

可視光中低分散分光器 MALLS オートガイドシステムの開発

森鼻久美子¹、高橋隼¹、新井彰²、本田敏志¹、伊藤 洋一¹

1) 兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター 西はりま天文台

2) 京都産業大学 神山天文台

Development of Auto-Guide System for MALLS at the Nayuta Telescope

Kumiko MORIHANA¹, Jun TAKAHASHI¹, Akira ARAI², Satoshi HONDA¹, and Yoichi ITOH¹

1) *Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, 407-2*

Nishigaichi, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5313, Japan

2) *Koyama Astronomical Observatory, Kyoto Sangyo University, Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto City, 603-8555, Japan*

E-mail: morihana@nhao.jp

(Received 2016 December 20)

概要

兵庫県立大学西はりま天文台のなゆた望遠鏡に設置されている可視光中低分散分光器 MALLS (Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) を用いた観測を行う際、これまでは観測者がスリットビューワー画像を確認し、ハンドセット操作による手動ガイドによってスリット中心位置への導入と望遠鏡追尾エラーの補正を行ってきた。そのため、露出時間が長い場合にはガイド作業に手間がかかり、観測効率が低下することが問題となっていた。そこで、観測天体のスリットからの漏れ光を利用して、星像の重心位置のずれを自動的に測定し、なゆた望遠鏡の追尾動作にフィードバックをかけるオートガイドシステムを開発した。開発したオートガイドシステムにより、実用上最低限必要となるガイド性能を満たした。

Abstract

We have guided target stars using the handset of the 2m Nayuta telescope during observations using the slit-viewer camera images of MALLS (Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) mounted on the telescope. However, conducting long-time exposures with the hand-guide needs to adjust the position of the target star on the slit at short intervals, and also the efficiency of observations will decrease. Therefore, we developed the auto-guide system which provides feedback to the tracking of the telescope using centroid detection of escaping light of the slit of MALLS. As the result, the auto-guide system fulfills the minimum of the capability to use on observations.

Key words: spectrograph – auto-guide system

1. はじめに

兵庫県立大学西はりま天文台にある口径 2m のなゆた望遠鏡の可視光中低分散分光器 MALLS (Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) による可視光域における中・低分散の分光機能は、恒星や高密度天体や活動銀河核などの時間変動観測や長期間モニター観測など幅広い分野の研究観測 (なゆた望遠鏡での研究観測の約 75% が MALLS による: 平成 27 年度年次報告書) に利用されており、2016 年現在、なゆた望遠鏡の主力装置である。

MALLS の光学レイアウトを図 1 に示す。MALLS では、スリットミラーからの反射光をリレーレンズによりスリットビューワカメラ (SBIG 社製 ST-10 XME ; 表 1) へ導き、撮像したスリット画像を用いて観測天体のガイドを行ってきた。スリットビューワカメラの直前にはフィルターホイールがあり、大気分散によって生じる星像位置のずれを軽減する目的で測光フィルター (*B*, *V*, *R*, *Clear*) を挿入することが可能である。明るい天体のスリット分光観測では露光時間が短く、積分中にスリット上から天体が大きく外れることはない。しかし、長時間スリット分光観測を行う際には、望遠鏡のトラッキングエラーにより積分中にスリット上から天体が外れてしまう問題が起こる。例えば、20 分間の積分で 2-3 秒角程度のトラッキングエラーが生じる (小久保 他 2015)。

このトラッキングエラーを補正するために、なゆた望遠鏡にはオートガイド機能が備わっている (Ozaki & Tokimasa 2005)。しかし、なゆた望遠鏡に統合制御システムにおけるガイド機能が導入された 2005 年当時と現在では、必要とされるオートガイド機能やソフトの管理方法の要求仕様が大きく異なっている。2012 年以降、西はりま天文台ではなゆた望遠鏡を使った夜間観測体制が築かれ、MALLS の利用頻度は大幅に増加した。これに伴い、一晩の観測中に多数の天体を観測する必要性が増すと共に、観測用ソフトウェアへの追加機能の実装を短期間で進めることが必要とされている。また、MALLS の観測はユーザーの要望に応じた新たな機能の開発や保守管理が比較的容易に行えるよう Linux 上で動作するソフトウェアを西はりま天文台の職員が開発し運用してきた。そのため、MALLS 用のオートガイダーも同様の環境で動作するものを開発した方がソフトウェア間の親和性が高く、将来のソフトウェアのメンテナンスが時間面・コスト面で利便性が高いと判断した。

