

追尾エラーの定量的評価 実際の観測

沖田博文 (東北大)

2009/11/11

1 はじめに

南極 40cm 赤外線望遠鏡にはこれまでの観測から追尾誤差が存在することが確認されている。これらの原因として

1. 極軸が不一致 (望遠鏡の設置誤差)
2. 大気差 (地球大気の影響)
3. ピリオディックモーション (望遠鏡の加工精度)

が考えられる。ここで「追尾エラーの定量的評価 (沖田博文、2009 年 11 月 11 日レポート)」によると上記 3 つの成分は単位時間 (この場合 1 分間) あたりの時角 H 方向と赤緯 δ 方向に分けて

$$\Delta''_{RA} = \left\{ 902.465'' \times \left(\frac{\cos \delta \sin H_0}{\cos \delta \sin H_0 - 4.84814 \times 10^{-6} \epsilon_p'' \sin H_p \sin \delta} - 1 \right) - 0''.255078 \times \frac{\sin \delta \sin L \cos L \cos H_0 + \cos \delta \cos^2 L}{(\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H_0)^2} \right\} t + P_0'' \times \{ \sin(1.57510t + \phi) - \sin \phi \} \quad (1)$$

$$\Delta''_{Dec} = \left\{ -4.37527 \times 10^{-3} \epsilon_p'' \sin(H_0 - H_p) + 0''.255078 \times \frac{\sin L \cos L \sin H_0}{(\sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos H_0)^2} \right\} t \quad (2)$$

H_0	[rad]	ある天体の観測開始時刻における時角
δ	[rad]	ある天体の赤緯
L	[rad]	観測地の緯度
H_P	[rad]	望遠鏡の極軸のズレの時角
ϵ_p	[arcsec]	極軸ズレの大きさ
P_0	[arcsec]	ピリオディックモーションの振幅
ϕ	[rad]	ピリオディックモーションの位相
t	[min]	観測開始時刻からの経過時間

と書ける。そこでこのレポートでは実際に天体を観測し、これらの誤差を見積もっていく。

2 観測方法

南極 40cm 赤外線望遠鏡に接眼部を取り付け、SBIG 社製冷却 CCD カメラ ST-7XME-D を取り付け、15 秒インターバルで 3 秒間の露出を 1 つの天体あたり 50 回撮像を行った。表 1 に観測装置の各種パラメーターを示す。

望遠鏡	南極 40cm 赤外線望遠鏡
口径	400 [mm]
焦点距離	4800 [mm]
カメラ	ST-7XME-D
ピクセルサイズ	9 [μm]
冷却温度	-20 [$^{\circ}C$]
フィルター	V
露出時間	3 [sec]
露出間隔	15 [sec]

表 1 観測装置の各種パラメーター

またこれとは別にピクセルサイズの測定・カメラの取付角度 (CCD チップの xy 軸と時角 $H \cdot Dec$ 方向の角度) を測定する為、前者は離角の判っている二重星を、後者は明るい恒星を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止するといった観測でそれぞれ求めて観測データの補正に用いる。

3 観測

2009 年 10 月 27 日と 29 日の 2 夜観測を行った。観測した恒星の詳細を表 2、表 3 に示す。但し # 印のあるものは雲やドーム回転の震動によって観測星が写らなかつたりぶれてしまつて解析に使用できない画像があることを表している。

なおピクセルサイズ・カメラの取付角度の測定は 27 日、29 日両日とも行った。ピクセルサイズは $\theta 2$ -Ori の観測データから求め、またカメラの取付角は 27 日は $SAO11092$ (5.62 等)、29 日は $\alpha - Can$ (4.26 等) を観測して測定した。

