

なゆた望遠鏡用に開発した補正機能付き指向コマンド `pinpoint`

高橋 隼¹

¹兵庫県立大学 天文学科学センター 西はりま天文台

`pinpoint`: Error-correcting pointing command for the Nayuta telescope

Jun TAKAHASHI¹

¹Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,

407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan

takahashi@nhao.jp

(Received 2025 July 1; accepted 2025 October 6)

概要

西はりま天文台なゆた望遠鏡用に、補正機能付きの望遠鏡指向コマンド `pinpoint` を開発したので報告する。`pinpoint` は、経験則に基づく簡易的な指向補正の後、観測装置で取得したテスト画像を用いて、さらなる補正を行う。観測対象天体の明るさや、視野内に写る天体の数に応じて、以下の3種類の方式の中から適したものを選択する: (a) テスト画像中に検出された光源のうち最も明るいものを対象天体と見なしして補正を行う方式 (self-brightest mode)、(b) 対象天体とは別に、近傍空域にある明るい星を用いて指向方位の誤差を測定し、その誤差を対象天体に適用して補正を行う方式 (nearby-brightest mode)、(c) 対象天体を含む画像に付与された World Coordinate System 情報を利用して補正を行う方式 (WCS mode)。`pinpoint` の開発により、晴天時には、NICやMALLS を用いた観測の大半において、観測者による手作業の指向補正が不要となった。これにより、天体導入からデータ取得に至る一連の手続きをスクリプト化できるようになり、観測の自動化が大きく前進した。

Abstract

This document reports the development of `pinpoint`, an error-correcting pointing command for the Nayuta telescope at the Nishi-Harima Astronomical Observatory. The `pinpoint` command corrects pointing errors using test images of the target object or objects in its vicinity. Three correction modes are implemented: (a) self-brightest mode, (b) nearby-brightest mode, and (c) WCS mode. The most appropriate mode is selected based on the brightness of the target object and the number of nearby objects. With `pinpoint`, manual correction is no longer necessary for most observations using NIC and MALLS, provided that sky conditions are clear. The `pinpoint` command automates a series of procedures from pointing to data acquisition through scripting.

Key words: telescopes — pointing correction

1. はじめに

望遠鏡の指向精度は、観測遂行の時間的効率や労力を左右する。また、観測の自動化にあたっても、正確な指向は欠かせない。

西はりま天文台なゆた望遠鏡は、 $46'' \pm 19''$ の指向誤差を持つ(高橋 2022)。この程度の指向性能では、指向完了後の再調整が必須であり、指向性能の改善が望まれていた。しかし、望遠鏡制御システムに組み込まれていた指向解析・補正機能は、運用開始後のシステム変遷に伴って使用できない状態に陥っていた。

そこで 高橋 (2022) は、近赤外カメラ NIC (石黒 他 2011) で得られた約18,500枚の観測画像を用いて、「指向方位と指向誤差の関係」を導出した。この関係を用いて指向方位を修正することで、指向誤差は $15'' \pm 8''$ にまで減少した。

しかしながら、視野が $24'' \times 69''$ と非常に狭い NIC 偏光モード(高橋 他 2018)での観測、あるいは、幅 $1''$ 前後のスリットに天体を導入する必要がある可視光分光器 MALLS(尾崎 & 時政 2005; 新井 他 2012)による観測では、上記

の修正を施しても指向精度は不十分である。

このような背景から、望遠鏡指向時に取得する画像を用いてさらなる補正を行う「`pinpoint` コマンド」を開発した。NIC での偏光撮像観測や MALLS でのスリット分光観測においても、観測者の手による指向補正なしでデータ取得を開始できることを目指した。本稿では、`pinpoint` の概要を説明し、その効果と課題を議論する。

2. `pinpoint`の概要

2.1. 書式と入力情報

`pinpoint`が指向補正に用いる情報は、観測装置の種類、対象天体の赤道座標、および検出器上の目標ピクセル位置である。加えて、対象天体の等級が得られる場合は、これも加味して補正方式を選択する。

