

南アフリカ 1.4m 望遠鏡の建設と評価

加藤 大輔

2001. 1.31

概要

我々Z研は2000年10月、口径1.4m光赤外望遠鏡を南アフリカ天文台サザーランド観測所に設置した。本望遠鏡の光学系はクラシカル・カセグレン式で、主鏡のF値2.9、合成F値9.9である。我々は本望遠鏡に近赤外3色同時サーベイ用カメラSIRIUSを取り付けて近赤外サーベイ観測を行う。

本望遠鏡の制御系は望遠鏡制御ソフトウェア、モータ制御ソフトウェア、そして駆動系(モータ・エンコーダ等)からなる。私は望遠鏡制御ソフトウェアの製作を行った。望遠鏡制御ソフトウェアの主な役割は、天体位置計算を行うこととモータ制御ソフトウェアへ指令を送ることである。

観測において、指向精度10[秒角](RMS)、追尾精度0.5[秒角/5分]が要求される。私はこれらの要求を満たすために、角度エンコーダ誤差のソフトウェアによる補正と、制御時における望遠鏡の振動の軽減を行い、望遠鏡制御系全体の駆動性能を向上させた。

その上で、私は本望遠鏡の指向精度・追尾精度を測定した。また、本望遠鏡の光学性能を評価するためのハルトマンテストを行った。以下にその結果を示す。

1. 指向精度

全天100個以上の星を導入する観測を10回繰り返して行い指向精度を求めた。その結果、指向精度は 17.4 ± 0.9 [秒角](RMS)であった。望遠鏡設置の際に生じる、望遠鏡基礎の傾き、望遠鏡構造の組立誤差・たわみをもたらす系統的な誤差を定量的に求め、天体位置計算に補正項を導入した結果、指向精度 2.9 ± 0.9 [秒角](RMS)を達成した。

2. 追尾精度

高度30~88°の20個の星について追尾精度を測定した。その結果、高度80°以下の星では、追尾精度が0.5[秒角/5分]より良いことを確認した。

3. ハルトマン定数

異なる星の光を用いて13回のハルトマンテストを行った。その結果、本望遠鏡のハルトマン定数は 0.42 ± 0.02 [秒角]であった。

指向精度、追尾精度は必要とされる精度を満たしている。また、2000年11月より本望遠鏡とSIRIUSを用いた観測を開始しているが、これまでに望遠鏡制御の不具合は起きておらず、順調に観測を続けている。

目次

第 1 章	南アフリカ 1.4m 望遠鏡	3
1.1	望遠鏡建設の目的	3
1.2	望遠鏡建設地の選定	3
1.3	経緯台式望遠鏡の採用	4
第 2 章	望遠鏡制御系概要	6
2.1	制御系構成要素	6
2.2	望遠鏡制御ソフトウェア	7
2.2.1	天体位置計算	7
2.3	モータ制御ソフトウェア	9
2.3.1	時刻の取得について	9
2.3.2	制御モードについて	9
2.3.3	ハンドコントローラについて	9
2.4	駆動系	10
2.5	開発環境	10
2.5.1	5 分の 1 モデルを用いたソフトウェア開発	10
2.5.2	京都における望遠鏡仮組み立てと制御試験	10
2.5.3	南アフリカサザerland 観測所への設置と性能評価	10
第 3 章	駆動精度の向上	11
3.1	要求される精度	11
3.1.1	駆動精度	11
3.2	制御時における望遠鏡の制振 (振動の軽減)	12
3.2.1	モータの発振	12
3.2.2	望遠鏡構造の振動	14
3.3	エンコーダ値補正	15
3.3.1	誤差発生の原因の考察	16
3.3.2	エンコーダ誤差のソフトウェアによる補正	18
3.3.3	補正後の駆動精度	19
3.4	到達予定時刻について	20
3.5	南アフリカでの駆動精度測定結果	21
3.5.1	駆動精度測定	21
3.5.2	異なる速度での駆動精度測定	22

第 4 章 望遠鏡性能評価	24
4.1 指向精度	24
4.1.1 望遠鏡解析とは	24
4.1.2 望遠鏡解析と指向精度の算出方法	24
4.1.3 指向精度の測定	29
4.1.4 考察	31
4.2 追尾精度	34
4.2.1 観測する星の選択	34
4.2.2 追尾精度の測定方法	34
4.2.3 結果	34
4.2.4 考察	34
4.3 望遠鏡の光学性能評価	37
4.3.1 光学系パラメータ	37
4.3.2 光軸調整	41
4.3.3 ハルトマンテスト	42
付録 A 望遠鏡制御系の仕様	47
付録 B 各軸の駆動精度元データ	51

