seria plików FITS, położenie katalogu z obrazami, nazwę pliku 00rzcas, zaznaczamy **From image** i wybieramy zakładkę **Fits_image**.

4.5.3 Dark Frame



Rysunek 6: Panel **Variable stars**, wybór i przygotowanie ciemnej klatki.

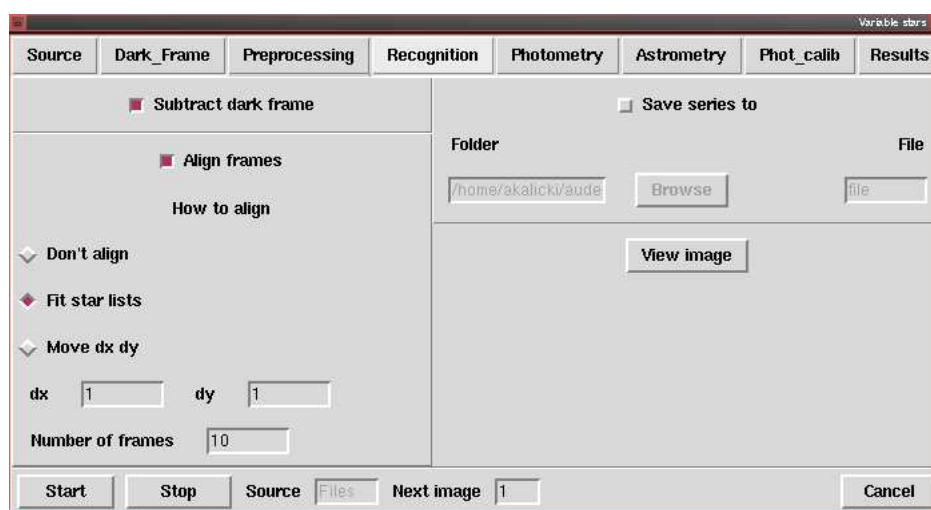
Wybór lub przygotowanie ciemnej klatki (rysunek 6). Jeśli w procesie przetwarzania wstępnego zaznaczono opcję odejmowania ciemnej klatki należy w tym miejscu podać położenie pliku ją zawierającego.

Zakładka ta umożliwia też wykonanie i zapisanie ciemnej klatki, w tym celu należy nacisnąć przycisk **Make** – ciemna klatka stworzona zostanie jako średnia obrazów określonych przez **Source**, przycisk **Save as** umożliwia zapisanie jej do pliku, **View image** pokazanie wybranej klatki.

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** wybieramy w tym miejscu plik `dark.fit` zawierający ciemną klatkę. Możemy go wyświetlić za pomocą **View image**.

4.5.4 Preprocessing



Rysunek 7: Panel **Variable stars**, przetwarzanie wstępne.

Przetwarzanie wstępne (rysunek 7), należy ustawić tu parametry takie jak:

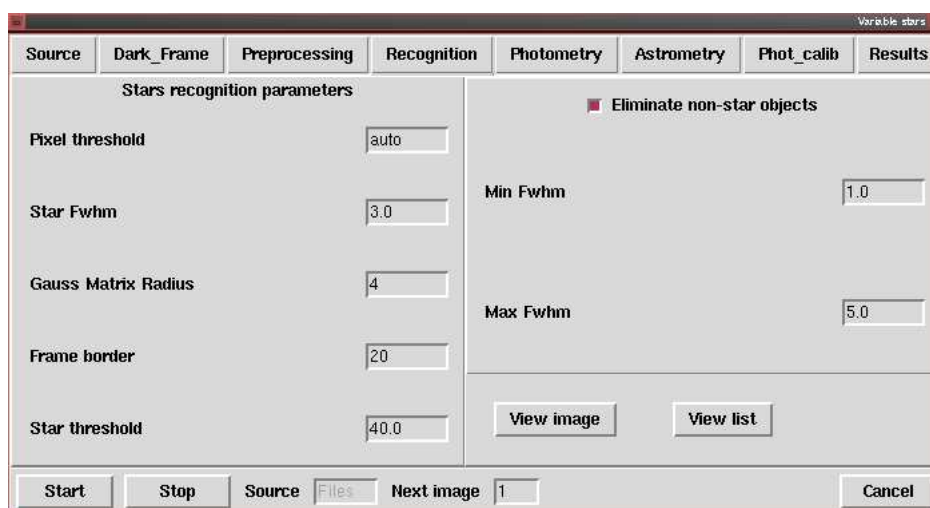
- opcjonalne odjęcie od każdego obrazu ciemnej klatki **Subtract dark frame**,
- przesuwanie i dodawanie klatek **Align frames** – opcja ta przydaje się gdy obserwacje prowadzone są kamerą z krótkim czasem naświetlania, gdy zostanie zaznaczona należy dodatkowo wybrać liczbę **Number of frames** i sposób nakładania klatek:
 - **Don't align** – kolejne obrazy dodawane są bez przesuwania,
 - **Fit star lists** – wyznaczenie przesunięcia odbywa się przez dopasowanie list gwiazd z kolejnych obrazów (domyślne parametry metody rozpoznawania gwiazd), metoda uwzględnia zarówno przesunięcie i obrót, może być nieskuteczna gdy na obrazie zostanie wykrytych niewiele gwiazd.
 - **Move dx dy** – kolejne obrazy przesuwane są o wartości dx i dy, bez obracania.
- zaznaczając **Save series to** można zapisać tak powstałe obrazy do plików.

Przycisk **View image** pozwala na wizualizację kolejnego obrazu.

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** zaznaczamy tu **Subtract dark frame**, **Align frames** z opcją **Fit star lists** i liczbą klatek do nałożenia **Number of frames** równą 10. Naciśnięcie **View image** spowoduje uruchomienie procedury i wyświetlenie wynikowego obrazu.

Podczas analizy danych z innych obserwacji mogą zdarzyć się klatki z małą ilością widocznych gwiazd, wtedy przesuwanie i nakładanie klatek metodą **Fit star lists** może okazać się niemożliwe. Jedynym sposobem pozostaje nakładanie metodą **Move dx dy**. Parametry **dx**, **dy** można wyliczyć dość prosto, np. nakładając bez przesunięcia 30 klatek, zmierzyć przesunięcie danej gwiazdy (długość śladu) w poziomie i pionie. Wartości podzielone przez liczbę klatek (30) podstawić za **dx** i **dy**. Metoda sprawdzi się jeśli zdjęcia wykonywane były w stałych odstępach czasu.

4.5.5 Recognition

Rysunek 8: Panel **Variable stars**, rozpoznawanie gwiazd.

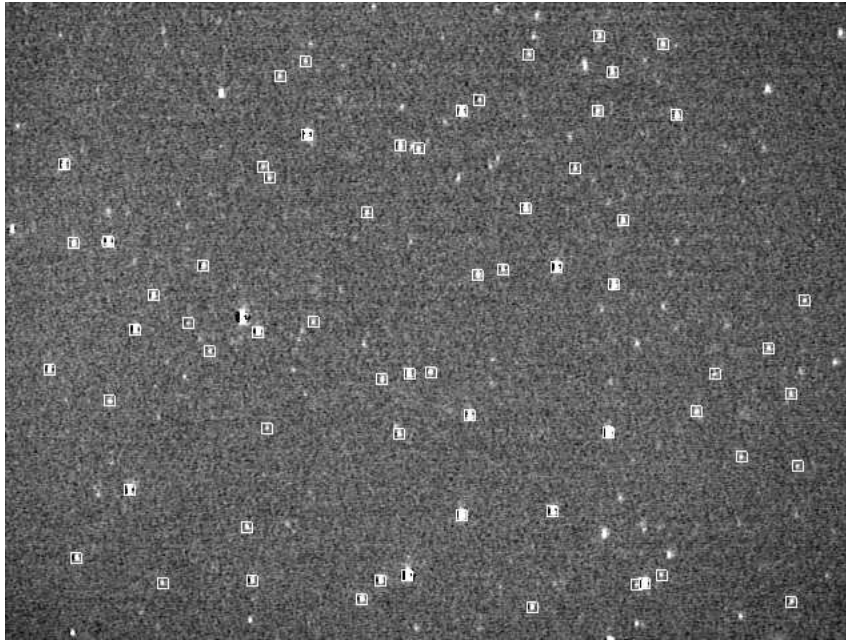
Rozpoznawanie gwiazd (rysunek 8), parametry metody **Stars recognition parameters** (patrz opis parametrów w rozdziale 5.3.1).

Proces eliminacji obiektów niegwiazdowych na podstawie ich kształtu można wyłączyć odznaczając opcję **Eliminate non-star objects**. Przycisk **View image** służy do wizualizacji obrazu wraz z zaznaczonymi wykrytymi gwiazdami, **View list** pozwala wyświetlić listę wykrytych gwiazd.

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** zostawiamy tu domyślne wartości parametrów **Stars recognition parameters** i zaznaczamy **Eliminate no stars**. Następnie naciskamy **View image** – wyświetlony zostanie obraz z zaznaczonymi wykrytymi gwiazdami (rysunek 9). Za pomocą **View list** możemy wyświetlić listę znalezionych gwiazd, np.

```
DATA: NO_PHOTOMETRY
Lp.  X Y magInstr
1 396 27 159.565
2 591 31 105.115
3 269 33 188.094
```

Rysunek 9: Zaznaczone wykryte gwiazdy z obserwacji **RZCas**.

```

4 119 45 115.021
5 481 45 603.234
6 187 47 192.202
7 283 47 339.196
8 303 51 2301.95
9 493 51 79.191
...

```

Pola listy to: numer porządkowy gwiazdy, położenie gwiazdy we współrzędnych obrazu X i Y oraz jasność piksela wybranego jako jej środek.

4.5.6 Photometry

Fotometria aperturowa (rysunek 10), parametry metody **Aperture photometry parameters** (patrz opis algorytmu i parametrów w rozdziale 5.4). Wynikiem metody jest lista zawierająca instrumentalne jasności gwiazd. Za pomocą przycisku **View list** możliwe jest wyświetlenie listy, zaznaczenie opcji **Save lists to** umożliwi zapis kolejnych list do plików.