観測天体	V-Mag.	Seeing	RA	δ	観測開始時刻	$H_0[rad]$
ι -Aur #	2.69	5".77	04 ^h 57 ^m 40 ^s .379	+33°10'55".877	22h03m10s	-1.07755
ι -Aur	2.69	6".59	04 ^h 57 ^m 40 ^s .379	+33°10'55".877	22h20m57s	-0.999747
η -Ori	3.35	6".56	05 ^h 25 ^m 00 ^s .072	-02°23'07".261	22h48m31s	-0.998378
θ 2-Ori	4.98	6".77	05 ^h 35 ^m 53 ^s .602	-05°24'24".125	23h03m57s	-0.978378
SAO80909	6.26	1".73	09 ^h 34 ^m 33 ^s .398	+23°24'32".356	04h41m29s	-0.542944
SAO59866 #	4.91	2".67	07 ^h 12 ^m 21 ^s .548	+38°18'08".941	03h59m24s	-0.106617
SAO59866 #	4.91	2".60	07 ^h 12 ^m 21 ^s .548	+38°18'08".941	04h09m37s	-0.0619159
SAO59866	4.91	2".12	07 ^h 12 ^m 21 ^s .548	+38°18'08".941	04h23m46s	-5.84008E-06
δ -Cap #	2.84	6".49	21 ^h 47 ^m 36 ^s .167	-16°04'49".669	20h35m55s	0.417239
SAO11092	5.62	2".69	03 ^h 02 ^m 55 ^s .604	+04°23'41".400	02h34m24s	0.609840
π -Pis	5.54	4".34	01 ^h 37 ^m 39 ^s .428	+12°11'43".260	03h06m25s	1.12200
ι -And	4.29	5".51	23 ^h 38 ^m 39 ^s .117	+43°19'40".284	03h30m14s	1.74545

表 2 2009 年 10 月 27 日の観測対象星

観測天体	V-Mag.	Seeing	RA	δ	観測開始時刻	$H_0[rad]$
SAO110921	5.62	5".15	03 ^h 02 ^m 55 ^s .620	+04°23'41".316	02h49m16s	0.759904
SAO110266	5.89	5".48	02 ^h 00 ^m 41 ^s .882	+03°08'53".293	03h11m00s	1.12652
θ 2-Ori	4.98	3".89	05 ^h 35 ^m 53 ^s .648	-05°24'24".340	03h31m10s	0.275783
SAO94043	5.78	3".05	04 ^h 38 ^m 45 ^s .311	+16°03'17".935	03h50m34s	0.627480
SAO13298	4.26	3".10	04 ^h 55 ^m 06 ^s .193	+66°21'27".336	04h10m40s	0.626590
α -Can #	4.26	4".70	08 ^h 59 ^m 02 ^s .237	+11°49'10".663	04h33m38s	-0.337288

表 3 2009 年 10 月 29 日の観測対象星

4 データ解析

4.1 カメラの取付角度の測定

カメラの取付角度、すなわち CCD チップの x 軸と時角方向のなす角度を明るい恒星を長時間露光中に望遠鏡の追尾を停止することで求めた。解析は ds9 に撮影した画像を表示させ、x 軸方向 50[pixel] 毎に位置を記録し、それらを直線でフィッティングし傾きを求めた。

図 1、図 2 はそれぞれ 27 日、29 日に測定したカメラの取付角度の解析結果である。

この結果から CCD チップの x 軸と時角方向のなす角は 27 日は 0.011527[rad]、29 日は 0.0164286[rad] であることが判った。

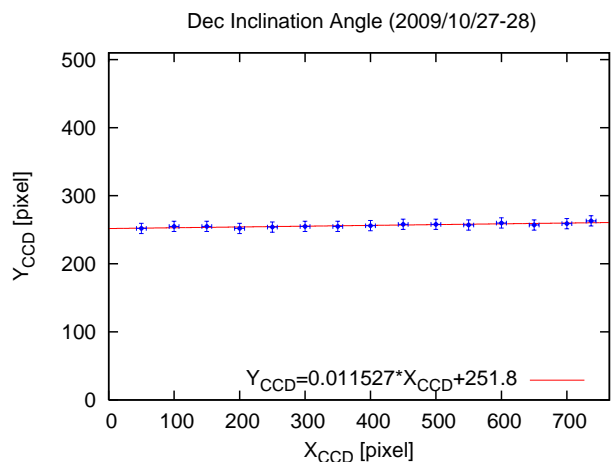


図1 取付角度の測定 (27日)