第1章 南アフリカ 1.4m 望遠鏡

1.1 望遠鏡建設の目的

本望遠鏡は近赤外 3 色同時サーベイ用カメラ SIRIUS を用いてサーベイ観測を行うための専用望遠鏡である。サーベイ観測は全天ではなく、以下の領域について行う。

- 大小マゼラン雲
- 銀河中心
- 星形成領域

近赤外線は可視光に比べて塵による吸収の影響を受けにくいいため、塵に覆われた生まれたばかりの若い星を探すのに適している。

南天の近赤外 3 色サーベイ観測は我々以外にも DENIS、2MASS などで行われているが、我々の観測はこれらよりも深く細かく行う。各サーベイ観測の主なパラメータを示す。

	DENIS			2MASS			我々		
観測波長 [μm]	0.82	1.25	2.15	1.25	1.65	2.16	1.25	1.65	2.15
(バンド名)	I	J	Ks	J	H	Ks	J	H	Ks
画素数 (1 辺)	1024	256	256	256	256	256	1024	1024	1024
画素スケール [秒角]	0.7	3	3	2			0.45		
視野 [分角]	12			8.5			7.8		
積分時間 [秒]	1.22 × 9			1.3 × 6			30 × 36		
限界等級 (10σ)	18.5	16.5	14.0	16.3	15.3	14.7	19.0	18.5	17.5
望遠鏡	ESO 1m			Mt.Hopkins 1.3m CTIO 1.3m			SAAO 1.4m		
観測対象領域	赤緯+2°以南の全天			全天			数 10 平方度		
観測開始時期	1995.12			1997.4			2000.11		

表 1.1: 他の近赤外 3 色サーベイ観測との比較

1.2 望遠鏡建設地の選定

大小マゼラン雲、銀河中心はともに南天にあり、望遠鏡は南半球に建設する必要がある。また、効率よく精度の高い観測を行うためには、高い晴天率を持ち、大気の状態が良く星の見かけの角度 (星像) が小さい場所が望ましい。このような条件を満たす場所を探した結果、我々は南アフリカ天文台サザランド観測所に望遠鏡を建設することにした。当観測所の主な情報を以下に示す。

表のシーイングサイズは星像の大きさで値は平均値、測光夜率はサーベイ観測が可能な夜である確率である。

項目	値
経度	東経 20 度 48 分 38 秒
緯度	南緯 32 度 22 分 48 秒
標高	1761m
シーイングサイズ	0.9 秒角
測光夜率	約 50%

表 1.2: 南アフリカ天文台サザーランド観測所の主な情報

1.3 経緯台式望遠鏡の採用

天体観測時に、天体を追尾する器械を架台という。架台には赤道儀式と経緯台式という 2 つの種類がある。また、本望遠鏡のように望遠鏡 (おもに光学系) と架台が一体となっている場合、それぞれ赤道儀式望遠鏡、経緯台式望遠鏡と呼ぶ。

赤道儀式は地球の自転軸に平行な軸 (極軸) とそれに直交する軸 (赤緯軸) のまわりで可動になっていて、天体追尾時には極軸のみを駆動させる。経緯台式は水平方向に動く軸 (方位軸) とそれに対して垂直な軸 (高度軸) のまわりで可動になっている。

赤道儀式・経緯台式の長所・短所を以下に示す。

架台	長所・×短所
赤道儀式	<p>駆動は一定の角速度 (地球の自転角速度) でよいため制御が楽である</p> <p>× 極軸を地球の自転軸と平行にするために機械的に不安定な構造となる</p>
経緯台式	<p>地面に対して垂直に設置するため機械的に非常に安定な構造となる</p> <p>望遠鏡構造・観測ドームを赤道儀式に比べて小さくすることができる</p> <p>× 天体追尾時における方位・高度両軸の制御が複雑である</p> <p>× 視野が回転するのを防ぐための第 3 の軸 (姿勢軸) を制御しなければならない</p>

表 1.3: 赤道儀式と経緯台式の長所・短所

我々は経緯台式の構造が安定でしかも小さく作ることができることに注目した。また、方位、高度、さらに姿勢軸の制御の複雑さは近年の計算機の進歩による駆動に必要な計算の高速化によって克服できると考えた。このような理由から我々は本望遠鏡では経緯台式を採用した。