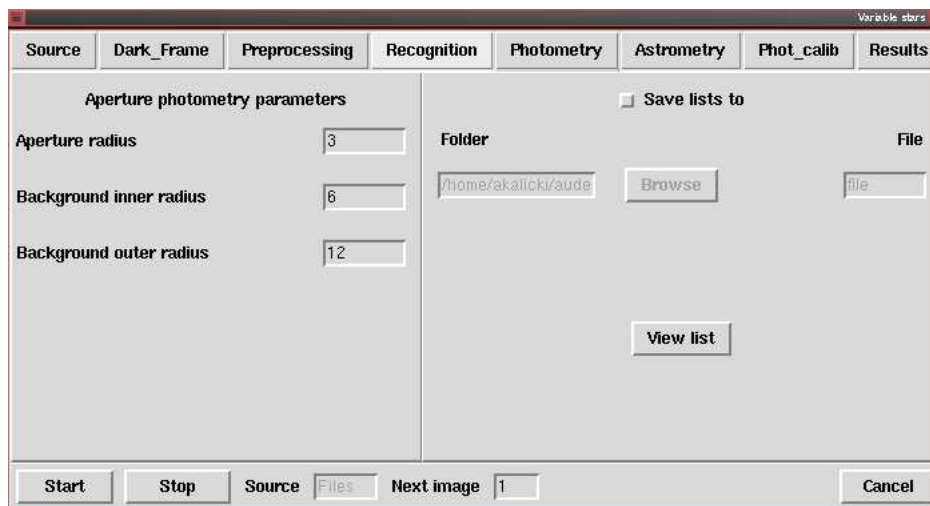
Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** zostawiamy tu domyślne wartości parametrów **Aperture photometry parameters** i naciskamy **View list**. Wyświetlona zostanie lista gwiazd, np.

```

DATE-OBS: 2003-02-12T22:17:00
OBS-LOC: "GPS 21.376722 E 52.659778 142"
DEC: 68.9
RA: 42.75
FOCLEN: 0.058

```



Rysunek 10: Panel **Variable stars**, fotometria aperturowa.

```

EXPOSURE: 2.36
PIXSIZE1: 5.6
PIXSIZE2: 5.6
NAXIS1: 640
NAXIS2: 480
DATA: APERTURE_PHOTOMETRY_DONE
Lp. X Y magInstr
1 396 27 -8.77836
2 269 32 -8.8643
3 475 44 -7.66793
4 481 44 -10.4337
5 186 47 -9.04572
6 283 47 -9.20074
7 303 50 -12.0003
8 55 63 -9.04685
...

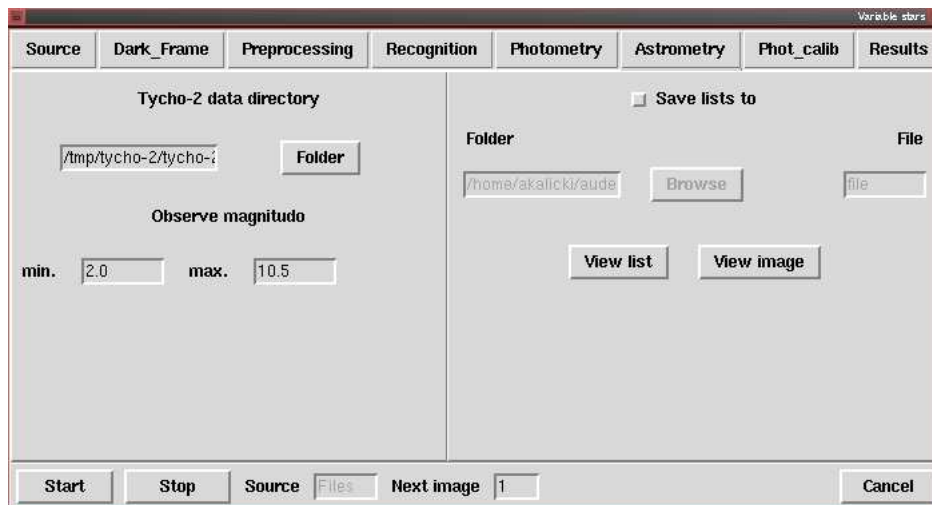
```

Pola listy to:

- data obserwacji **DATE-OBS**,
- położenie miejsca obserwacji **OBS-LOC**,
- współrzędne środka obserwacji **DEC** i **RA**,
- długość ogniskowej **FOCLEN**,
- czas ekspozycji **EXPOSURE**,
- rozmiary piksela **PIXSIZE1** i **PIXSIZE2**,
- rozmiary oryginalnego obrazu **NAXIS1** i **NAXIS1**,
- typ listy **DATA**

- numer porządkowy gwiazdy, położenie gwiazdy we współrzędnych obrazu X i Y oraz jej jasność instrumentalna.

4.5.7 Astrometry



Rysunek 11: Panel **Variable stars**, kalibracja astrometryczna.

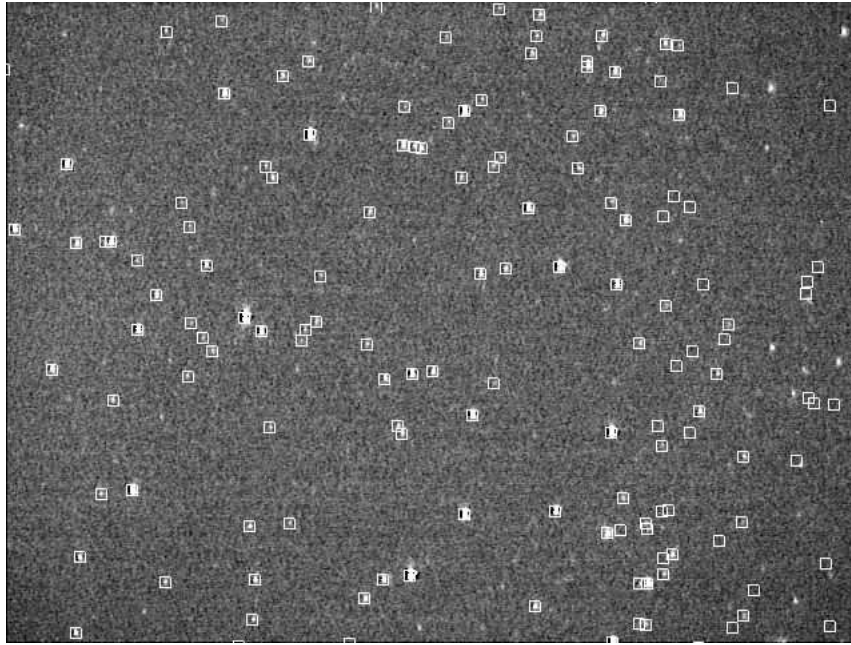
Kalibracja astrometryczna (rysunek 11). Należy ustawić tu położenie katalogu Tycho-2/data **Tycho-2 data directory**. Położenie wyszukiwanego w katalogu regionu obliczane jest na podstawie podanych wcześniej parametrów: środka ekspozycji, rozmiarów piksela, długości ogniskowej obiektywu oraz rozmiarów zdjęcia. W celu ograniczenia liczby gwiazd katalogowych dla algorytmu dopasowywania list katalogowych i instrumentalnych należy podać zakres jasności obserwowanych gwiazd **Observe magnitudo**: min. i max. magnitudo.

Zaznaczając opcję **Save lists to** można zapisać do plików tak dopasowane listy instrumentalne. Przycisk **View list** służy do wizualizacji kolejnej listy. Przycisk **View image** służy do wizualizacji dopasowania na oryginalnym obrazku – gwiazdy katalogowe zaznaczone kwadratami. Przy nieudanym dopasowaniu kwadraty nie pokrywają się z gwiazdami na obrazku.

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** wybieramy położenie **Tycho-2 data directory** oraz zakres obserwowanych gwiazd **Observe magnitudo**: min. 2.0 i max. 10.5 magnitudo. Po naciśnięciu **View list** i udanym dopasowaniu wyświetlona zostanie lista gwiazd, po naciśnięciu **View image** wyświetlony będzie obraz z dopasowanymi gwiazdami, rysunek 12. Wyświetlona lista gwiazd będzie miała postać, np.

```
DATE-OBS: 2003-02-12T22:16:26
OBS-LOC: "GPS 21.376722 E 52.659778 142"
DEC: 68.9
RA: 42.75
FOCLEN: 0.058
EXPOSURE: 2.51
PIXSIZE1: 5.6
```



Rysunek 12: Udana dopasowanie do katalogu, zaznaczone kwadratami gwiazdy katalogowe, obserwacja **RZCas**

```

PIXSIZE2: 5.6
NAXIS1: 640
NAXIS2: 480
DATA: ASTROMETRY_CALIBRATION_DONE
Lp. RA DEC magInstr
1 39.8785 67.6745 -8.783
2 37.0873 67.6179 -8.26625
3 41.6997 67.7326 -9.02683
4 43.8614 67.8016 -8.37317
5 38.6432 67.7441 -10.4194
6 42.8795 67.8144 -8.97252
7 41.4931 67.8071 -9.44448
8 41.2027 67.8259 -11.9571
...

```

Pola listy to:

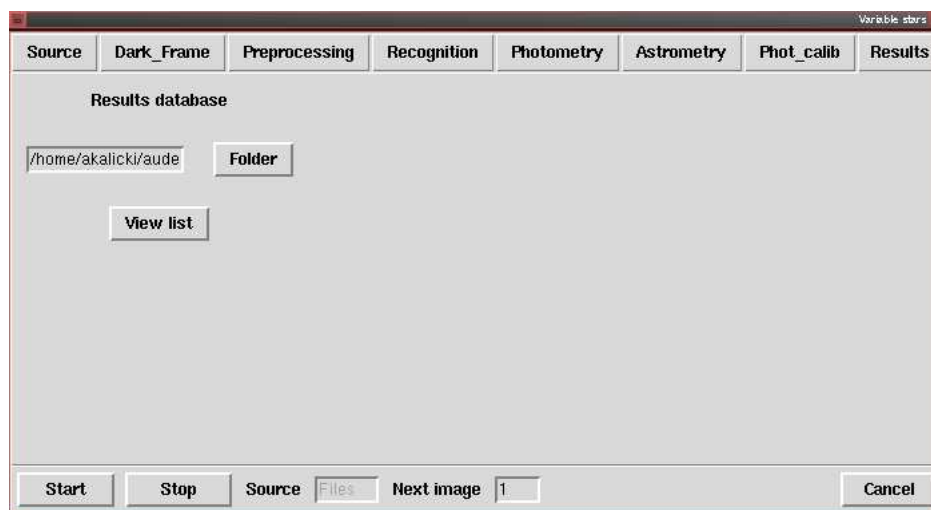
- data obserwacji **DATE-OBS**,
- położenie miejsca obserwacji **OBS-LOC**,
- współrzędne środka obserwacji **DEC** i **RA**,
- długość ogniskowej **FOCLEN**,
- czas ekspozycji **EXPOSURE**,
- rozmiary piksela **PIXSIZE1** i **PIXSIZE2**,

- rozmiary oryginalnego obrazu **NAXIS1** i **NAXIS1**,
- typ listy **DATA**
- numer porządkowy gwiazdy, położenie gwiazdy w obliczonych współrzędnych równikowych równonocnych RA i DEC oraz jej jasność instrumentalna.