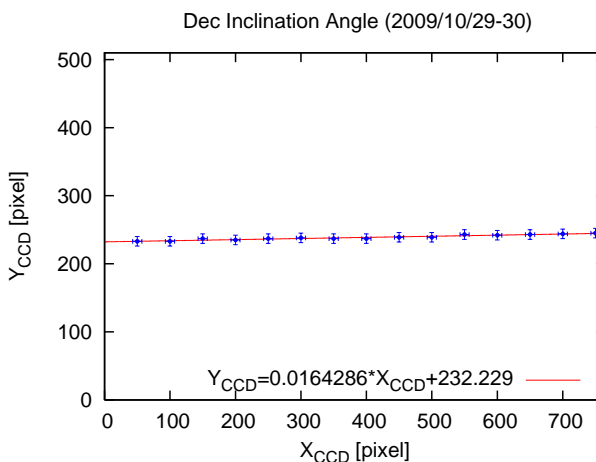


図2 取付角度の測定 (29日)

4.2 ピクセルサイズの測定

ピクセルサイズは27日、29日とも $\theta 1$ -Ori、 $\theta 2$ -Ori の離角から求めた。この天体の離角は「DIMM のピクセルサイズ測定 (沖田博文、2008年1月16日レポート)」の手法を用いて $135.07[\text{arcsec}]$ であることが判っている。そこで2つの天体の CCD のチップ上の位置を測定し、位置の差からピクセルサイズを求める。

シーイングの影響を除く為に観測日毎50フレームについて位置の測定を行った。結果を表4に示す。なお誤差は 1σ 。

27日	0.400 ± 0.001
29日	0.398 ± 0.000

表4 ピクセルサイズ [arcsec/pixel]

4.3 天体の位置測定・補正

IRAF の imexamine コマンドを用いて天体の CCD 上での位置を拾い、前述のカメラの取付角度・ピクセルサイズを補正し、さらに横軸を時角方向 (+ が西、- が東)、縦軸を赤緯 (+ が北、- が南) となるように変換した。imexamine で log ファイルを出力する設定にし、その log ファイルから必要な情報を読み出し座標変換を awk ファイルで行った。

また観測開始時刻からの経過時間やシーイング (星の FWHM) も併せて記録した。

5 理論曲線とのフィッティング

5.1 大気差の補正

大気差による時角・赤緯方向の追尾エラーは式 1、式 2 によると観測時の天体の時角 H_0 、赤緯 δ 、観測地の緯度 L で一意に求まる。よってあらかじめ大気差による移動量は差し引くことができる。

5.2 設置誤差の見積もり・補正

設置誤差は式 2 の第 1 項より

$$-4.37527 \times 10^{-3} \epsilon_p'' \sin(H_0 - H_p)t \quad (3)$$

ここから単位時間 (1 分間) あたりの赤緯方向の天体の移動は時角 H_0 の \sin 関数として表れることがわかる。27 日、29 日の観測データから単位時間あたりの赤緯方向のエラーを時角を横軸に示したものが図 3 である。誤差は観測天体の FWHM(シーイング値) を観測回数の平方根で割ったもので評価した。

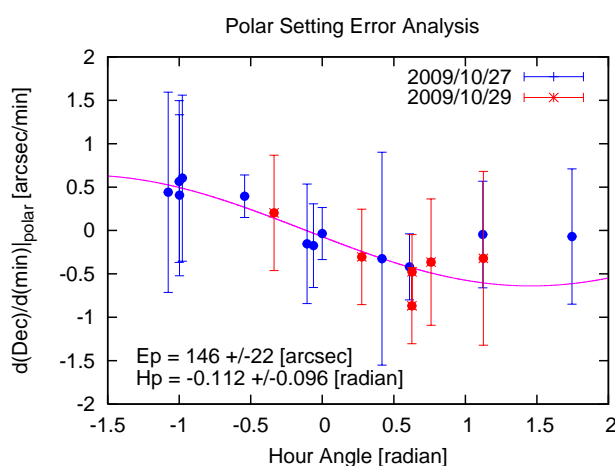


図 3 単位時間あたりの赤緯エラー量と時角の関係

この結果から、望遠鏡の設置誤差は $\epsilon_p = 146 \pm 22[\text{arcsec}]$ 、 $H_p = -0.122 \pm 0.096[\text{radian}]$ であると見積もることができる。