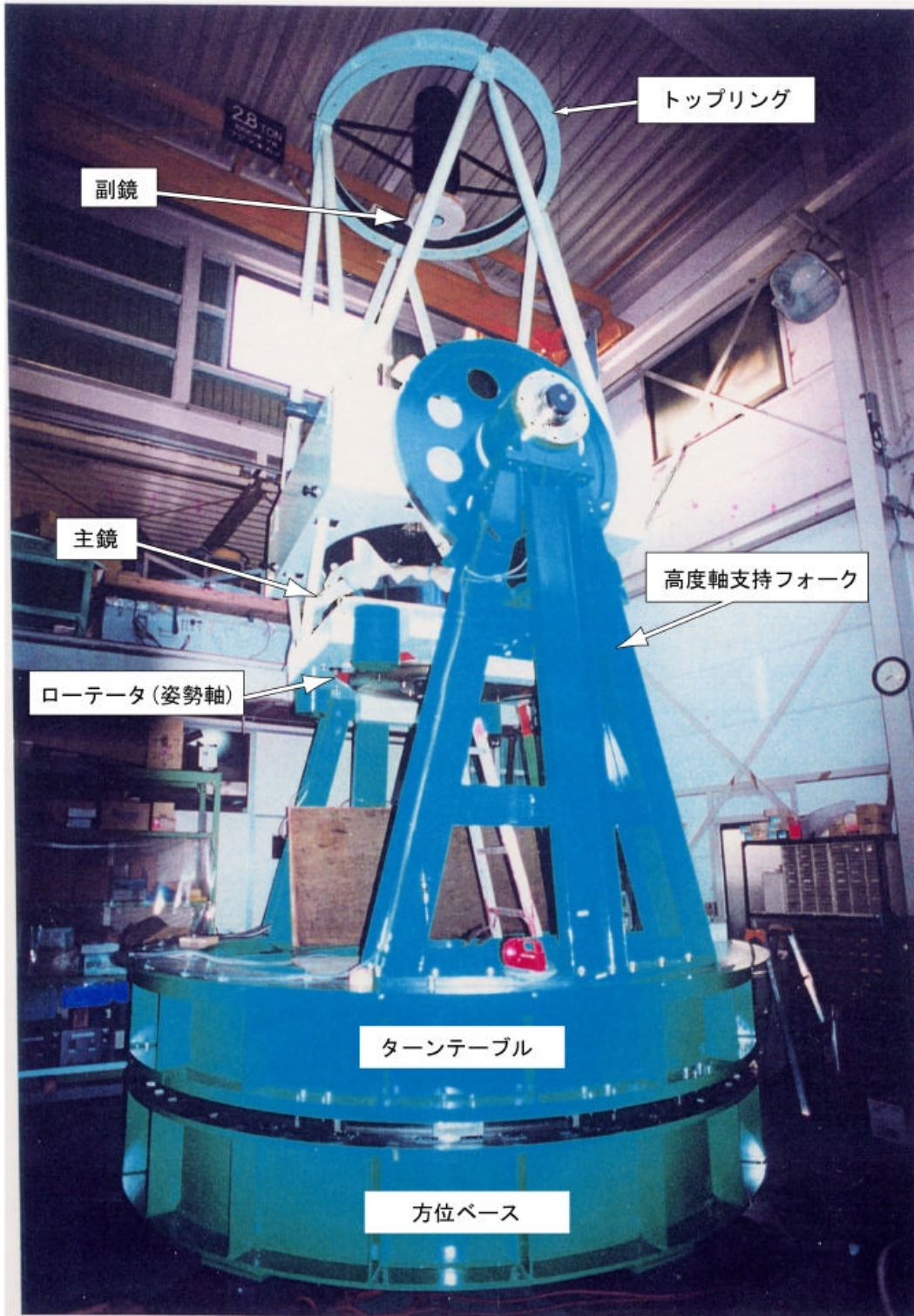


図 1.1: 望遠鏡全体図と各部の名称@京都西村製作所工場内

第2章 望遠鏡制御系概要

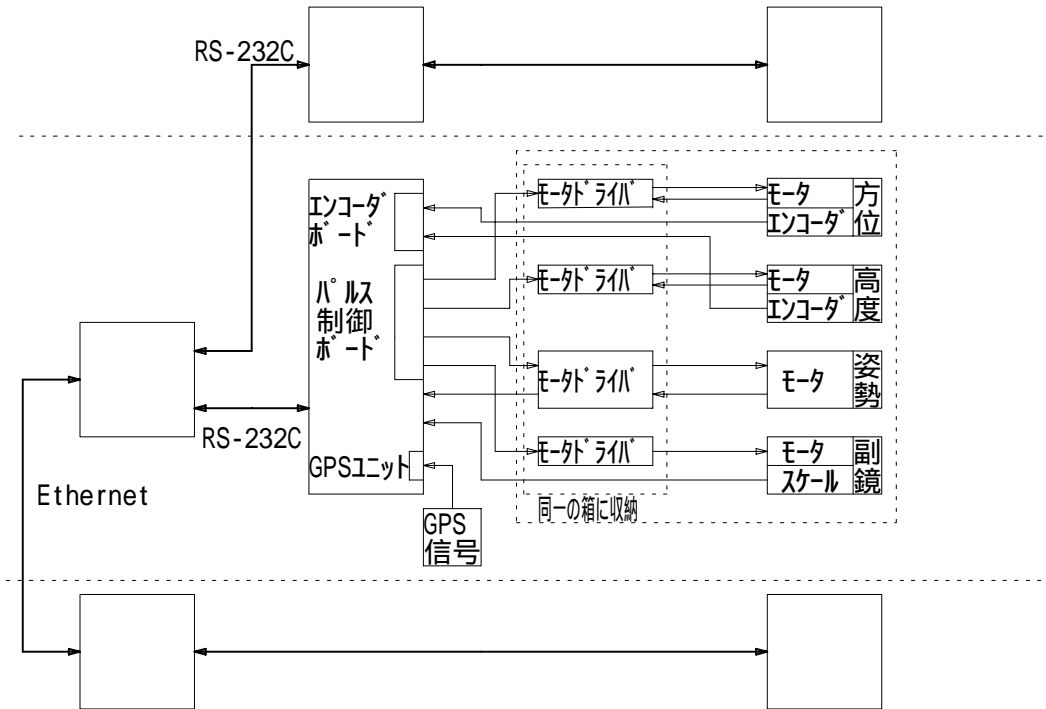


図 2.1: 望遠鏡制御系概略図

2.1 制御系構成要素

本望遠鏡制御系は以下の要素からなる。

1. 望遠鏡制御 PC(ソフトウェア)
2. モータ制御 PC(ソフトウェア)
3. 駆動系 (モータドライバ・モータ・エンコーダ)

望遠鏡制御系は、天体追尾時には以下のようなサイクルで制御を行う。

1. モータ制御ソフトウェアはエンコーダ値などのステータスを入手する
2. モータ制御ソフトウェアは望遠鏡制御ソフトウェアへステータスを送信する
3. 望遠鏡制御ソフトウェアは受信したステータスを基に天体位置計算を行う
4. 望遠鏡制御ソフトウェアはモータ制御ソフトウェアにコマンドを送信する
5. モータ制御ソフトウェアはモータドライバへ送る命令 (パルス数) を計算する

6. モータ制御ソフトウェアはモータドライバへ命令 (パルス数) を送る
7. モータドライバはその命令 (パルス数) に従ってモータを制御する

モータ制御ソフトウェアは前のサイクルが始まってから 0.1 秒間経過するのを待って同じプロセスを繰り返す。