また、スリットビューワカメラの制御及び画像表示は、SBIG 社製の CCD 制御ソフト「CCDOPS Ver.5.47J for Windows」で行ってきた。しかし、画像の表示コントラストを調整できないため明るい星が視野内に入った場合にスリットが見えないこと、画像の連続読み出しモード使用時に拡大表示ができないなど問題点があった。そこで、Linux 向けの CCD 制御フリーソフト NightView¹ と SAO Image DS9² を組み合わせ、スリットビューワ画像上のスリットに落ちていない星像部分 (以下、スリット漏れ光と呼ぶ) を検出し、望遠鏡追尾エラーをオフセットすることで自動的に補正するオートガイドシステムを開発することにした。

2. オートガイドシステム

2-1. 要求仕様

オートガイドシステムの開発にあたり、要求仕様を次のように設定した。

1. スリットビューワカメラ画像の任意のコントラスト調整、拡大表示を可能にする
2. 西はりま天文台での典型的なシーイング (~2 秒角) を考慮し、実用するうえで最低限必要となる 5 分間のオートガイドを実行した場合に、“星像重心位置の座標とスリット中心位置の座標との差”の標準偏差

¹ <http://www.physics.muni.cz/mb/nightview/>

² <http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>

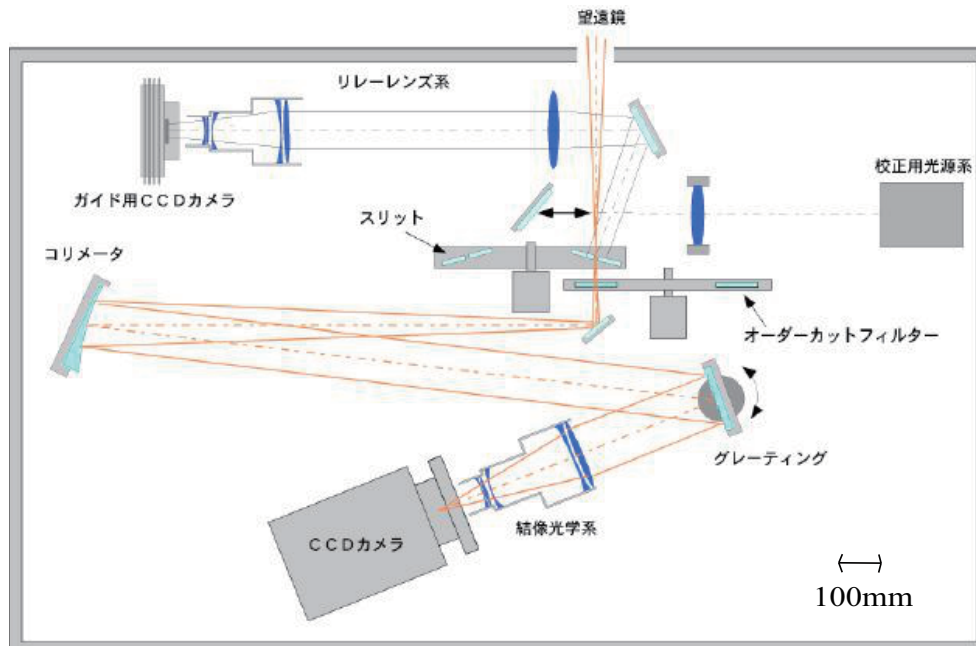


Fig. 1. 可視中低分散分光器 MALLS の光学レイアウト (Ozaki & Tokimasa 2005)。「ガイド用 CCD カメラ」がスリットビューワーカメラである。

Table 1. スリットビューワーカメラ仕様とプログラム開発環境

メーカー/製品名	SBIG/ST10-XME
インターフェイス	USB
ピクセル数	2048×1472
冷却機能	ペルチェ素子
冷却温度	空冷時：外気温より最大-35 度
露出時間	0.12~3600 秒
受光面	13.9×10.0 mm (7' × 5')
ピクセルサイズ	6.8 μm × 6.8 μm
オペレーティングシステム	Linux (Ubuntu 14.04 LTS)
CCD 制御ソフト	NightView version 0.3.3
プログラミング言語	python version 2.7.3

が 1.0 秒角未満になること

2-2. 開発環境

まず、スリットビューワカメラの制御を NightView を用いて Linux 制御に切り替え、CCD カメラの電源 ON/OFF、冷却 ON/OFF、露出時間、枚数の設定、露出開始の動作等のコマンドライン制御を可能にした。さらにスリットビューワカメラ画像を天文学で広く用いられている FITS イメージを可視化する SAOImage DS9 で表示可能にした。以上の開発環境の変換により、§2-1 の「1. スリットビューワカメラ画像の任意のコントラスト調整、拡大表示を可能にする」を実現した。