5.3 ピリオディックモーションの見積もりとその他エラーのフィッティング

観測される追尾エラーには設置誤差によるエラー、大気差によるエラー、ピリオディックモーションのほかにも原因不明のエラー成分が測定される可能性がある。そこで式 1、式 2 を以下のように書き改める。

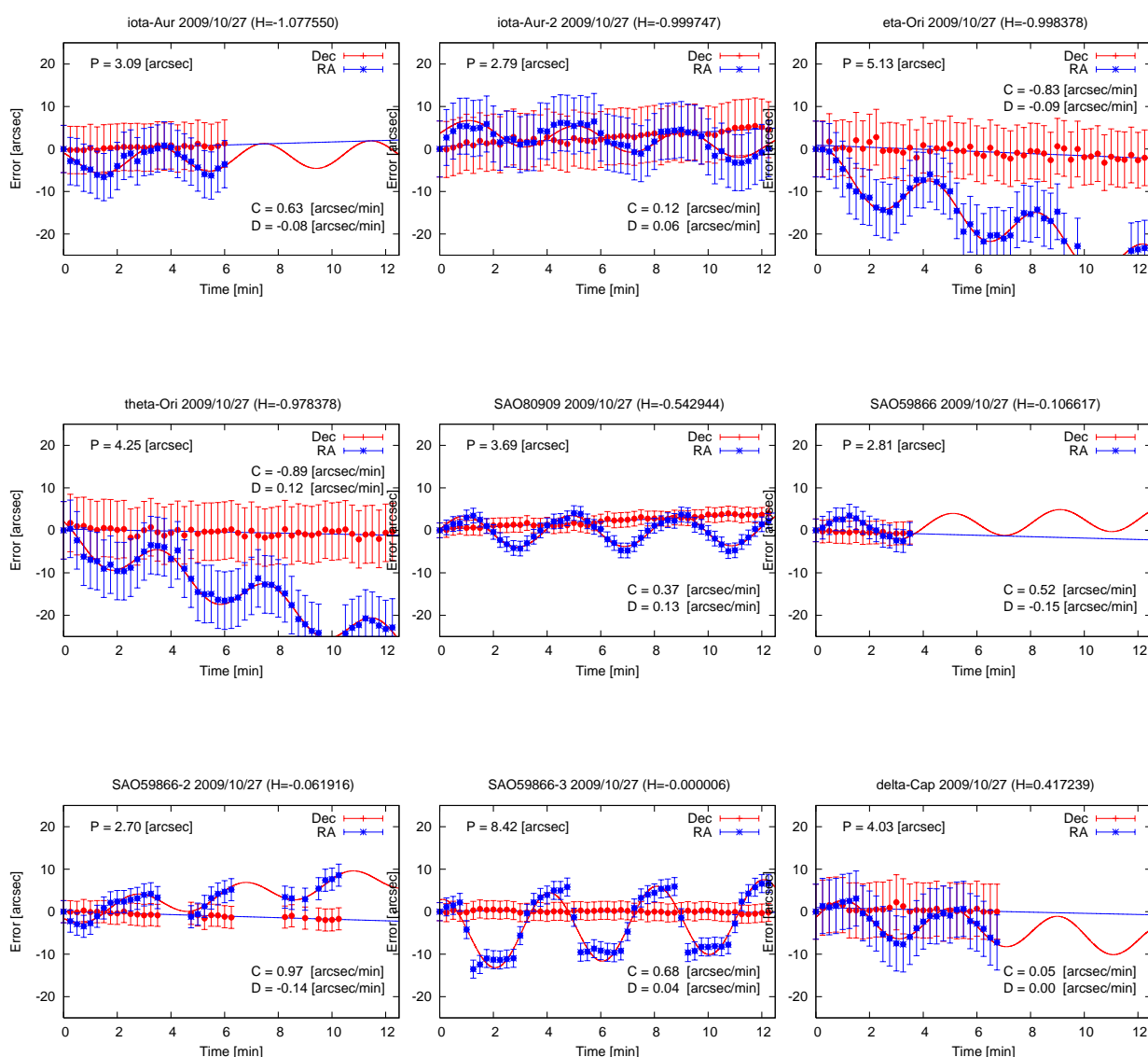
$$\Delta_{RA}'' = (\Delta_{pol}'' + \Delta_{atm}'' + \Delta_{?}'')_{RA} t + P_0'' \{ \sin(1.57510t + \phi) - \sin \phi \} \quad (4)$$