なお、望遠鏡制御 PC、モータ制御 PC、駆動系の仕様を付録に示す。

2.2 望遠鏡制御ソフトウェア

望遠鏡制御 PC は、OS に TurboLinux2 を使用しており、カーネルは Linux2.0.35 である。望遠鏡制御ソフトウェアは望遠鏡制御 PC 内で動作するソフトウェアであり、プログラミングには C 言語を用いた。望遠鏡制御ソフトウェアは主に以下の仕事を行っている。

- 天体位置計算を行い、モータ制御ソフトウェアに移動命令を送る
- 天体追尾時にドームが連動するようドームコントローラを制御する
- SIRIUS 制御 WS を含むユーザからの命令を受け付ける

モータ制御ソフトウェア、ドームコントローラとの間では RS-232C ケーブルを介したシリアル通信を行っている。通信の仕様を付録に載せる。

本望遠鏡に SIRIUS を取り付けて観測を行うとき、SIRIUS 制御 WS が望遠鏡制御ホストへ命令を発行する。望遠鏡制御ソフトウェアと SIRIUS 制御 WS は Ethernet を介したプロセス通信を行う。望遠鏡制御ソフトウェアが受け付けるコマンドとその形式を付録に載せる。

2.2.1 天体位置計算

望遠鏡制御ソフトウェアで行っている天体位置計算について説明する。まず天体位置計算で用いている 2 つの座標系、赤道座標系と地平座標系について説明する。

赤道座標系 (赤経・赤緯座標)