2-3. スリットの中心位置への天体の導入プログラム

オートガイドを実行するには、まず観測天体の星像をスリットの中心位置に導入する必要がある。この作業を効率的に行うため、ワンクリックでスリットの中心位置に天体を導入するプログラムを開発した (図 2)³。観測天体のスリットビューワ画像上での XY 座標をスリットビューワカメラの画面上でクリックすることで取得する。取得した XY 座標と画像上でのスリット位置の XY 座標の差分を計算し、望遠鏡の RA, Dec 方向のオフセットを入力する。これにより、短時間で観測天体をスリット上の中心に導入できることを確認した。このプログラムにより、天体スリット位置への導入の所要時間は、これまでのハンドセットを用いた時の半分以下になった。例えば、10 等級程度の明るい天体の場合、これまでは慣れた観測者の場合 ~1 分を要していたが、最短 7-8 秒で天体をスリット位置に導入できることを確認した。

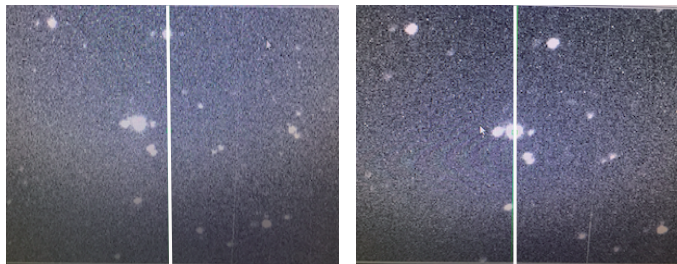


Fig. 2. スリット中心位置への天体導入前後の様子。白線はスリットの位置を表す。(左) 望遠鏡の指向精度に任せて天体に向けた直後のスリットビューワ画像。(右) スリット中心位置に天体を導入した後の画像。

2-4. オートガイドプログラム

観測天体のオートガイドは、観測対象天体のスリット漏れ光の重心検出を用いて次の手順で行う。(1) ユーザーが §2-3 のプログラムを端末から起動すると、自動的にスリットビューワカメラで画像が 1 枚撮影され、DS9 上に表示される。ユーザーはこの画像を見て、画像上の希望する天体の導入位置 (通常はスリットの位置) を画面上でマウスをクリックすることで指定する。すると、自動的に星像が希望の位置へ導入される。(2) ユーザーが指定した位置への天体導入後、オートガイダーソフトを端末から起動すると、自動的にスリットビューワ画像が撮影され、星像の重心検出を行う。この時に検出された星像の重心位置が、基準の位置として、天体の重心位置のズレを計算する際に使用される。(3) その後はオートガイドソフトが自動的に画像撮影とその画像における星像の重心位置の検出を行う。(2) で求められた基準位置と、最新画像における星像の重心位置を比較し、重心位置のズレを計算する。ズレが閾値 (後述) を超える場合、望遠鏡の移動補正量 (オフセット量)

³ 本プログラム及び § 2-4. のオートガイドプログラムのソースコードに関心がある方は、著者までご連絡下さい。

を赤道座標系で算出し、望遠鏡制御サーバーへコマンドを送信する。(4) ユーザーがガイド機能を停止にするまで (3) の処理を繰り返し実行する。

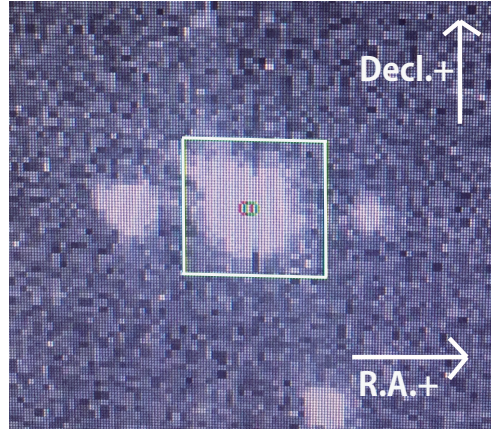


Fig. 3. オートガイド中のスリットビューワーカメラの画像の表示の様子。図の中央の白色の正方形は、重心検出を行う範囲。白色の正方形の中央にある緑色の円が GUI 操作により指定したスリット位置、赤色の円が検出した星像の重心位置を表す。