4.5.8 Photometry calibration

Kalibracja fotometryczna, zakładka zarezerwowana na przyszłość. W obecnej implementacji ustawienia algorytmu kalibracji fotometrycznej dobierane są automatycznie.

4.5.9 Results



Rysunek 13: Panel **Variable stars**, rezultaty pomiarów, położenie bazy pomiarów.

Rezultaty pomiarów (rysunek 13), położenie bazy pomiarów – należy podać katalog gdzie przechowywane są listy obserwowanych gwiazd. Przycisk **View list** powoduje wyświetlenie kolejnej listy gwiazd.

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** wybieramy katalog w którym będzie przechowywana baza pomiarów. Po naciśnięciu **View list** wyświetlona zostanie lista gwiazd wraz ze zmierzoną ich jasnością obserwowaną, będzie miała postać, np.

```
DATE-OBS: 2003-02-12T22:16:26
OBS-LOC: "GPS 21.376722 E 52.659778 142"
DEC: 68.9
RA: 42.75
FOCLEN: 0.058
EXPOSURE: 2.51
PIXSIZE1: 5.6
PIXSIZE2: 5.6
```

```

NAXIS1: 640
NAXIS2: 480
DATA: ASTROMETRY_AND_PHOTOMETRY_CALIBRATION_DONE
Lp. RA catRA DEC catDEC ObservMagn CatalogMagn Name
1 42.9924 42.9948 68.8891 68.8885 5.98056 6.037 "4313 01573 1"
2 41.2027 41.207 67.8259 67.8247 6.14315 5.961 "4312 01404 1"
3 38.9216 38.9324 68.369 68.3678 6.61055 6.679 "4312 01101 1"
4 42.2379 42.2313 69.6346 69.6342 6.65452 6.283 "4317 01793 1"
5 40.5846 40.5946 68.0633 68.0644 7.05035 7.197 "4312 00322 1"
6 39.3881 39.3926 69.0574 69.0569 7.34639 7.446 "4312 00587 1"
7 44.2268 44.2325 68.1758 68.1779 7.59554 7.553 "4313 00433 1"
8 39.591 39.597 68.0619 68.0613 7.64469 7.711 "4312 00510 1"
...

```

Pola listy to:

- data obserwacji **DATE-OBS**,
- położenie miejsca obserwacji **OBS-LOC**,
- współrzędne środka obserwacji **DEC** i **RA**,
- długość ogniskowej **FOCLEN**,
- czas ekspozycji **EXPOSURE**,
- rozmiary piksela **PIXSIZE1** i **PIXSIZE2**,
- rozmiary oryginalnego obrazu **NAXIS1** i **NAXIS1**,
- typ listy **DATA**
- numer porządkowy gwiazdy **Lp.**, położenie gwiazdy w obliczonych współrzędnych równikowych równonocnych **RA** i **DEC** oraz we współrzędnych katalogowych **catRA** i **catDEC**. Następnie jasność obserwowana **ObservMagn** i jasność katalogowa **CatalogMagn** gwiazdy oraz jej nazwa katalogowa **GSC Name**. W przypadku nie rozpoznania w katalogu danej gwiazdy w miejsce parametrów katalogowych (catRA, catDEC, CatalogMagn) wstawiane są wartości ujemne -1000, zamiast nazwy katalogowej wstawiany jest tekst **imageStar**. Odpowiedniki nazwy GSC gwiazd można znaleźć za pomocą mapy nieba *Cartes du Ciel*, dostępnej na stronie [23].

Całość procesu przetwarzania uruchamiamy przyciskiem **Start** na dole panelu **Variable stars**. Przeanalizuje on wszystkie pliki obrazów i wyniki pomiarów zapisze w katalogu bazy danych.

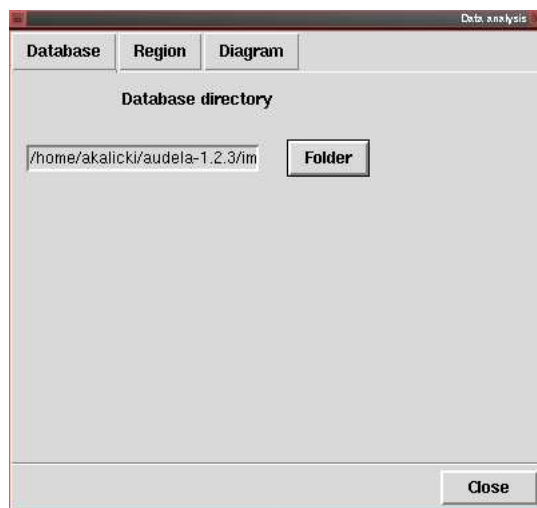
Następny krok, czyli analiza pomiarów przedstawiono poniżej.

4.6 Panel Data analysis

W skład panelu wchodzi zakładki (rysunek 14):

- **Database**: – położenie katalogu z baza pomiarów,
- **Region** – wybór regionu i czasu obserwacji,
- **Diagram** – wyświetlenie diagramu zmienności obserwowanego pola lub wybranej gwiazdy.

4.6.1 Database



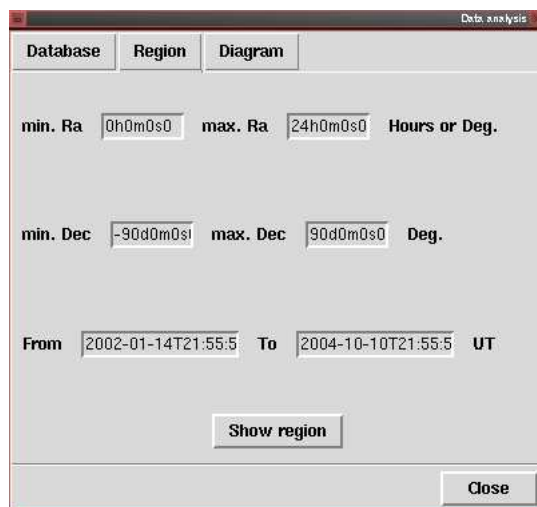
Rysunek 14: Panel **Data analysis**, położenie bazy pomiarów.

Położenie katalogu z baza pomiarów (rysunek 14).

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** wybieramy katalog w którym w którym znajduje się baza pomiarów tej gwiazdy.

4.6.2 Region



Rysunek 15: Panel **Data analysis**, wybór regionu i czasu obserwacji.

Wybór regionu i czasu obserwacji (rysunek 15). Przycisk **Show region** wyświetla mapę regionu (znajdujące się w nim obserwowane gwiazdy). Aktualna implementacja wyświetlenia mapy regionu

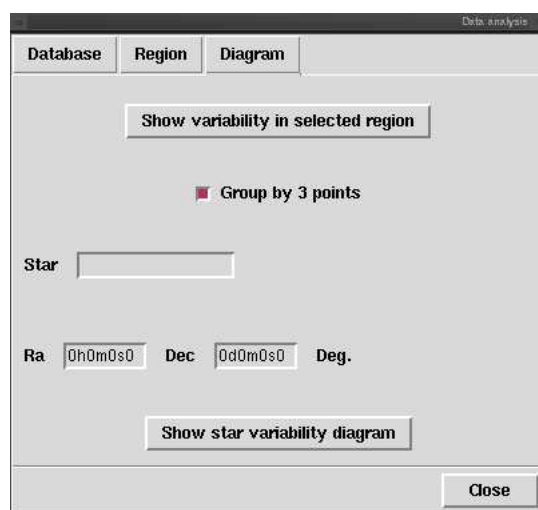
nie odwzorowuje prawidłowo rzeczywistego rozmieszczenia gwiazd. Wybranie i naciśnięcie lewym klawiszem myszy na gwiazdę powoduje wyświetlenie jej diagramu zmienności.

Naciśnięcie prawego klawisza myszy powoduje powiększenie wykresu, a z klawiszem „Ctrl” zmniejszenie, naciśnięcie lewego klawisza razem z „Ctrl” umożliwia zapisanie wykresu do pliku **PostScript** (*.ps).

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** klikamy **Show region**. Wyświetla zostanie mapa regionu. Aby powiększyć naciskamy prawy klawisz myszy.

4.6.3 Diagram



Rysunek 16: Panel **Data analysis**, wyświetlenie diagramu zmienności obserwowanego pola lub wybranej gwiazdy.