`pinpoint` コマンドの書式は以下のとおりである。

```
pinpoint INST OBJ_INFO... [OPT]
```

INSTは、使用する観測装置である。本稿執筆時点では、nicおよびmallSが選択可能である。OBJ_INFO...は観

測対象天体についての情報であり、具体的な表記方法は後述する。OPTは省略可能なオプションであり、目標ピクセル位置や指向補正方法の詳細を指定する（表1、図1）。オプションで目標ピクセル位置が指定されない場合は、装置ごとに定義された既定の目標ピクセル位置が用いられる。

対象天体の情報OBJ_INFO...には、以下の3種類の表記方法がある。

検索可能な天体名

公開されているデータベースで検索可能な一般的な天体名を入力する。太陽系外の天体の場合は、SIMBAD¹ (Wenger et al. 2000)で検索可能な天体名とする。太陽系天体の場合は、オプション-H (small bodyの場合) または-M (major bodyの場合) を付けた上で、NASA JPL Horizons System²で検索可能な名前または識別番号を入力する。

(書式) pinpoint INST OBJ_NAME [OPT]

(例) pinpoint nic Vega

(例) pinpoint malls "alf Lyr"

(例) pinpoint nic Vesta -H

この表記方法では、pinpointは対象天体の赤道座標をデータベースから取得する。また、可能な限り対象天体の等級もデータベースから取得する。

天体リスト名と天体名

なゆた望遠鏡制御ソフトucc_runに格納されている天体リスト名と、そのリストに登録されている天体名で指定する。

(書式) pinpoint INST LIST OBJ_NAME [OPT]

(例) pinpoint nic my.lst "star A"

この表記方法では、pinpointは対象天体の赤道座標を天体リストから取得する。対象天体の等級は取得せず、考慮しない。

赤道座標

対象天体の赤道座標を入力する。

(書式) pinpoint INST hh mm ss.s +dd mm ss.s
[EQUINOX] [OPT]

(例) pinpoint malls 12 23 45.6 +65 43 21.0

(例) pinpoint nic 20 31 58.6 +41 22 39.0
1950.0

EQUINOXを省略した場合は、2000年分点と解釈される。この表記方法では、対象天体の等級は考慮されない。

2.2. 指向補正の方式

pinpointが行う指向補正には、以下の4つの方式(モード)がある。

1. simple mode: 「指向方位と指向誤差の関係」(1節)のみを用いて補正する。画像は使用しない。補正なしで指向した後、nayuta -correctコマンドで補正を行うのと同等である。なお、以下の3モードでも、最初の指向時にはsimple modeに相当する補正を行う。
2. self-brightest mode: 指向後にテスト画像を取得し、視野内で最も明るい天体を観測対象天体と判断する。対象天体が導入されたピクセル位置と目標ピクセル位置の差($\Delta x, \Delta y$)を、ピクセルスケール(1ピ

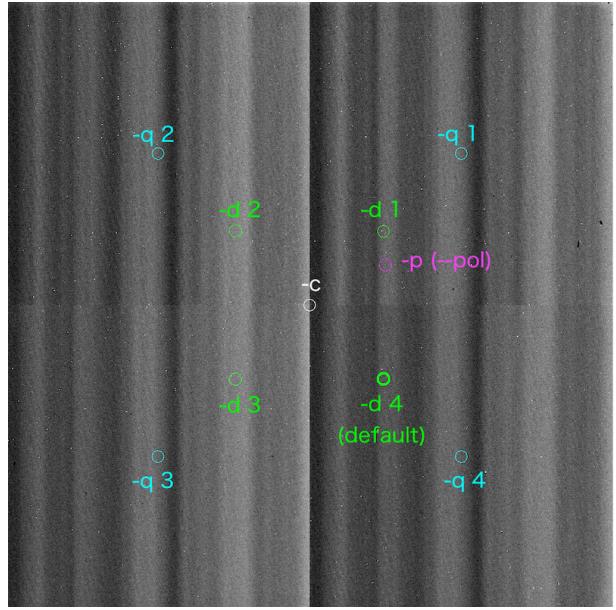


Fig. 1. Target pixel positions for NIC selectable via command-line options

クセルあたりの角度)を用いて、望遠鏡の指向補正量($\Delta\alpha, \Delta\delta$;ここで α は赤経、 δ は赤緯)に変換し、指向補正を実行する。