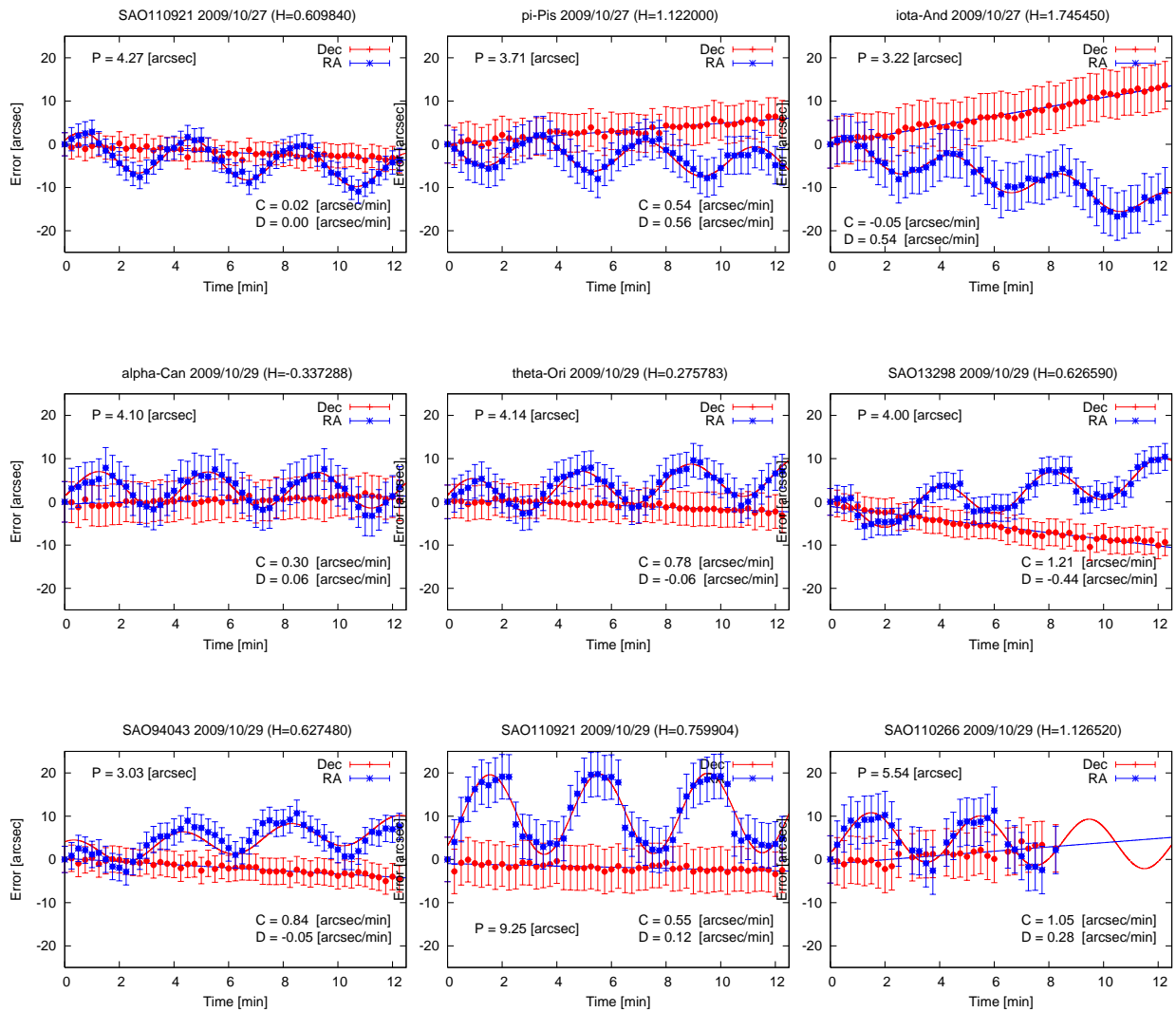
$$\Delta_{Dec}'' = (\Delta_{pol}'' + \Delta_{atm}'' + \Delta_{?}'')_{Dec} t \quad (5)$$