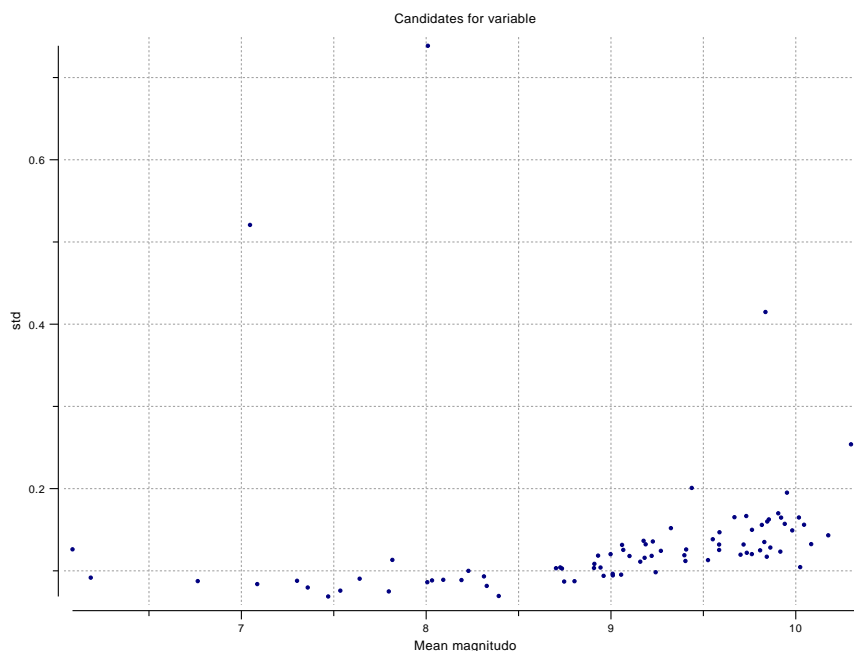
Wyświetlenie diagramu zmienności obserwowanego pola **Show variability in selected region** lub wybranej gwiazdy **Show star variability diagram** (rysunek 16). Zaznaczenie opcji **Group by 3 points** powoduje uśrednienie kolejnych trzech pomiarów na wykresie zmienności gwiazdy co pozwala na zredukowanie błędów statystycznych i zmniejszenie rozrzutu punktów.

Wybranie gwiazdy i naciśnięcie lewym klawiszem myszy na wykresie zmienności obserwowanego pola powoduje wyświetlenie diagramu jej zmienności. Podane są nim dodatkowo parametry takie jak: nazwa gwiazdy z katalogu **Tycho2**, katalogowe położenie gwiazdy, liczba punktów pomiarowych, średnia jasność i czas obserwacji.

Naciśnięcie prawego klawisza myszy powoduje powiększenie wykresu, a z klawiszem „Ctrl” zmniejszenie, naciśnięcie lewego klawisza razem z „Ctrl” umożliwia zapisanie wykresu do pliku **PostScript** (*.ps).

Przykład:

Dla danych z obserwacji **RZCas** klikamy **Show variability in selected region**. Wyświetlony zostanie diagram zmienności pola, następnie klikamy lewym klawiszem myszy na gwiazdę **RZCas** położoną: około 7 magnitudo i około 0.5 std (rysunek 17). Wyświetlony zostanie diagram jej



Rysunek 17: **RZCas**, diagram zmienności obserwowanego pola.

zmienności (rysunek 18). Gdy zaznaczymy opcję **Group by 3 points** punkty pomiarowe zostaną zgrupowane (uśrednione) po trzy, rysunek 19.

Możemy zapisać go do pliku **PostScript** (*.ps) przez naciśnięcie lewego klawisza myszy razem z „Ctrl”.

4.7 Dodatkowe polecenia

W rozdziale tym zawarto opis autorskich poleceń (funkcji) dostępnych bezpośrednio z konsoli oraz możliwych do wykorzystania w skryptach.

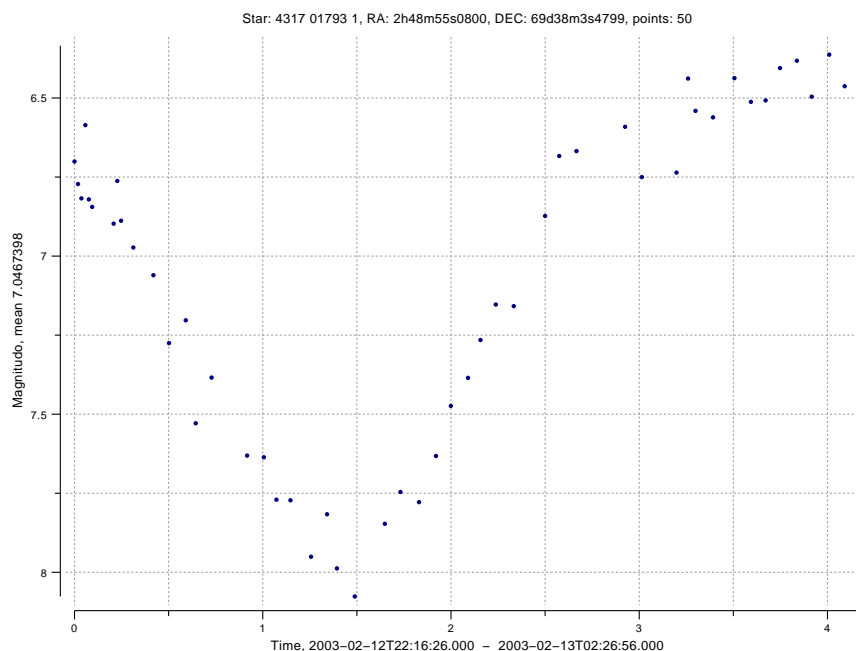
4.7.1 Dodatkowe polecenia biblioteki „libwebcam” dla systemu Linux

- **::cam::create webcam usb ?options?**

Nowe opcje:

- **-lpport port_name** – port_name nazwa urządzenia parport, domyślnie /dev/parport0. Używane do sterowania przez port równoległy czasem ekspozycji – tylko dla zmodyfikowanych kamer. Może nie działać na niektórych płytach głównych ECS (np. K7S5A, K7S5AL).
- **-webcamdevice device_name** – device_name nazwa urządzenia v4l, domyślnie /dev/video0.
- **-validframe number** – stosowane przy długich ekspozycjach, określa która z kolei ramka odczytywana z urządzenia **v4l** (sterownika **pwc**) zawiera obraz nieba (poprzednie są czarne). Podanie parametru number równego 0 powoduje automatyczne wykrycie ramki zawierającej zdjęcie nieba, domyślnie 3.

- **cam1 videosource**



Rysunek 18: Diagram zmienności RZ Cassiopeiae.

Wyświetla okno z ustawieniami kamery (rysunek 20), np. prędkość migawki, jasność, odczytanie i zapisanie ustawień użytkownika.

- **cam1 videoformat**

Wybór rozmiarów zdjęcia (rysunek 21).

4.7.2 Biblioteka „libskyeye” – obiekty i polecenia

- **skyeye_buf addnb buf_num_1 ... buf_num_n**

Dodanie do buf_num_1 wielu buforów (klatek).

- **skyeye_buf divc bufNum constans**

Podział bufora bufNum przez stałą constans.

- **skyeye_buf subnb buf_num_1 ... buf_num_n**

Odejmowanie od buf_num_1 wielu buforów (klatek).

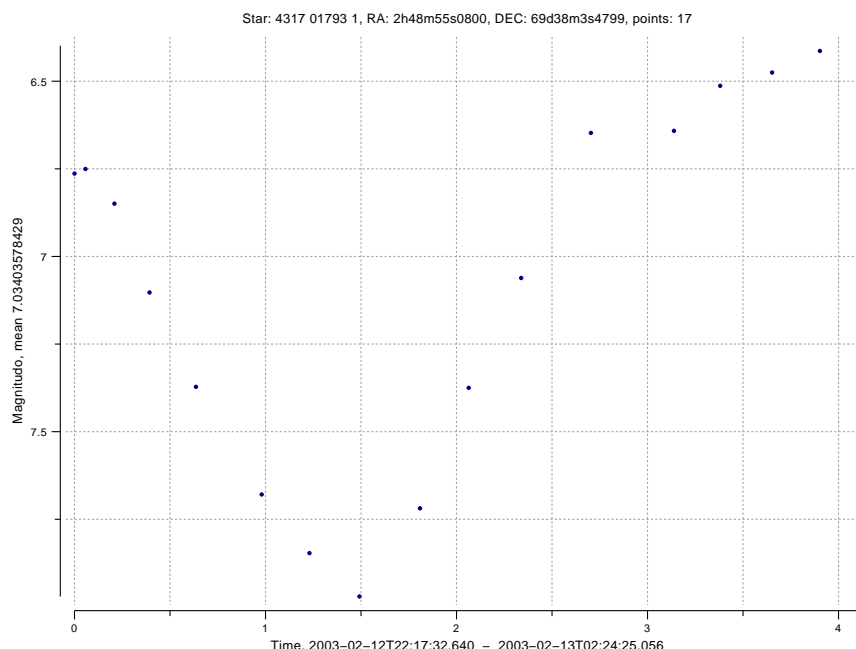
- **skyeye_buf move bufNum {moveX moveY ?acos bsin?}**

Przesuwanie i obrót obrazka z bufora **bufNum**. Jeśli podano tylko **moveX** i **moveY**, obrazek przesuwany jest w lewo o **moveX** i do dołu o **moveY**, jeśli **moveX**, **moveY**, **acos** i **bsin** uwzględniany jest obrót obrazka według wzorów:

$$x' = A \cdot x - B \cdot y - moveX$$

$$y' = A \cdot y + B \cdot x - moveY$$

gdzie:



Rysunek 19: Diagram zmienności RZ Cassiopeiae, punkty pomiarowe pogrupowane po trzy.

x' i y' – współrzędne punktu na przesuniętym obrazie,

x i y – współrzędne punktu na przesuwanym obrazie,

A i B – kosinus i sinus kąta obrotu (acos i bsin).

- **::list::create ?num?**

Tworzy obiekt list, listę instrumentalną gwiazd, opcjonalny parametr num to numer listy, bez podania tego parametru numer przydzielany jest automatycznie.

- **::list::list**

Wyświetla numery istniejących list.

- **::list::delete num**

Kasuje listę o numerze num.