3. nearby-brightest mode: 対象天体の近傍(離角 1° 以内)で、視野内で圧倒的に明るいが飽和を起こすほどではない明るさの天体を、指向誤差参照天体として選定する。まず、参照天体に望遠鏡を向け、テスト画像中で最も明るい天体を参照天体と判断し、2と同様に指向補正量($\Delta\alpha, \Delta\delta$)を導出する。次に、目標天体に指向し、参照天体から求めた($\Delta\alpha, \Delta\delta$)を適用する。
4. WCS mode: 目標天体に指向して撮影したテスト画像にWorld Coordinate System (WCS)を付与する。WCSを用いて目標天体の赤道座標をピクセル位置に変換し、($\Delta x, \Delta y$)を導出する。これを($\Delta\alpha, \Delta\delta$)に変換し、指向補正を実行する。

以上の4モードの指向補正に加え、preguideという、最終精密調整の過程が用意されている。これは、スリット分光観測等、オートガイドを行う場合を想定して作られたものである。ガイドを開始するには数秒角以内の精度で、対象天体を目標ピクセル位置に導入する必要がある。目標ピクセル位置から最も近い光源を対象天体と判断し、指向補正を行う³。

2.3. 指向補正の流れ

図2にpinpointが行う指向補正の流れを示す。以下のような条件に基づいて、指向モードを選択する。

³ MALLSの場合は、さらに極近傍(離角が数 $10''$ 内)で最も明るい光源を対象天体と判断し、再補正を行う。再補正を行う理由は、MALLSのスリットビュアでは、真の天体像の左右(検出器の x 方向)にゴースト像が現れるためである。最も近い光源を対象天体と判断する場合、ゴースト像が誤って対象天体と認識されることがある。

¹ <https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

² <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html>

Table 1. Options of `pinpoint`. See figure 1 for the `-c`, `-d`, `-q` and `-p` options for NIC.

Short	Long	Description
<code>-h</code>	<code>--help</code>	Show this help message and exit
<code>-xy</code>		XY-position of target pixel (e.g., <code>-xy 600 450</code>)
<code>-c</code>	<code>--center</code>	Target is center of FOV
<code>-d {1,2,3,4}</code>	<code>--near-center {1,2,3,4}</code>	Target is near center; use <code>-d j</code> for j^{th} quadrant (NIC-only)
<code>-q {1,2,3,4}</code>	<code>--quad {1,2,3,4}</code>	Target is at quadrant center; use <code>-q j</code> for j^{th} quadrant (NIC-only)
<code>-p</code>	<code>--pol</code>	Recommended position for polarimetry (NIC-only)
<code>-S</code>	<code>--simple</code>	Simple mode (no image analysis)
<code>-H</code>	<code>--horizon</code>	For a small solar system body
<code>-M</code>	<code>--horizon-major</code>	For a major solar system body
<code>-G</code>	<code>--guide</code>	Prepare guiding

- `-S`オプションが付与されている場合は、simple mode を適用する。そうでない場合は、条件2に進む。
- 対象天体が、選択した装置の視野内で圧倒的に（他より1等以上）明るいと分かっている場合は、self-brightest modeを適用する。ただし、「対象天体の明るさがテスト撮像の露出時間で十分に検出可能な範囲にあり、かつ検出器が飽和しない範囲であること」も必要条件とする。具体的には、NICでは H バンドで6–9等、MALLSでは V バンドで8–12等の範囲と設定している（本稿執筆時点）。どちらの装置の場合でも対象天体および周囲の天体の等級はSIMBADから取得する。self-brightest modeの適用条件を満たさない場合（対象天体の等級を取得できない場合も含む）は、条件3に進む。
- 対象天体と同じ視野内に、検出可能な明るい天体が N 個以上存在すると予測される場合は、WCS modeを適用する。NICでは $N=10$ 、MALLSでは $N=5$ としている（本稿執筆時点）。NICの場合は2MASSカタログ(Skrutskie et al. 2006)、MALLSの場合はUSNO-Bカタログ(Monet et al. 2003)を参照して視野内の天体数を予測する。この条件を満たさない場合は、条件4に進む。
- 対象天体の近傍空域（離角 1° 以内）に、指向誤差の参考天体として適当な天体（具体的な基準は2と同様）が存在する場合は、nearby-brightest modeを適用する。そうでない場合は、simple modeを適用する。