重心検出は、Howell (2006) に従い以下の計算方法を採用した。まず、 L を典型的な Point Spread Function の FWHM、 $I_{i,j}$ 、 $J_{i,j}$ を座標 (i,j) での天体カウント (ADU) とすると、一辺 $2L + 1$ の正方形の領域内の X 方向、Y 方向のカウント分布 I_i 、 J_j は、それぞれ次のように表せる。

$$I_i = \sum_{j=-L}^{j=L} I_{i,j} \quad (1)$$

$$J_j = \sum_{i=-L}^{i=L} J_{i,j} \quad (2)$$

この時、X 成分、Y 成分の平均カウント数は (3) 式、(4) 式のように書き表せる。

$$\bar{I} = \frac{1}{2L+1} \sum_{i=-L}^{i=L} I_i \quad (3)$$

$$\bar{J} = \frac{1}{2L+1} \sum_{j=-L}^{j=L} J_j \quad (4)$$

式 (1)–(4) を用いて、天体カウントを重みとした重心 (x_c, y_c) は次のように表せる。

全て i についての $I_i - \bar{I} > 0$ のとき

$$x_c = \frac{\sum_{i=-L}^{i=L} (I_i - \bar{I}) x_i}{\sum_{i=-L}^{i=L} (I_i - \bar{I})} \quad (5)$$

全ての i について $J_j - \bar{J} > 0$ のとき

$$y_c = \frac{\sum_{j=-L}^{j=L} (J_j - \bar{J}) y_j}{\sum_{j=-L}^{j=L} (J_j - \bar{J})} \quad (6)$$

XY 方向について望遠鏡にオフセットを入力するかどうかの判断は、次のような計算により行っている。

1. 検出された重心座標を中心とする一辺 100pixel の正方形内のカウント値をバックグラウンドのカウント値とし、その平均カウント値 (ave B) と標準偏差 (stdv B) を求める。
2. 検出された重心座標を中心とする一辺 5-7 pixel の正方形領域の平均カウント (ave S) と標準偏差 (stdv S) を求める。
3. $\frac{(\text{aveS}-\text{aveB})}{\text{stdvB}}$ は、S/N に相当する。 $\frac{(\text{aveS}-\text{aveB})}{\text{stdvB}} > 2$ のときに「検出」とみなし、XY 方向について望遠鏡にオフセットを入力する。 $\frac{(\text{aveS}-\text{aveB})}{\text{stdvB}} \leq 2$ の場合は「非検出」と見なし、望遠鏡にオフセットをかけない。

3. オートガイド性能の評価

開発したオートガイドシステムの性能を評価するため、晴天の 2016 年 12 月 19 日 JST 18:12- 18:19 にかけて、に約 11 等の天体 (SAO49725) に約 7 分間の露出をかけた際のオートガイドシステムによる XY 方向について望遠鏡のオフセット量を評価した。その結果を図 4 に示す。図から読み取れるように、X 方向、Y 方向のオフセットの標準偏差はそれぞれ、0.94 arcsec (Δdx)、0.53 arcsec (Δdy) となり、要求仕様「2. ”星像重心位置の座標とスリット中心位置の座標との差”の標準偏差が 1.0 秒角未満になること」を満たす。さらに長時間の露出時間 (MALLS の最大露出 1200 秒) に対しては、今後検証を重ねる予定である。今回開発した観測天体のスリット漏れ光を利用したオンソース・ガイドにより、V バンドで 16 等級程度の天体について十分な精度でオートガイドが行えることを確認した。一方、16 等級より暗い天体の場合は実用的なスリットビューワカメラの露光時間で得られる画像ではスリット漏れ光の強度が弱く、現状のオンソース・スリットガイドでガイドするのは厳しい。そこで、次のステップとして、今後は視野内にある観測天体以外の天体を使うオフソース・ガイド機能の開発を検討し、より暗い天体観測にもオートガイドを行えるようにしたい。

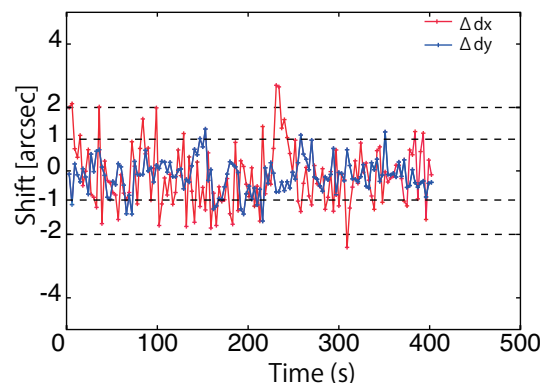


Fig. 4. オートガイドによるオフセット量の時間変化。

《参考文献》

- 平成 27 年度 兵庫県立大学自然・環境科学研究所 天文科学センター 年次報告書、14 頁
- Steve, B. Howell. 2006, “Handbook of CCD Astronomy”, Cambridge Observing Handbooks for Research Astronomers
- 尾崎忍夫、時政典孝、2005、兵庫県立西はりま天文台公園園報、第 15 号、15 頁
- 小久保充、橋場康人、満田和真、酒向重行、諸隈智貴、土居守、Hanindyo Kuncarayakti、森鼻久美子、伊藤洋一、2015 兵庫県立大学天文科学センター紀要、第 3 号、1 頁