- **::list::params {options}**

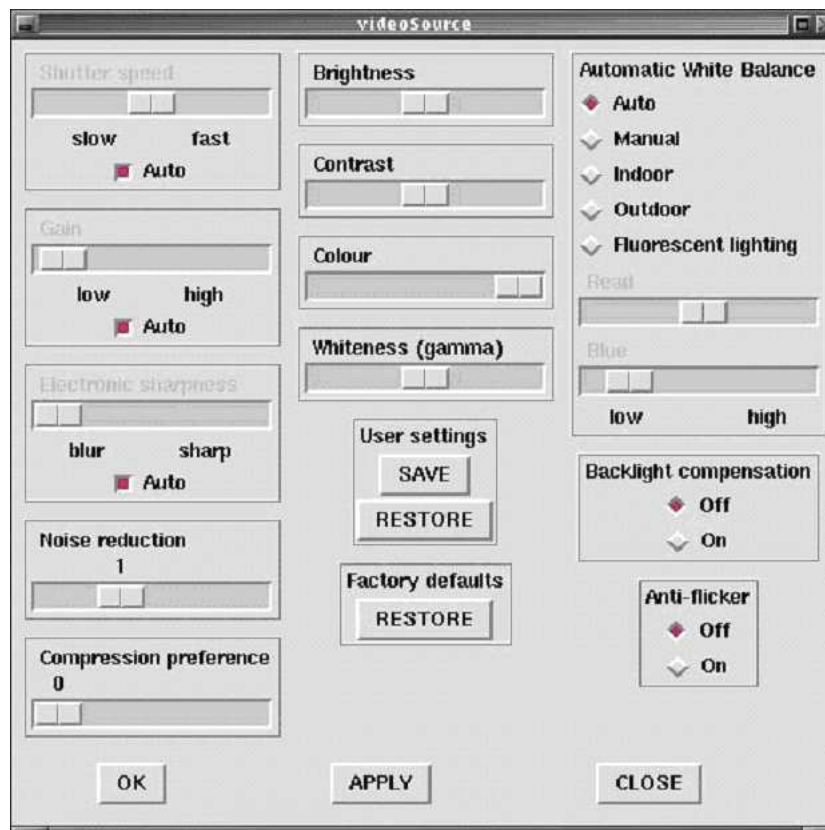
Ustawia parametry metody detekcji gwiazd i fotometrii aperturowej. Dostępne opcje: **-fwhm value**, **-radius value**, **-border value**, **-threshold value**, **-minFwhm value**, **-maxFwhm value**, **-r1 value**, **-r2 value**, **-r3 value**.

- **list1 getstars bufferNo threshin {options}**

Rozpoznaje gwiazdy na zdjęciu znajdującym się w buforze o numerze **bufferNo**, z progiem **threshin**.

Dostępne opcje:

- **-nophotometry**, nie wykonuje fotometrii. Opcja użyteczna, gdy zależy użytkownikowi tylko na wykryciu gwiazd, np. do dopasowania list gwiazd z dwóch przesuniętych obrazów, następnie odpowiedniego ich przesunięcia,



Rysunek 20: Ustawienia kamery.

- **-noeleminatenostars**, nie eliminuje obiektów niegwiazdowych,
- **-markstars**, zaznacza kwadratem wykryte na obrazie gwiazdy,
- **-dontreadkwd**, nie odczytuje z nagłówka FITS wymaganych dla kalibracji astrometrycznej słów kluczowych: **DATE-OBS**, **DEC**, **FOCLEN**, **NAXIS1**, **NAXIS2**, **OBS-LOC**, **PIXSIZE1**, **PIXSIZE2**, **RA**.

- **list1 save filename**

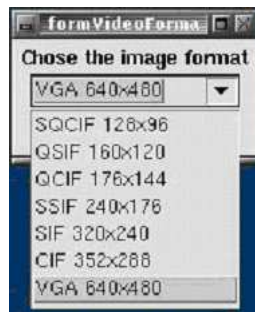
Zapisuje listę instrumentalną do pliku.

- **list1 fitcat catNum ?options?**

Dopasowuje listę instrumentalną to listy katalogowej gwiazd (kalibracja astrometryczna), dodatkowo wykonuje kalibrację fotometryczną.

Opcje:

- **catNum**, numer katalogu,
- **-save filename**, zapisuje listę obserwowanych gwiazd do pliku,
- **-nophotcal**, nie wykonuje kalibracji fotometrycznej,
- **-magnitudo minMag maxMag**, określenie zakresu jasności obserwowanych (pobieranych z katalogu) gwiazd,
- **-markcatalogstars bufNum**, zaznacza na obrazie w bufNum dopasowane lub nie gwiazdy katalogowe.



Rysunek 21: Wybór rozmiarów ramki.

- **list1 fitlist listNum**

Dopasowuje listy instrumentalne, **listNum** – numer drugiej listy instrumentalnej. Jeśli dopasowanie list powiedzie się zwracane jest przesunięcie i obrót listy drugiej (**listNum**) względem pierwszej, format: **moveX moveY A B**.

- **::cat::create type ?options?**

Utworzenie obiektu cat, interfejsu do określonego katalogu gwiazd.

Opcje:

- **type** – typ katalogu, dostępny jest tycho2 – katalog Tycho-2.

- **::cat::create tycho2 tycho2DataDirectory ?options?**

Opcje:

- **tycho2DataDirectory**, położenie katalogu Tycho-2/data,
- **-num catNum**, numer tworzonego obiektu cat.

- **::cat::list**

Wyświetla numery istniejących katalogów.

- **::cat::delete num**

Kasuje katalog o numerze **num**.

- **cat1 getstars minRa maxRa minDe maxDe ?options?**

Pobiera z katalogu listę gwiazd, z obszaru ograniczonego przez: **minRa maxRa minDe maxDe**.

Dostępne opcje:

- **-save filename**, zapis listy do pliku,
- **-magnitudo minMag maxMag**, określenie zakresu jasności pobieranych z katalogu gwiazd.

5 Algorytmy

W rozdziale tym opisano algorytmy użyte w metodzie pomiaru blasku gwiazd zmiennych (patrz rozdział 4.1). Algorytmy wykrywania gwiazd, fotometrii i astrometrii zostały zaczerpnięte z prac [6] i [7], bądź są ich modyfikacją. Modyfikacje i algorytmy pochodzące z [6] opisano szczegółowo. Algorytmy zaczerpnięte z [7] opisano ogólnie aby wyjaśnić znaczenie parametrów użytych w **SkyEye**. Czytelnik pragnący poznać szczegóły odesłany jest do tekstu źródłowego.

5.1 Pobieranie obrazów

W programie **AudeLa** odczytem obrazów z kamery internetowej zajmuje się biblioteka **libwebcam**, obrazy kopiowane są do obiektów **buf**. Biblioteka ta została rozwinięta przez autora o wspomaganie dla systemu **Linux**, wersję dla **Windows** uzupełniono o kilka przydatnych opcji.

Pobierane obrazy mogą być kolorowe (RGB) lub czarno-białe, najdłuższy czas ekspozycji dla nieprzerobionych kamer to 0,2 s. Sposób przystosowania kamery do długich czasów ekspozycji opisany jest na stronach [10] i [11], polega na zablokowaniu automatycznego sterowania migawką i przejścia na sterowanie przez port równoległy.

Ze względu na łatwość dołączenia dodatkowego obiektywu lub teleskopu do celów astronomicznych najbardziej nadają się kamery firmy **Philips**, serii **Vesta** (PCVC) lub **ToUCam**, ale tylko te z sensorami CCD, sprawdzonymi typami są: 675K, 680K, 690K, 740K, 750K, 840K.

5.1.1 Implementacja kamery internetowej pod systemem Linux

Autorska implementacja wykorzystuje moduły **pwc** i **pwex**, ich opis znajduje się na stronie [16]. Wspomagają one wiele kamer [16]:

- Philips WebCams : PCA 645VC, PCA 646VC, PCVC 675K, PCVC 680K, PCVC 690K, PCVC 720K/40, PCVC 730K, PCVC 740K, PCVC 750K, PCVC 840K,
- Askey VC010
- Creative Labs Webcam 5, Pro Ex
- Logitech QuickCam 3000 Pro, 4000 Pro, Notebook Pro, Zoom,
- Samsung MPC-C10, MPC-C30
- Sotec Afina Eye
- Visionite VCS UM100, VCS UC300

Sterowniki **pwc** i **pwex** spełniają założenia standardu **V4L** (Video For Linux, wersja 1), w ten sposób kamera widziana jest z poziomu użytkownika systemu **Linux** jako urządzenie `/dev/video0`. Pobranie obrazu sprowadza się do wykonania kilku następujących po sobie czynności:

- Otwarcie urządzenia
- Pobranie struktury opisującej właściwości urządzenia
- Sprawdzenie czy wykryte urządzenie jest kompatybilne z kamerami Philips

- Ustawienie żądanego rozmiaru okna

Obsługiwane rozmiary (formaty):

- **SQCIF** – 128x96
- **QSIF** – 160x120
- **QCIF** – 176x144
- **SSIF** – 240x176
- **SIF** – 320x240
- **CIF** – 352x288
- **VGA** – 640x480

- Odczyt obrazu (w formacie YUV)
- Konwersja formatu z YUV do RGB (lub do obrazu czarno-białego), następnie przekopiowanie obrazu wynikowego do obiektu **buf**.

Ustawianie i pobieranie parametrów kamery realizowane jest za pomocą wywołań funkcji `ioctl()` z odpowiednimi parametrami. Moduły **pwc** i **pwcx** dają też możliwość mapowania urządzenia pod konkretny obszar pamięci operacyjnej (przy pomocy funkcji `mmap()`).

Niestety z różnych przyczyn moduły te przestały być rozwijane, ostatnie wersje dostępne są na stronie [16].

5.1.2 Sterowanie czasem ekspozycji

Sterowaniem czasem ekspozycji zmodyfikowanych kamer zajmuje się port równoległy komputera. Przez zmianę stanu na określonej końcówce pozwala na zablokowanie lub zwolnienie migawki.

- W systemie **Linux** do sterowanie portem równoległym wykorzystano moduły **ppdev**, **parport**, **parport_pc** (urządzenie `/dev/parport0`).
 - Otwarcie i inicjalizacja urządzenia
 - Ustawienie końcówek wyjściowych portu
- W systemach **Windows** sterowanie portem równoległym może odbywać się na kilka sposobów, przez bezpośrednie odwołanie do portu (Windows 95/98), z wykorzystaniem wbudowanego programu **PortTalk** (Windows 95/98/NT/2000/XP, włączenie, wyłączenie w menu **Setup/Au-de-La/Porttalk Interface**) lub zaimplementowane przez autora użycie portu równoległego jako portu drukarki (Windows 95/98/NT/2000/XP). W ostatnim przypadku należy zmodyfikować wtyczkę według wskazań znajdujących się na stronie [17].