NICを偏光撮像モードに設定すると（偏光分離素子を挿入すると）、視野が $24'' \times 69''$ と非常に狭くなり、`nayuta-correct`による補正だけでは対象天体を視野に導入すること自体が難しい。そこで、`pinpoint`は $2.7 \times 2.7'$ の視野を持つ通常モードで一連の指向補正を行い、偏光観測に適したピクセル位置（図1の-p）に対象天体を導入する。その後、偏光撮像モードに切り替えるという手順で観測を行う。

MALLSの場合、メインカメラは分光専用であり撮像はできない。そのため、`pinpoint`はスリットビューア（オートガイダー）用カメラを用いて対象天体をスリットトに導入する。その後、オートガイドを開始し、分光観測の

ための露出を開始するという手順で観測を行う。各モードによる補正是、主に雲の影響により失敗することもある。以下はその典型例である。

- self-brightest modeやnearby-brightest modeにおいて、テスト画像中に天体を検出できない。
- WCS modeにおいて、テスト画像中の天体数が少なすぎる（または全く検出されない）ために、WCSの付与に失敗する。

補正の失敗が明らかな場合は、self-brightest mode → WCS mode → nearby-brightest mode → simple modeの優先順位に従い、他のモードによる補正を試みる。

`-G`オプションが付与されていれば、各モードによる補正完了後に`preguide`を実行してからプログラムを終了する。オプションが付与されていなければ、そのまま終了する。

3. 所要時間

`pinpoint`は成功率を高めるため、やや冗長な過程を含んでいる。例えば、self-brightest modeやnearby-brightest modeでテスト画像中の最も明るい天体を検出する際、宇宙線や検出器のノイズによる誤検出を防ぐために、2回連続で撮影を行い、検出した天体のピクセル位置が2回ともほぼ一致することを確認する過程を設けている。このような冗長さのため、熟練した観測者に比べて、`pinpoint`は指向完了までに時間がかかる懸念がある。

そこで、手動による天体導入と`pinpoint`を用いた導入とで、所要時間を比較する試験を行った。試験実施日は2025年6月26日で、使用した観測装置はMALLSである。Spicaを起点とし、近傍空域（離角 2° 以内）にある明るい（ V 等級: 8.0–9.5）恒星4天体をロングスリットに導入した。試験中は薄雲がかかる時間帯もあったが、おおむね晴天であった。