Δ''_{pol} [arcsec/min] は単位時間あたりの設置誤差によるエラーで Δ''_{atm} [arcsec/min] が大気差によるエラーである。これらによる追尾エラーに加え、原因不明のエラー成分として $\Delta''_{?}$ [arcsec/min] をそれぞれ加えてある。またピリオディックモーションによる追尾エラーは式 4 の第 4 項である。

理論曲線は設置誤差によるエラー・大気差によるエラーをあらかじめ与え、原因不明のエラー $\Delta''_{?}$ ・ピリオディックモーションの振幅 P''_0 ・位相 ϕ をパラメーターとして gnuplot で観測結果とフィッティングを行いその量を見積もった。

以下がその結果である。図中の P はピリオディックモーションの振幅 [arcsec]、 C は時角方向の原因不明のエラー [arcsec/min]、 D は赤緯方向の原因不明のエラー [arcsec/min] である。





6 考察

6.1 取付誤差

冷却 CCD カメラ ST-7XME-D は 27 日と 29 日の観測期間中、1 度も望遠鏡から取り外しておらず取付誤差は変わらないはずである。よって 27 日と 29 日の傾きの違いは測定誤差の可能性が高い。

(しかしながら今回のデータ解析では 27 日のデータは 27 日の傾きで、29 日のデータは 29 日の傾きで計算を行った。)

6.2 ピクセルサイズ

27 日と 29 日の観測でピクセルサイズが微妙に異なるのは、気温の違いによって焦点距離が微妙に変化したものと考えられる。ピクセルサイズから推定される南極 40cm 赤外線望遠鏡の焦点距離は 27 日が 4640[mm]、

29 日が 4660[mm] である。カセグレン光学系は主鏡-副鏡の間隔が変化すると大きく焦点位置が変わることが知られている。南極 40cm 赤外線望遠鏡も副鏡を光軸に対して前後に動かすことでピントを調整している。その為今回の観測で観測日によってピクセルサイズに違いが生じているのは気温変化に伴って主鏡-副鏡の距離が変化しその結果生じたものと考えて問題ないと言える。

6.3 ピリオディックモーションの大きさ

観測されたピリオディックモーションの大きさは観測対象星によって大きく異なる。これはウォームネジとウォームホルダーのアタリが時角毎に違う為と考えられる。

図 4 に今回の観測で得られたピリオディックモーションの大きさの分布 (ヒストグラム) を示す。

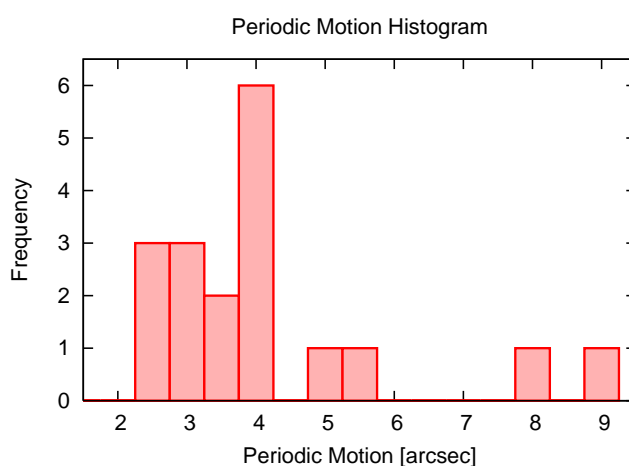


図 4 ピリオディックモーションの分布

今回の観測で得られたピリオディックモーションの平均値は $4.3 \pm 1.8[\text{arcsec}]$ (誤差は 1σ) で、ヒストグラムの形からも概ね 4 秒角前後であると言える。

6.4 原因不明の追尾エラー

時角方向、赤緯方向それぞれの原因不明のエラーも観測対象星によって異なる。図 5、図 6 にそのヒストグラムを示す。

これらの平均値は時角方向が $+0.38 \pm 0.58[\text{arcsec}/\text{min}]$ 、赤緯方向が $+0.05 \pm 0.24[\text{arcsec}/\text{min}]$ (誤差は 1σ)。赤緯方向は十分に誤差内で 0 と見なせるが、時角方向は広く分布しているものの概ねプラス側、つまり追尾が見かけ上早くなるようなエラーが生じていることが判る。