5.2 Nakładanie klatek

Kamery internetowe charakteryzują się dużym szumem, nawet po odjęciu od pojedynczego zdjęcia ciemnej klatki z szumu można wyróżnić gwiazdy tylko do 6m – 7m. Stosunek sygnału do szumu można poprawić nakładając na siebie wiele klatek. Nałożenie 20 zwiększa zasięg do 8m, 60 do 9m, 120 do 10m. Zebranie 120 klatek o czasie naświetlania 0,2 s zajmuje około minuty, w tym czasie

gwiazdy przesuwają się o kilkadziesiąt pikseli. Nałożenie obrazów na siebie (po przesunięciu kompensującym obrót Ziemi) spowoduje dodatkowe uśrednienie szumu, które znacznie poprawia jakość obrazu. Możliwe jest to gdyż po przesunięciu dodawane są do siebie jasności fizycznie różnych pikseli, procedura ta szczególnie dobrze eliminuje gorące piksele, które ze względu na duże wahania jasności pozostają nawet po odjęciu ciemnej klatki. Niestety ze względu na ograniczoną czułość sensorów CCD tą metodą nie uda się uzyskać obrazów ciemniejszych obiektów np. galaktyk, jedynym wyjściem jest modernizacja kamery i zastosowanie mechanizmu prowadzącego [1], [2].

Przesuwanie zdjęć kompensujące ruch obrotowy Ziemi można zrealizować na dwa sposoby:

- Wyliczając przesunięcie kolejnych klatek, gdy znane jest położenie środka ekspozycji i rozmiary zdjęcia
- Wyliczając przesunięcie na podstawie wykrywania i dopasowania list gwiazd (metody te zostaną przedstawione w dalszej części).

Przykładowe nałożenie klatek prezentują rysunki 22 i 23, pierwszy z nich to pojedyncza klatka o czasie naświetlania 0.2 s, drugi to nałożenie 200 kolejnych klatek o czasie naświetlania 0.2 s.

Innym bardzo dobrym przykładem są rysunki 24 i 25, pierwszy z nich, to pojedyncza klatka o czasie naświetlania 2,5 s, drugi to nałożenie 30 kolejnych klatek o czasie naświetlania 2,5 s. Na pojedynczym zdjęciu algorytm wykrywa 28 gwiazd, po nałożeniu wielu klatek wykrywa ponad 200 gwiazd. Zdjęcia pochodzą z obserwacji przeprowadzonych w nocy 4.09.2004 / 5.09.2004.



Rysunek 22: Castor, czas naświetlania 0,2 s.

5.3 Automatyczna detekcja gwiazd

Obrazek, po odjęciu ciemnej klatki (operacja opcjonalna), przechowywany jest w obiekcie **buf** w formie tablicy nazywanej **tablicą podstawową**. Detekcja gwiazd polega na [7]:

- odnalezieniu lokalnego maksimum jasności interpretowanego jako centrum gwiazdy,
- eliminacji wykrytych obiektów niegwiazdowych (obiekty o wąskich profilach – promieniowanie kosmiczne, obiekty rozciągłe – galaktyki, mgławice, Księżyc, meteory).



Rysunek 23: Castor, nałożenie 200 klatek o czasie naświetlania 0,2 s.

5.3.1 Odnajdywanie lokalnych maksimum jasności

Odnajdywanie lokalnych maksimum jasności odbywa się na tablicy roboczej, powstaje ona przez pomnożenie tablicy podstawowej przez kwadratową macierz, pełniącą rolę filtra wyostrzającego obraz [6], [7]. Jej elementy tworzone są według wzoru [6]:

$$C_{kl} = \frac{e^{-\frac{(k-r)^2 + (l-r)^2}{2(0,4246 \cdot fwhm)^2}}}{2\pi(0,4246 \cdot fwhm)^2}$$

gdzie:

C_{kl} – element macierzy o współrzędnych k, l

r – promień macierzy (**Gauss matrix radius**), domyślnie 4

$fwhm$ – szerokość połówkowa profilu (**Star fwhm**), domyślnie 3,0

Następnie macierz poddawana jest dodatkowej normalizacji i sprowadzeniu do postaci, w której suma elementów (objętość) równa jest zero [6]:

$$C'_{kl} = \frac{C_{kl}}{s} - \frac{1}{d^2}$$

$$s = \sum_{k=0}^d \sum_{l=0}^d C_{kl}$$

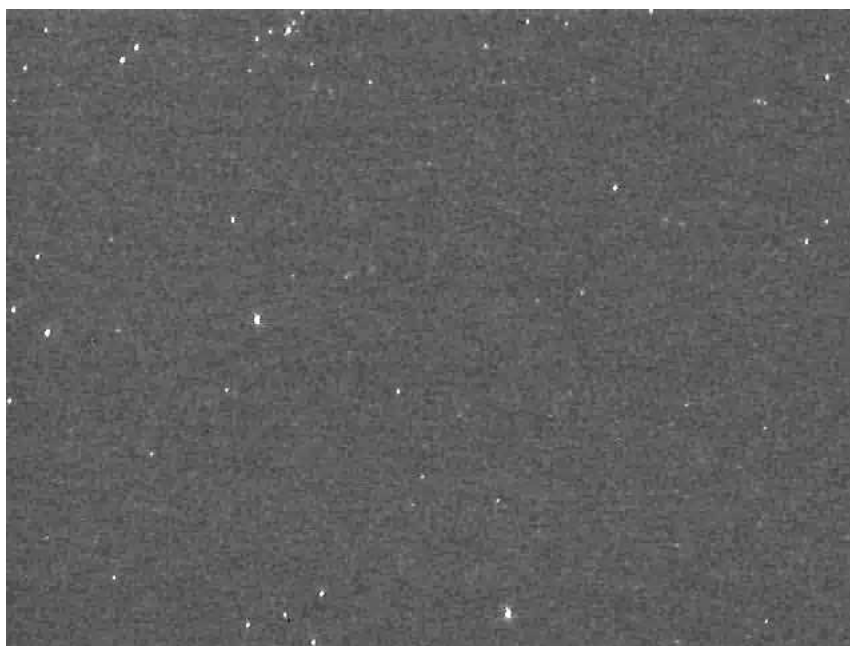
$$d = 2r + 1$$

gdzie:

C'_{kl} – nowy element macierzy o współrzędnych k, l

C_{kl} – stary element macierzy o współrzędnych k, l

r – promień macierzy (**Gauss matrix radius**), domyślnie 4



Rysunek 24: Pojedyncza klatka, czas naświetlania 2,5 s.

Obliczanie elementów tablicy roboczej odbywa się według wzoru [6]:

jeśli $F_{ij} \leq \text{threshin}$ to: $W_{ij} = 0$

w innym wypadku:

$$W_{ij} = \sum_{k=0}^d \sum_{l=0}^d F_{i-r+k, j-r+l} C_{kl}$$

$$d = 2r + 1$$

gdzie:

W_{ij} – element tablicy roboczej

F_{ij} – element tablicy podstawowej

C_{kl} – element macierzy filtrującej

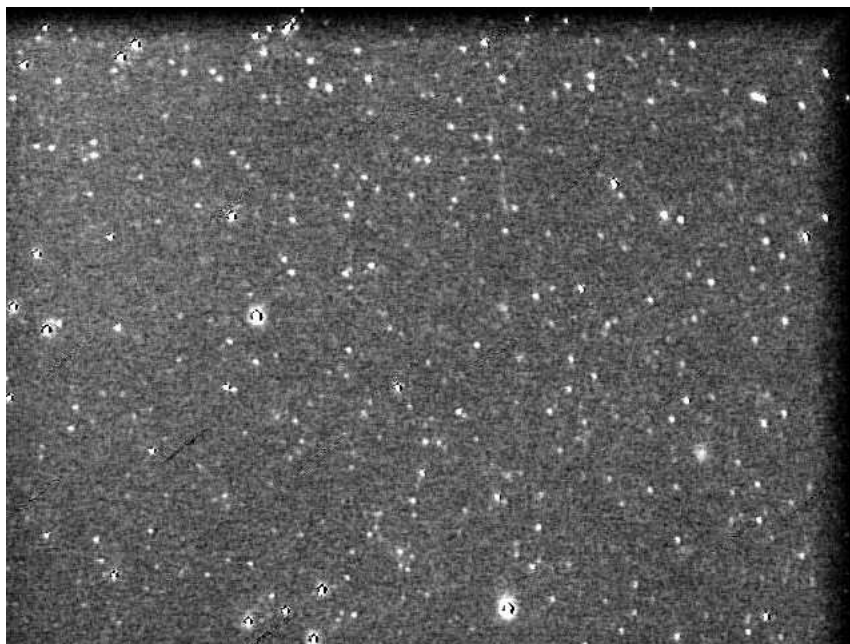
r – promień macierzy filtrującej (**Gauss matrix radius**)

threshin – próg poziomu tła (**Pixel threshold**), powinien wynosić: *średnia arytmetyczna jasności pikseli + 3 * odchylenie standardowe*

Następnie dla każdego elementu tablicy roboczej (za wyjątkiem pikseli należących do brzegu obrazka, określonego parametrem **Frame border**, domyślnie 20) W_{ij} sprawdzany jest warunek czy $W_{ij} > \text{threshold}$ (**Star threshold**, domyślnie 40) oraz czy W_{ij} jest lokalnym maksimum. Tak znalezione obiekty są kandydatami na gwiazdy.

5.3.2 Eliminacja obiektów niegwiazdowych

Do przekrojów znalezionych obiektów, na tablicy podstawowej, (względem osi x i y i przechodzących przez centralny piksel) dopasowywane są dwie funkcje Gaussa. Z wyznaczonych szerokości połówkowych przekrojów liczona jest wartość średnia, jeśli mieści się w dozwolonym przedziale $\langle \text{minFwhm}, \text{maxFwhm} \rangle$ (wartości domyślne 1 i 5) obiekt uznawany jest za gwiazdę [7].



Rysunek 25: Nałożenie 30 klatek o czasie naświetlania 2,5 s.

Na rysunku 26 przedstawiono zdjęcie z zaznaczonymi kwadratami obiektami rozpoznanymi jako gwiazdy. Można zauważyć, że zostały odrzucone obiekty o szerokich profilach (w tym wypatku prześwietlone gwiazdy) oraz obiekty jednopikselowe o wąskich profilach.