手動の場合は、以下の標準的手順で天体を導入した。

- `nayuta -ps`コマンドで望遠鏡を指向（補正なし）。

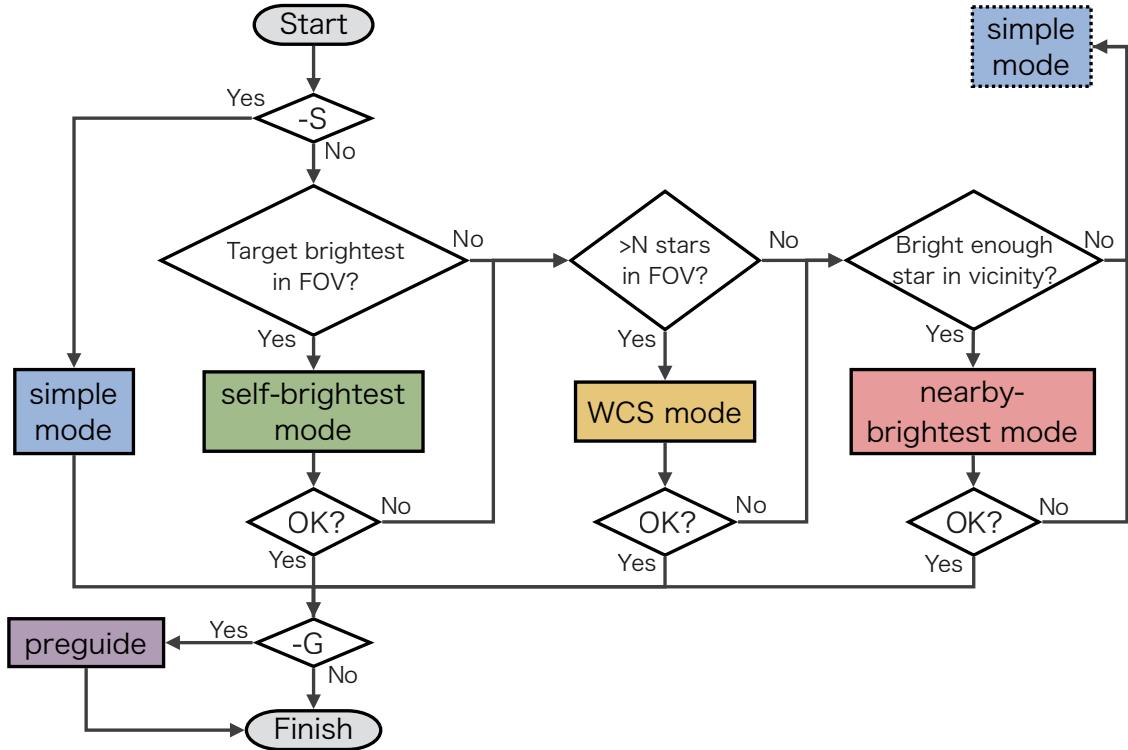


Fig. 2. Action flow of *pinpoint*

- ・観測者がスリットビューアのテスト撮像画面を見て、観測対象天体を同定。
- ・`onslit`コマンドで、大まかに天体をスリット付近に導入（画像表示ソフトDS9上で天体をクリックする操作が必要）。
- ・`autoguide`コマンドでオートガイドを開始（DS9上でガイド目標ピクセル位置をクリックする操作が必要）。

手動および`pinpoint`いずれの場合も、Spicaを起点に望遠鏡の指向を開始してから、オートガイドが正常に動作し始めたことを観測者が確認するまでの時間を計測した。今回の試験に用いた天体は非常に明るかったため、スリットビューア画像を用いた目視同定は容易であった。

結果は表2に示す通りである。`pinpoint`が`self-brightest mode`を選択した場合の所要時間は、手動の場合よりも短かった。一方、HD 115798については、スリットビューアの視野内に写る可能性がある天体の中で、対象天体が圧倒的に明るいとは言えなかったため、`pinpoint`は`nearby-brightest mode`を選択した。このモードでは、対象天体とは別の天体に一度望遠鏡を指向する必要がある。 $\Delta t = +20$ 秒と、`self-brightest mode`の場合よりも所要時間が長くなったのは、そのためと考えられる。今回の試験から、明るい恒星の導入において、`pinpoint`の所要時間は手動操作に比べて短い場合もあれば長い場合もあることが確認された。

加えて、2025年9月29日に各モードの所要時間を測定した。使用した観測装置は MALLS である。オプション

は用いていない。ここでは `pinpoint` が最初に選択したモードでの補正が成功した時の結果を議論する（図2に従い、複数のモードを実行した例は含まない）。結果を表3に t_{mode} として示す。 t_{mode} は、`pinpoint` を使うことで通常の指向コマンドより余分にかかった時間を意味し、 $t_{\text{mode}} = t_{\text{ppt}} - t_{\text{ini}}$ と定義した。ここで、 t_{ppt} は「`pinpoint` コマンド全体にかかった時間」である。 t_{ini} は「最初の指向にかかった時間」であり、具体的に言うと、`self-brightest`, `WCS`, `nearby-brightest` 各モードの最初に行う「補正なし指向 + 簡易補正」にかかった時間のことである（2.2節参照）。 t_{ini} は起点と目標の地平座標差によって決まり、`pinpoint` 各モード（`simple mode` 以外）による指向補正とは関係がない。

t_{mode} は30秒から1分程度であった（表3）。つまり、観測者の目視による天体同定および手動による指向調整にかかる時間が1分より大幅に長ければ、晴天時は`pinpoint`を使う方が時間的効率が改善されることが期待される。