天体の位置を表すには、天体に対しては固定し見かけ上は日周運動と一緒に動いていく座標系を取るのが便利である。このような座標系で通常使われているのが、赤経 (R.A.) と赤緯 (Dec.) となる赤道座標系である。

地球を取り巻く非常に大きな球面を考え、これを天球と呼ぶ。地球の自転軸を南北それぞれに延ばして天球と交わったところをそれぞれ天の南極、天の北極といい、地球の赤道を通る平面と天球との交線を天の赤道という。この天の赤道を 0° 、天の北極・南極をそれぞれ $+90^\circ - 90^\circ$ として赤緯が決められる。また、太陽は 1 年間で天球上を一周するが、その通る道筋を黄道という。黄道と天の赤道が交わる 2 点のうち、太陽が天の赤道の南側から北側へ通過する方の交点を春分点という。この春分点を 0 時 (h) として、東周りで一周して 24 時 (h) となるように赤経が決められる。

地平座標系 (方位・高度座標)

観測者から見たとき観測天体がどこにあるかを表す座標系として使われるのが地平座標系である。

観測者のいる点Oを中心とした天球を考える。天球とOを通る鉛直線が交わる2点のうち、上側を天頂、下側を天底という。Oを通る水平面と天球との交線を地平線とする。地平線を0°、天頂・天底をそれぞれ+90°-90°として高度が決められる。地平線上に東西南北の4つの方位を決めることができる。南を0°として、東回りで一周して+360°となるように方位が決められる。

姿勢軸と望遠鏡の限界可動範囲について

経緯台式望遠鏡では、方位・高度の変化に応じて視野が回転する。よって視野に合わせて観測装置を回転する「第3の軸」が必要である。ここではこの軸を「姿勢軸」と呼ぶこととする。ある方位・高度における姿勢は方位・高度のみから計算することができる。

また、本望遠鏡では各軸の限界可動範囲を以下のように設定した。

- 方位 $-270^{\circ} \sim +270^{\circ}$
- 高度 $+20^{\circ} \sim +90^{\circ}$
- 姿勢 $-270^{\circ} \sim +270^{\circ}$

方位・姿勢は $-270 \sim -90^{\circ}$ と $+90 \sim +270^{\circ}$ で重複する。重複している角度で追尾を行う場合、基本的には正の値を選び、下の条件を満たすときのみ負の値を選ぶこととした。

- 目標角度が $180 \sim 270^{\circ}$ で現在角度が 90° 以下
- 目標角度が $90 \sim 180^{\circ}$ で現在角度が -90° 以下

天体位置計算

本望遠鏡において、天体位置計算とは天体の位置を赤道座標系から地平座標系へ変換することである。赤道座標系は日周運動にあわせて回転するので、この変換には時刻が必要である。また、地球の自転軸の回転・振動による歳差運動・章動、地球の公転によって天体の見かけの位置がずれる年周光行差を考慮する必要がある。地平座標系へ変換したあとも、地球の大気で光線が屈折することによる大気差の計算や、指向精度の項で後述する望遠鏡解析による補正を行う必要がある。

望遠鏡制御ホストでは、以下の順で天体位置計算を行っている。

1. 現在の時刻からユリウス日を求める
2. 1で求めたユリウス日から地方恒星時を求める
3. 歳差、年周光行差、章動の補正を行う
4. 地方恒星時、赤経、赤緯から方位、高度を求める
5. 方位、高度から姿勢を求める
6. 方位、高度、姿勢の速度を求める
7. 望遠鏡解析による補正項を追加する
8. 大気差の補正を行う
9. 方位・姿勢が重複するとき、正負どちらかを選択する

2.3 モータ制御ソフトウェア

モータ制御 PC は、OS に MS-DOS 6.2/V を使用している。モータ制御ソフトウェアはモータ制御 PC 内で動作するソフトウェアである。プログラミングには C 言語を用いている。モータ制御ソフトウェアは主に以下の仕事を行っている。

- 時刻を取得する
- モータへ送るパルス数を計算する
- 各軸の角度を取得する

2.3.1 時刻の取得について

モータ制御ソフトウェアは GPS によって正確な時刻を入手している。南アフリカ天文台の観測ドームには GPS 時刻入手ユニットがあり、モータ制御 PC に専用の GPS ボードを装着することで時刻入手が可能になる。GPS から入手できる時刻は 1 秒単位である。モータ制御ソフトウェアはさらに 10 分割して 0.1 秒単位の時刻を作っている。