5.4 Fotometria aperturowa

Jasność instrumentalną gwiazdy wyznacza się ze wzoru [7]:

$$m_i = -2,5 \log N_{app}$$

gdzie:

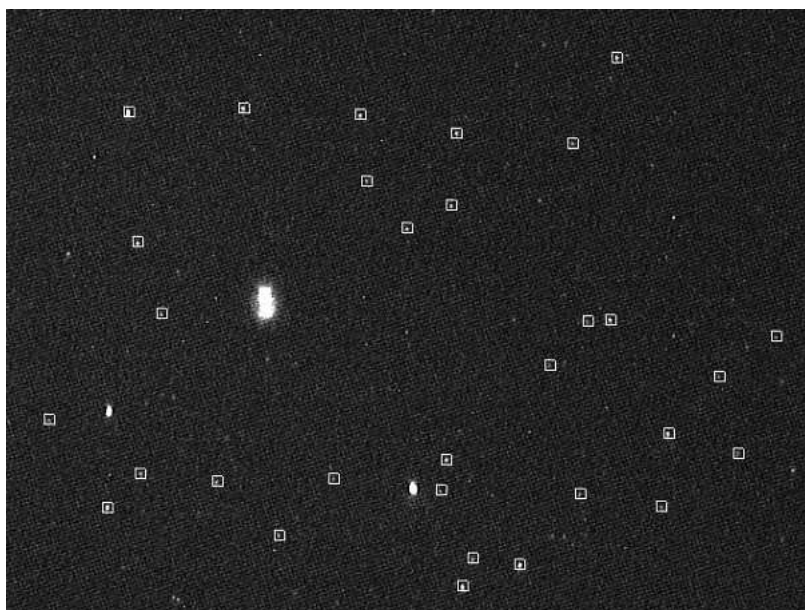
m_i – jasność instrumentalna,

N_{app} – sygnał pochodzący od gwiazdy pomniejszony o poziom tła.

Sygnał pochodzący od gwiazdy wyznacza się poprzez zsumowanie jasności pikseli znajdujących się wewnątrz okręgu **r1** (apertury, promień określony jest parametrem **Aperture radius**, domyślnie 3 piksele) pomniejszonych o poziom tła. Poziom tła wyznaczany jest jako mediana jasności pikseli znajdujących się na zewnątrz apertury, pomiędzy okręgami **r2** (**Background inner radius**) i **r3** (**Background outer radius**) [7]. Obrazuje to rysunek 27, domyślne wartości promieni to 6 i 12 pikseli.

5.5 Astrometria

Określenie obszaru, jaki zajmuje obrazek na sferze niebieskiej wyliczane jest ze znajomości położenia centrum zdjęcia i jego skali. Informacje te powinny być zawarte w nagłówku plików **FITS** (zmiennych obiektu buf) bądź podane przez użytkownika. Następnie z katalogu **Tycho-2** pobierana jest lista gwiazd odpowiadająca temu obszarowi. Obie listy (instrumentalna i katalogowa) zostają dopasowane. Ostatecznie współrzędne instrumentalne wykrytych gwiazd przeliczane są na współrzędne równikowe równonocne.



Rysunek 26: Castor, 2s, wykryte gwiazdy.

5.5.1 Katalog Tycho-2

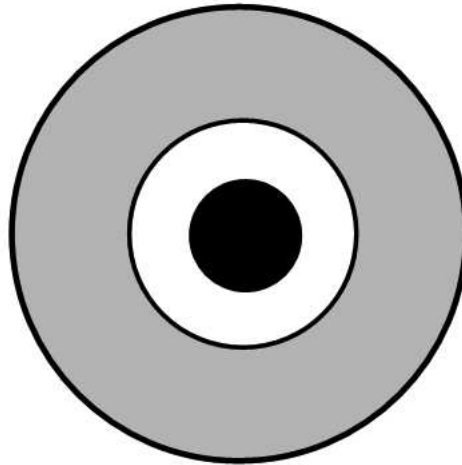
Katalog **Tycho-2** zawiera pozycje 2,5 miliona gwiazd, wartości ruchów własnych, jasności **BT** i **VT**. Sporządzony został z około 300 milionów obserwacji przeprowadzonych w latach 1989 – 1993 przez satelitę **ESA Hipparcos**, zawiera też gwiazdy z **Astrographic Catalogue** i 143 innych katalogów bazujących na obserwacjach z powierzchni Ziemi. Szczegółowe informacje na temat katalogu i sam katalog można znaleźć na stronie [9].

W skład katalogu wchodzi cztery pliki ASCII, każdy z nich podzielony jest znakami `\r\n` (CR, LF) na rekordy o stałych długościach:

- `catalog.dat` – główny plik katalogu zawierający 2 539 913 rekordów (gwiazd) o długości 206 bajtów (plik zajmuje ok. 503 MB),
- `suppl_1.dat` – suplement 1, 17 588 rekordów o długości 122 bajtów,
- `suppl_2.dat` – suplement 2, 1146 rekordów o długości 122 bajtów,
- `index.dat` – plik indeksu do `catalog.dat` i `suppl_1.dat`, 9538 rekordów o długości 42 bajtów.

Poszczególne pola w rekordach separowane są znakiem pionowej kreski, |. Gwiazdy w głównym pliku katalogu posortowane są w 9537 regionów, zgodnie z numerami **GSC**. Każdy region zajmuje pole $3,75^\circ \times 3,75^\circ$. W każdym rekordzie pliku indeksu znajduje się numer rekordu (głównego pliku katalogu) pierwszej gwiazdy danego regionu oraz położenie i rozmiary tego regionu podane we współrzędnych równikowych. Ułatwia to znacznie przeszukiwanie tak dużego pliku jak `catalog.dat`.

Odnalezienie gwiazd z danego obszaru sprowadza się do przeszukania pliku indeksu w celu wybrania regionów **GSC** wspólnych z szukanym obszarem. Następnie przeszukania głównego pliku katalogu w celu wybrania gwiazd wspólnych wytypowanym regionom **GSC** i szukanemu obszarowi. Ze względu na duży zasięg katalogu wybierane są tylko gwiazdy o wielkościach gwiazdowych z przedziału zadanego przez użytkownika (**Observe magnitudo** `<min., max.>`).



Rysunek 27: Wyznaczanie poziomu tła, obszar tła zaznaczono kolorem szarym, kolorem czarnym aperturę.

5.5.2 Kalibracja astrometryczna

Na podstawie informacji takich jak położenie środka pola obserwacji, rozmiarów piksela, długości ogniskowej użytego obiektywu i rozmiarów zdjęcia w pikselach obliczane są granice obserwowanego obszaru. Z katalogu pobierana jest lista gwiazd mu odpowiadająca, następnie współrzędne równikowe równonocne przeliczane są na współrzędne instrumentalne, aby przejść z geometrii sferycznej do płaskiej. Do tak przygotowanej listy katalogowej dopasowywana jest, lista instrumentalna wykrytych na obrazku gwiazd (uwzględniając rotacje i przesunięcie).

Dopasowanie list polega na znalezieniu wartości parametrów A , B , C i D równań [6]:

$$x' = A \cdot x - B \cdot y - C$$

$$y' = A \cdot y + Bx - D$$

gdzie:

- x' i y' – współrzędne punktu na liście katalogowej,
- x i y – współrzędne punktu na liście instrumentalnej,
- A i B – kosinus i sinus kąta obrotu,
- C i D – przesunięcie w x i y .

Opisują one sposób przeliczenia współrzędnych jednej listy na współrzędne drugiej listy. W celu wyznaczenia tych parametrów gwiazdy znajdujące się na obu listach sortowane są względem jasności. Następnie z obu list wybierane są kolejne pary najjaśniejszych gwiazd i wyznaczane parametry dopasowania według równań [6]:

$$A = \frac{y'_2 - y'_1 - \frac{(x'_2 - x'_1)(x_1 - x_2)}{y_1 - y_2}}{y_2 - y_1 - \frac{(x_2 - x_1)^2}{y_1 - y_2}}$$

$$B = \frac{x'_2 - x - A(x_2 - x)}{y - y_2}$$

$$C = x' - Ax + By$$

$$D = y' - Ay - Bx$$

gdzie:

x, y – współrzędne pierwszego wybranego punktu z listy wykrytych gwiazd,

x_2, y_2 – współrzędne drugiego wybranego punktu z listy wykrytych gwiazd,

x', y' – współrzędne pierwszego wybranego punktu z listy katalogowej,

x'_2, y'_2 – współrzędne drugiego wybranego punktu z listy katalogowej.

Algorytm kończy swe działanie, jeśli zostanie znalezione takie dopasowanie, że różnica odległości między tymi samymi gwiazdami na obu listach będzie mniejsza od 2 pikseli. W wypadku niemożliwości dopasowania list zgłaszany jest komunikat o błędzie. Współrzędne instrumentalne tak dopasowanej listy przeliczane są na obserwowane współrzędne równikowe równonocne.

Ważne jest, aby lista katalogowa zawierała jak najmniej gwiazd spoza obserwowanego zakresu jasności, ważne jest również dokładne określenie środka obszaru obserwacji. Niespełnienie tych założeń może być powodem nieudanego dopasowania list lub bardzo długiego czasu działania algorytmu.

5.6 Kalibracja fotometryczna

Zmierzona za pomocą fotometrii aperturowej jasność na charakter wielkości instrumentalnej, dla konkretnej niezmiennej gwiazdy zmienia się na kolejnych ekspozycjach. Różnica jasności między dwiema stałymi gwiazdami jest z dokładnością błędu pomiaru stała. Fotometria różnicowa polega na liczeniu różnicy jasności między tymi gwiazdami, zakładając że jedna z nich pełni rolę gwiazdy odniesienia – standardu [7].