また、表3から、`self-brightest mode`, `WCS mode`, `nearby-brightest mode` の順に t_{mode} が長くなることが分かる。ただし、天体検出やWCS付与に失敗した時にはより長い露出時間で再撮像する等、その時々に応じた処理をするため、同じモードでも所要時間が大きく異なる場合があることに留意していただきたい。

Table 2. Comparison of pointing times (June 26, 2025).

Target	V mag	Mode	Δt (s)
HD 117320	8.37	SB	-20
HD 116380	8.967	SB	-6
HD 115798	9.25	NB	+20
HD 115945	8.12	SB	-20

Notes. The V magnitudes were retrieved from SIMBAD. In the third column, SB and NB stand for the self-brightest and nearby-brightest modes, respectively. In the final column, Δt is defined by $t_{\text{ppt}} - t_{\text{man}}$, where t_{ppt} and t_{man} represent the time required when using the `pinpoint` command and when pointing manually, respectively.

Table 3. Measured processing times (September 29, 2025).

Object	V mag	Mode	t_{mode} (s)
HD 213446	8.22	NB	61
Altair	0.76	NB	64
HD 225059	8.09	SB	37
HD 222948	8.01	SB	33
HD 187094	9.38	WCS	56
TYC 1619-2393-1	12.29	WCS	42

Notes. The processing time for each mode, t_{mode} , is defined by $t_{\text{ppt}} - t_{\text{ini}}$, where t_{ppt} is the total time required to complete the `pinpoint` program and t_{ini} is the time required for the initial slewing of the telescope.

4. 効果

`pinpoint`コマンドの開発により、晴天時であれば、NICまたはMALLSで実施している大部分の観測において、観測者が手作業を行うことなく、実用上問題のない精度で対象天体を目標ピクセル位置付近に導入できるようになった。NICの通常撮像モード（視野: $2.7 \times 2.7'$ ）においては、高橋 (2022)の経験則に基づく補正 (`nayuta-correct`による補正) のみでも、対象天体を確実に視野内に導入することは可能であった。しかし、相対測光に必要な比較星も同時に視野に収めるには、観測者による指向方位の微調整が必要だった。`pinpoint`コマンドでは任意の目標ピクセル位置を指定できるため、観測者が調整を行わずとも、対象星と参照星の両方を視野内に同時に収めることができた。NIC偏光撮像モードのさらに狭い視野 ($15'' \pm 8''$) にも問題なく天体を導入できるようになった。MALLSでのスリット分光観測においても、オートガイドを開始できる精度（数秒角以内）で、幅 $1''$ 前後のスリット上に天体を導入できるようになった。

指向後の手作業による調整が不要となったことで、露出時間さえ事前に決まってしまえば、天体導入からデータ取得（露出）までの一連の処理をスクリプト化できるようになった。`pinpoint`の開発とあわせて、NICの通常／

偏光モードの切替やMALLSでのオートガイド開始も自動化（手作業の排除）したため、これらの手順もスクリプトに組み込める。現在では、NIC（偏光モードを含む）およびMALLSを用いた観測の多くにおいて、スクリプトによる観測が実用化されている。

5. 課題

一方で、以下のような課題も残されている。

5.1. 悪天候時の動作

`pinpoint`は、simple modeを除き、指向時に撮影した画像を用いて補正を行うため、気象条件の影響を受けることは避けられない。完全に曇っている状況では、そもそも研究データの取得自体が不可能であるため、`pinpoint`の失敗も実用上の問題とはならない。しかし、指向中に一時的な雲の通過があった場合等、熟練した観測者であれば柔軟に対応できるような状況でも、`pinpoint`は失敗することがある。天体を検出できなかった場合にはテスト撮影を再実行する等、一定の対策は施しているが、処理の工夫を重ねることで成功率の向上を目指したい。