2.3.2 制御モードについて

モータ制御ソフトウェアには以下の 3 つの制御モードがある。

1. 追尾モード
2. 手動モード
3. メンテナンスモード

追尾モードは望遠鏡制御ソフトウェアからの、手動モードはハンドコントローラからの指令で動作するモードで、ハンドコントローラのモード切替スイッチによって切り替えることができる。メンテナンスモードは各種パラメータの設定や動作確認を行うためのモードで、モータ制御 PC に取り付けたキーボードの ESC キーで切り替えることができる。

2.3.3 ハンドコントローラについて

モータ制御ソフトウェア PC には、ハンドコントローラが装着されている。ハンドコントローラのボタンを押すことで以下のことを行うことができる。

- 方位・高度・姿勢軸の駆動
- 副鏡位置移動
- ドーム回転、ドーム上下シャッター開閉
- 非常停止
- 制御モード切り替え

方位・高度・姿勢軸の駆動、ドーム駆動は追尾モード時には行うことができない。

方位・高度・姿勢軸の駆動は台形駆動で、加速度、最高速度はメンテナンスモード時に設定することができる。またこの駆動は角度エンコーダによるフィードバックを行わない。

2.4 駆動系

駆動系は、モータ、モータドライバ、角度エンコーダ(スケール)からなる。方位・高度軸はエンコーダによって角度情報を得ているが、姿勢軸はモータ内蔵エンコーダから角度情報を得ている。また、副鏡位置情報はスケールカウンターから得ている。モータドライバは受け取ったパルス数にモータの角分解能をかけた角度だけモータを回転させる。

2.5 開発環境

望遠鏡制御系の2つのソフトウェアの製作は別々に行った。モータ制御ソフトウェアはソフトウェア製作会社 JSC が開発し、望遠鏡制御ソフトウェア開発は私が担当した。

2.5.1 5分の1モデルを用いたソフトウェア開発

望遠鏡制御ソフトウェア、モータ制御ソフトウェアを開発するにあたり、望遠鏡の架台部分について実機の5分の1のサイズのモデルを製作した。実機に近い制御系を用いてソフトウェアの作成・デバッグを行うことで、効率の良いソフトウェア開発を行うためである。

モータ制御ソフトウェア開発は1998年12月より行われ、1999年6月に第1版が完成した。私は望遠鏡制御ソフトウェア開発を1999年3月より行い、1999年6月に第1版が完成した。その後は両ソフトウェアのデバッグをシーク電子、JSC とともにに行い、10月より5分の1モデル架台を用いた試験観測を名古屋大学内で行った。

2.5.2 京都における望遠鏡仮組み立てと制御試験

名古屋大学と西村製作所の本望遠鏡開発プロジェクトチームは、京都市内の西村製作所工場内において本望遠鏡の仮組み立てを行った。現地への設置を円滑に行うために、あらかじめ日本国内で問題点を発見し、解決するのが目的である。1999年11月より本望遠鏡の仮組み立てを開始し、2000年2月よりすべての制御系を組み合わせた制御試験を開始し、2000年6月に試験を終えた。

2.5.3 南アフリカサザーランド観測所への設置と性能評価

2000年7月より望遠鏡の解体・梱包を行った。南アフリカへの輸送を行い、2000年9月に南アフリカサザーランドへ到着した。2000年10月までに望遠鏡を現地へ設置し、性能評価を行った。

第3章 駆動精度の向上

3.1 要求される精度

望遠鏡とは、天体の方向を向いて追いかける装置である。天体の方向を向く正確さを指向精度、天体を追いかける正確さを追尾精度という。

本望遠鏡では、指向精度、追尾精度の目標を以下のように設定した。

- 指向精度 10[秒角](RMS)
- 追尾精度 0.5[秒角/5分]

本望遠鏡と SIRIUS を組み合わせたとき、視野は 7.8[分角] × 7.8[分角]、ピクセルスケールは約 0.5[秒角] である。天体を導入するたびに微調整をせずに観測を行えるような誤差の小さい導入をしないと、観測効率が落ちる。効率の良い観測を行うための目標として指向精度の目標を設定した。また、追尾精度は星像が 1 ピクセル以内に収まるように設定した。

3.1.1 駆動精度

駆動精度の定義と測定方法

5 分間の等速運転を行い、0.1 秒ごとに各軸の角度エンコーダ値を記録する。また、その時刻に望遠鏡制御ソフトウェアからモータ制御ソフトウェアへ送った、各軸の指令角度を記録する。2 つの値の差を追尾誤差として、その平均値を求めこれを「遅れの平均」とする。各時刻の追尾誤差について遅れの平均からの標準偏差を求める。5 分間の標準偏差の平均値を「駆動精度」とする。