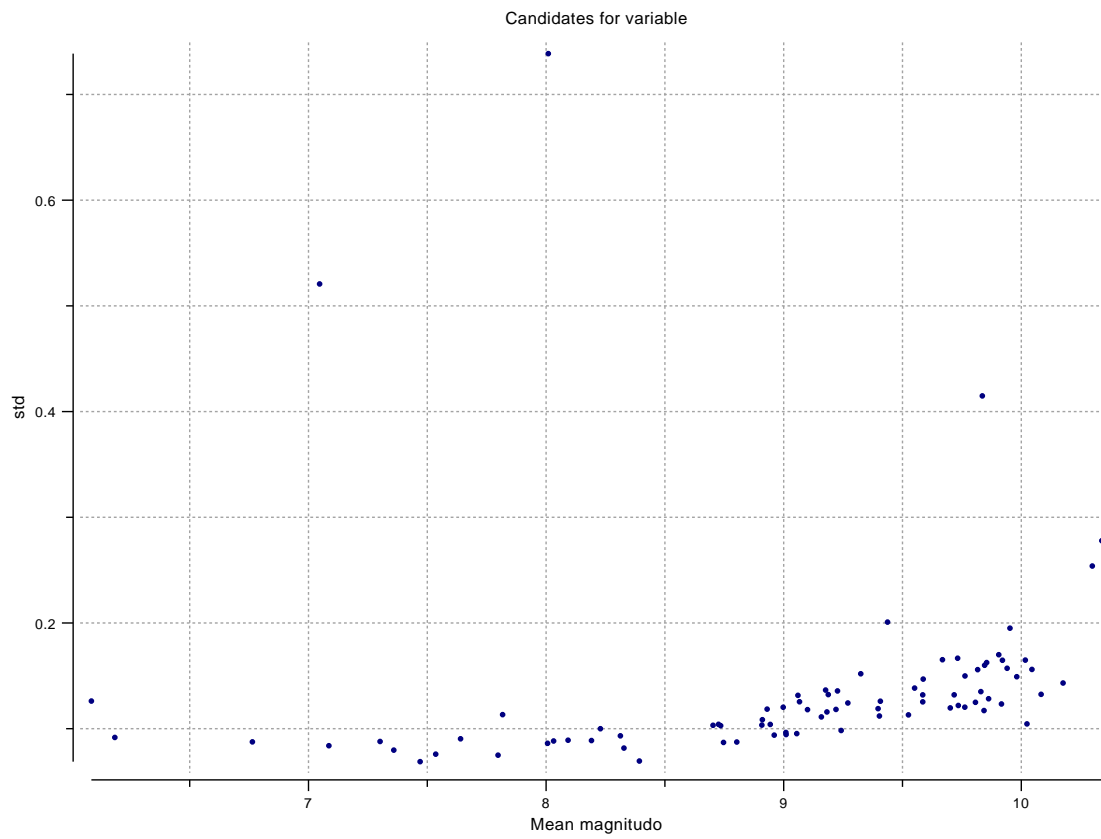
Algorytm zaczerpnięty z pracy [7] został w **SkyEye** znacznie uproszczony. Z listy katalogowej wybieranych jest kilka standardów, gwiazd o jasnościach z połowy obserwowanego zakresu. Średnia wartość ich jasności staje się jasnością gwiazdy porównania. Na liście instrumentalnej odnajdywane są te same gwiazdy odniesienia i liczona jest ich średnia jasność instrumentalna. Następnie jasność każdej gwiazdy kalibrowana jest poprzez odjęcie od niej średniej jasności instrumentalnej gwiazd odniesienia i dodanie wcześniej wyznaczonej jasności gwiazdy porównania [7].

5.7 Gromadzenie danych, tworzenie wykresów zmienności blasku gwiazd i typowanie gwiazd zmiennych

Tak przygotowane listy wykrytych gwiazd, zaopatrzone dodatkowo w dane o czasie i miejscu obserwacji zapisywane są jako pliki tekstowe do bazy danych pomiarów (katalogu z wynikami obserwacji).

Po zakończeniu obserwacji użytkownik może wybrać z bazy pomiarów interesującą go gwiazdę i wykreślić jej wykres zmienności blasku.

Możliwe jest też wykreślenie diagramu zmienności obserwowanego pola, który jest wykresem zależności *odchylenia standardowego średniej jasności* od *średniej jasności* poszczególnych gwiazd. Gwiazdy leżące w jego dolnej części można uznać za stałe, rysunek 28. Gwiazdy położone powyżej pewnego progu można uznać za zmienne [7].



Rysunek 28: **RZCas**, diagram zmienności obserwowanego pola.

6 Dodatki

6.1 Gwiazdy zmienne, zaćmieniowe

Gwiazdy zaćmieniowe to bardzo ciasne układy podwójne, których orbita zorientowana jest w ten sposób, że regularnie dochodzi do zasłonięcia jednej gwiazdy przez drugą i odwrotnie. Wyróżniane są więc dwa zaćmienia w jednym obiegu. Jeśli obiegające się gwiazdy różnią się od siebie budową lub jasnością, to jedno zaćmienie jest głębsze (główne), a drugie płytsze (wtórne).

Na podstawie okresu powtarzania się minimów można wyznaczyć długość jednego obiegu, a głębokość i kształt zaćmień pozwala stwierdzić, pod jakim kątem nachylona jest płaszczyzna orbity i jaki kształt mają składniki. Długość zaćmień, porównana do długości okresu między nimi, pozwala wyznaczyć średnice gwiazd w stosunku do ich odległości od siebie.

Przykładem takiej gwiazdy jest **RZ Cassiopeiae**, jej wykresy zmienności przedstawiono na rysunkach 18 i 19.

Spis rysunków

1	Przykładowy zestaw do obserwacji astronomicznych.	5
2	Schemat pomiarów zmian blasku gwiazd zmiennych.	9
3	AudeLa – interfejs graficzny.	10
4	Panel Variable stars , wybór źródła obrazu: kamera.	11
5	Panel Variable stars , wybór źródła obrazu: pliki.	13
6	Panel Variable stars , wybór i przygotowanie ciemnej klatki.	13
7	Panel Variable stars , przetwarzanie wstępne.	14
8	Panel Variable stars , rozpoznawanie gwiazd.	15
9	Zaznaczone wykryte gwiazdy z obserwacji RZCas	16
10	Panel Variable stars , fotometria aperturowa.	17
11	Panel Variable stars , kalibracja astrometryczna.	18
12	Udane dopasowanie do katalogu, zaznaczone kwadratami gwiazdy katalogowe, obserwacja RZCas	19
13	Panel Variable stars , rezultaty pomiarów, położenie bazy pomiarów.	20
14	Panel Data analysis , położenie bazy pomiarów.	22
15	Panel Data analysis , wybór regionu i czasu obserwacji.	22
16	Panel Data analysis , wyświetlenie diagramu zmienności obserwowanego pola lub wybranej gwiazdy.	23
17	RZCas , diagram zmienności obserwowanego pola.	24
18	Diagram zmienności RZ Cassiopeiae.	25
19	Diagram zmienności RZ Cassiopeiae, punkty pomiarowe pogrupowane po trzy.	26
20	Ustawienia kamery.	27
21	Wybór rozmiarów ramki.	28
22	Castor, czas naświetlania 0,2 s.	31
23	Castor, nałożenie 200 klatek o czasie naświetlania 0,2 s.	32
24	Pojedyncza klatka, czas naświetlania 2,5 s.	33
25	Nałożenie 30 klatek o czasie naświetlania 2,5 s.	34
26	Castor, 2s, wykryte gwiazdy.	35
27	Wyznaczanie poziomu tła, obszar tła zaznaczono kolorem szarym, kolorem czarnym aperturę.	36
28	RZCas , diagram zmienności obserwowanego pola.	38

Literatura

- [1] G. Koralewski, L. Mankiewicz, K. Pozniak, P. Szamocki, G. Wrochna Niezależne Koło Miłośników Astronomii, Szczecin; Centrum Fizyki Teoretycznej PAN, Warszawa; Instytut Systemów Elektronicznych, Politechnika Warszawska; Instytut Problemów Jądrowych im A. Sołtana, Warszawa *Kamera internetowa w dydaktyce i popularyzacji astronomii*, Elektronika 1/2003.
- [2] Grzegorz Wrochna *Analiza obrazów CCD z kamery internetowej*, Urania 2/2002.
- [3] Grzegorz Wrochna „Wywoływanie” *astronomicznego zdjęcia cyfrowego*, Delta 4/2002.
- [4] Grzegorz Wrochna *Fotografowanie nieba byle czym*, Delta 2/2002.
- [5] Grzegorz Wrochna *Obserwacje gwiazd zmiennych kamerą internetową*, Urania 1/2002.
- [6] Michał Jegier, Bogumił Pilecki, Dorota Szczygieł projekt *Pi of the sky*.
- [7] Gracjan Maciejewski *Automatyczna fotometria masowa*, praca magisterska – UMK Toruń 2002, <http://www.astr.uni.torun.pl/~gm/fotometria101.pdf>
- [8] Tomasz Krzyt *Poradnik obserwatora gwiazd zmiennych*, Kraków 1995.
- [9] Strona zawierająca informacje o katalogu **Tycho-2** <http://www.astro.ku.dk/~erik/Tycho-2/>
- [10] Strona opisująca przystosowanie kamer internetowych do długich ekspozycji <http://www.unm.edu/~keithw/vesta675mod.html>
- [11] Strona opisująca przystosowanie kamer internetowych do długich ekspozycji <http://www.astrosurf.com/benschop/LXWebcam.htm>
- [12] Strona domowa projektu **AudeLa** <http://audela.cddaude.com/>
- [13] Strona domowa projektu **SkyEye** <http://www.skyeye.z.pl/>
- [14] Strona domowa projektu **Pi of the sky** <http://grb.fuw.edu.pl/>
- [15] Strona domowa projektu **TCL/TK** <http://www.tcl.tk/>
- [16] Strona poświęcona implementacji kamery internetowej w systemie Linux <http://www.smcc.demon.nl/webcam/>
- [17] Opis sposobu modyfikacji wtyczki do portu równoległego <http://www.hut.fi/Misc/Electronics/circuits/nullprint.html>
- [18] Strona domowa programu **IRIS** <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>
- [19] Strona domowa programu **K3CCD Tools** <http://www.pk3.org/Astro/>
- [20] Strona domowa projektu **Doxygen** <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>
- [21] Strona domowa projektu **Gwiazdy Zmienne Zaćmieniowe** <http://www.as.wsp.krakow.pl/gzz/>
- [22] Strona domowa projektu **NTP** (Network Time Protocol) <http://www.ntp.org/>
- [23] Strona z której można pobrać mapę nieba **Cartes du Ciel** <http://www.stargazing.net/astropc/download.html>