5.2. 迅速化

`pinpoint`の所要時間は手動による導入と比較して短い場合もあれば長い場合もあり（3節）、`pinpoint`が必ずしも時間的効率を高めるとは限らないのが現状である。「迅速化」という課題は、先述の「成功率の向上」と相反することが多く悩ましいが、今後もノウハウを蓄積しながら改善を図りたい。例えば、現在は画像から検出された光源が宇宙線やノイズでなく天体であることを確認するために2回の撮像を行っているが（3節）、像の半値半幅や楕円率で適切に選別することで1回の撮像で済むかもしれない。⁴

5.3. 指向モードの指定

本稿執筆時点では、-Sオプションで simple mode を指定する以外に、観測者がモードを指定する方法はなく、2.3節、図2で説明した流れで自動判定される。しかし、観測者がモードを指定する機能が望まれる場合もあるかもしれません。例えば、以下のような場合が考えられる。

- ・ 対象天体が新星等の新天体でカタログに等級が記載されていないが、明るいために self-brightest mode が適していると考えられる場合
- ・ 対象天体が近傍銀河等の非恒星状天体で、たとえ明るくても self-brightest mode が適さないと考えられる場合

運用を続けながらモード指定の必要性を吟味し、必要に応じてオプションを追加したい。

5.4. ネットワーク環境への依存

`pinpoint`は、コマンド実行毎にSIMBAD等のオンラインデータベースにアクセスして天体情報を取得する。したがって、インターネットに接続していない時やサーバーが停止している時は、コマンドが正しく実行されない。幸いなことに、`pinpoint`の運用開始以降の約4年間

⁴ 現在でも、天体検出用のPythonライブラリsep (Barbary 2016; Bertin & Arnouts 1996) が出力するフラグを用いた選別は行っている。

でそのようなトラブルは報告されていない。今後、トラブルが頻発することになれば、取得したデータをローカルマシンに保存しておく等の対策を考える。

6. おわりに

本稿では、なゆた望遠鏡用に開発された補正機能付き指向コマンド *pinpoint* の概要を説明し、その効果と課題について議論した。*pinpoint* は NIC および MALLS に対応しているが、他の定常運用装置である WFGS2 (Uehara et al. 2004; 川上他 2021) や POPO (Takahashi et al. 2025) には未対応である。POPOへの対応は現在進行中であり、将来的には WFGS2 への対応も予定されている。

現在、なゆた望遠鏡では観測自動化が推進されている。自動化にはさまざまな開発項目があるが、天体導入における手動調整の排除は、極めて重要な課題のひとつであった。*pinpoint* コマンドの開発によって、部分的な自動観測（単一観測のスクリプト化）が実現し、さらに高度な自動化へ向けた基盤が築かれたと言える。

謝辞

本研究は部分的に、文部科学省の助成による光・赤外線天文学大学間連携事業およびJSPS科研費21K03648の支援を受けました。

References

- Barbary, K. 2016, Journal of Open Source Software, 1, 58
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393
- Monet, D. G., et al. 2003, AJ, 125, 984
- Skrutskie, M. F., et al. 2006, AJ, 131, 1163
- Takahashi, J., Itoh, Y., Tozuka, M., & Bach, Y. P. 2025, A&A, 703, A265
- Uehara, M., et al. 2004, Proc. SPIE, 5492, 661
- Wenger, M., et al. 2000, A&AS, 143, 9
- 新井 彰, 高木 悠平, 本田 敏志, 坂元 誠, 鳴沢 真也, 伊藤 洋一 2012, 西はりま天文台年報, 22, 34
- 石黒 正晃, 高橋 隼, 禅野 孝広, 時政 典孝, 黒田 武彦 2011, 西はりま天文台年報, 21, 13
- 尾崎 忍夫, 時政 典孝 2005, 西はりま天文台年報, 15, 15
- 川上 碧, 伊藤 洋一, 高橋 隼, 戸塚 都, 高山 正輝 2021, Stars & Galaxies, 4, 5
- 高橋 隼 2022, Stars & Galaxies, 5, 6
- 高橋 隼, 禅野 孝広, 斎藤 智樹, 伊藤 洋一 2018, Stars & Galaxies, 1,