必要な駆動精度

追尾精度は方位・高度両軸がいかに精度良く駆動するかに依存する。追尾精度 0.5[秒角/5分] を満たすためには、方位・高度両軸でそれぞれ $0.5/\sqrt{2} = 0.35$ [秒角/5分] の駆動精度が必要である。また、天体追尾中においては視野が回転しない事が望ましい。SIRIUS で使用する検出器のアレイは 1024×1024 である。検出器の両端で視野が 1 ピクセルだけ回転しているときの回転角度は、 $1 \div 1024 = 3$ [分角] である。方位・高度・姿勢 3 軸の目標駆動精度を、上に挙げた条件を十分に満たすよう、以下のように設定した。

- 方位・高度 0.2[秒角/5分]
- 姿勢 60[秒角/5分]

上記の精度を達成するために制御系でいくつかの改善をしたが、そのうちの主な 2 つを以下に示す。制御時における望遠鏡の制振とエンコーダ値誤差の補正である。

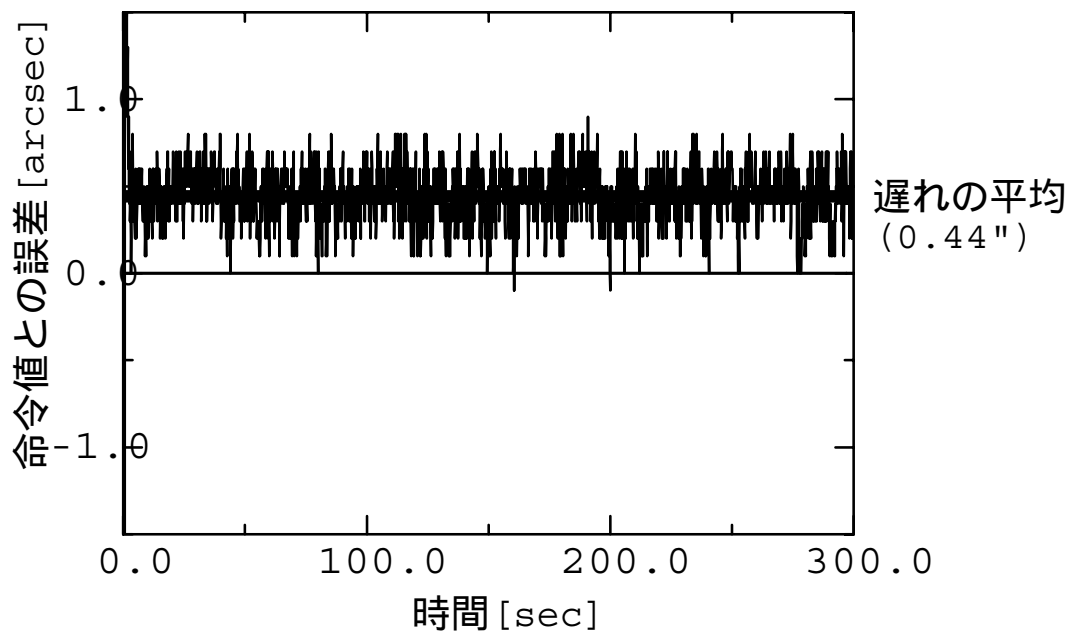


図 3.1: 制御試験結果の例

3.2 制御時における望遠鏡の制振 (振動の軽減)

望遠鏡制御で最も苦労したのは、振動の抑制である。初期においてはモータの発振、後期は望遠鏡構造の振動が制御に与える悪影響に苦しんだ。試行錯誤によって何とかこれらの発振・振動を取り除いたが、これらの発振・振動の起きた原因を解明したわけではない。ここでは制御試験中に起きた発振・振動とその解決方法を記す。

3.2.1 モータの発振

モータのゲイン調整

方位・高度軸の駆動には「ダイナサーブ」(横河プレシジョン製) というモータを使用した。このモータは高分解能 AC サーボモータに超高分解能のロータリエンコーダを直結した構造で、高トルク・高精度の駆動を行うことができる。

モータドライバは指令に対するモータの動きを反映して新たな指令をモータへ送る。このフィードバックの機構をサーボという。サーボではモータエンコーダを使用する位置フィードバックと、タコメータを使用する速度フィードバックを組み合わせている。