追尾が見かけ上早くなるようなエラーとは、具体的に考えられるのは「鏡筒のたわみ」である。以前のレポート、「鏡筒のたわみによる追尾エラーへの影響の検証 (沖田博文、2009 年 4 月 2 日レポート)」で南極 40cm 赤外線望遠鏡の鏡筒のたわみは生じないと結論づけられていたが、南極 40cm 赤外線望遠鏡はその後何度も分解され、その度に組み立て直されており、今回たまたま望遠鏡の組み立ての際に締め付けが足りなかった可能性も十分にある。

よって「鏡筒のたわみ」による追尾エラーが存在すると考えられる。

また以前より問題であった「原因不明の追尾の遅れ」は観測されなかった。これは 2009 年 5 月に IK 技研

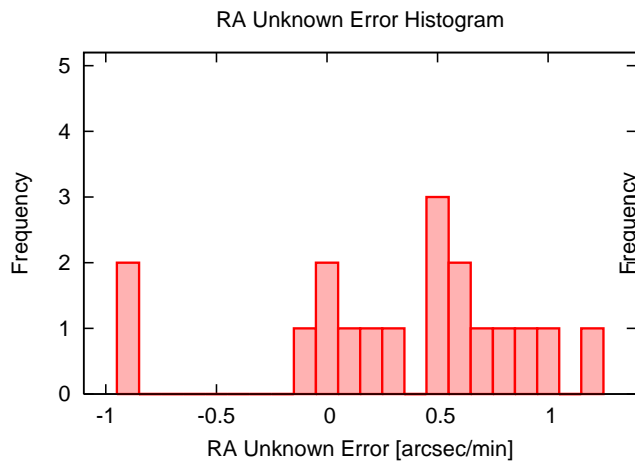


図5 時角方向の原因不明のエラー

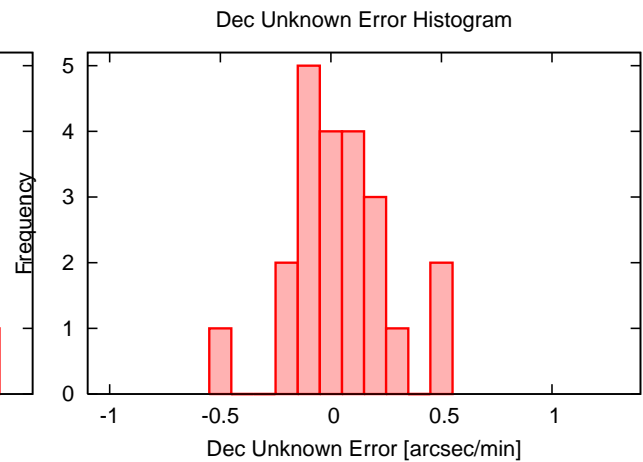


図6 赤緯方向の原因不明のエラー

で行った RA 軸改造工作によってスリップが生じない構造になった為だと考えられる。

7 まとめ

2009年10月27日、29日に追尾エラーの測定を行った。南極40cm赤外線望遠鏡にST-7XME-Dを取り付け、15秒間隔で3秒露出を50回繰り返し天体の位置の時間変化を記録した。この観測結果から大気差・設置誤差・ピリオディックモーションを見積もり、さらに説明できない成分 $\Delta?$ を求めた。この $\Delta?$ はその向きから鏡筒のたわみの成分であると考えられる。結果、南極40cm赤外線望遠鏡の設置誤差は $\epsilon_p = 146 \pm 22$ [arcsec]、 $H_p = -0.122 \pm 0.096$ [radian]であり、ピリオディックモーションは 4.3 ± 1.8 [arcsec]、時角方向の鏡筒のたわみによるエラーは $+0.38 \pm 0.58$ [arcsec/min]であることがわかった。

8 参考文献

1. DIMMのピクセルサイズ測定、沖田博文(2008/01/16レポート)
2. 鏡筒のたわみによる追尾エラーへの影響の検証、沖田博文(2009/04/02レポート)
3. RA軸受け改造後のクラッチ部スリップ測定、沖田博文(2009/10/27レポート)
4. 追尾エラーの定量的評価、沖田博文(2009/11/11レポート)