モータドライバはモータ制御ソフトウェアからの指令位置に対してモータの位置決め制御を行う、位置制御モードで用いている。位置制御には I-PD モード、P-P モード、P-I モードの 3 つの制御系がある。P は比例、I は積分、D は微分を意味する。ハイフンの前は位置フィードバック、後は速度フィードバックのモードを表している。

I-PD モードは積分制御を行うことで位置決め制御をより厳密に行う。P-P モードが行うのは比例制御のみであり、位置決め制御よりもむしろ速度制御に近いモードである。P-I モードは 2 つのモードの中間的なモードである。

I-PD モードでは、「ゲイン」、「fc」、「I-Lim」を、P-P、P-I モードでは「ゲイン」、「fc」を調整する必要がある。モードも含めてこれらは全てモータドライバで設定することができる。

モータドライバはモータ制御ソフトからの指令位置の計算を行い、モータへ移動量に応じた電圧を付加する。このときの電圧の増幅率を「ゲイン」という。ゲインが大きいほどモータに流れる電流が大きくなるので、モータのトルクは強くなる。負荷の大きなものを制御するときは、ゲインをできるだけ大きくする必要がある。

サーボを行うとモータへ送られる電圧は常に変化するが、「fc」はこの電圧変化の周波数の上限を決める。fc は 1~16Hz の範囲で設定することができる。

位置制御に積分制御を組み込む I-PD モードでは、指令位置に対するモータの動きの残差をフィードバックする。このときの積分器の出力リミッタ値が「I-Lim」である。I-Lim が小さいほど、積分制御がフィードバックする残差の最大値が小さくなる。また、I-Lim が小さすぎるとモータ出力に制限がかかる。

制御モードの決定

開発の初期において、私たちは 3 つある制御モードのうち、I-PD モードを用いていた。3 つの制御モードの中で最も位置決めを厳密に行うこのモードが、望遠鏡制御に適していると考えたからである。しかし、速度 0.1[秒角/sec] で等速駆動試験を行った際に誤差が発生した。このため制御モードを P-P モードに変更したところ、誤差を軽減することができた。図 3.2 にその結果を示す。横軸に時間、縦軸に誤差をとり、速度 0.1[秒角/sec] の等速駆動試験を I-PD モード、P-P モードで行ったときの結果をプロットした。

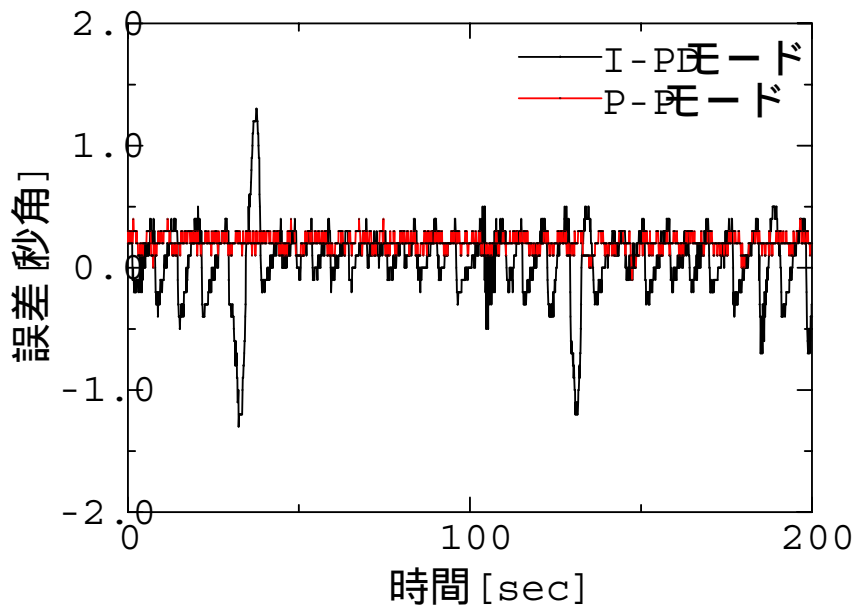


図 3.2: 制御モードによる制御試験結果の比較。駆動速度 0.1[秒角/sec]

I-PD モードでは位置決め制御の中で積分制御を行っているが、積分制御による残差のフィードバックはモータの角分解能単位で行われる。駆動速度がモータの角分解能に近いとき、例えば速度 0.1[秒角/sec] で駆動する場合、フィードバック量は駆動速度に比べて大きく、結果として逆方

向の残差をうむ。これを補正するための積分制御フィードバックはまた元の方向への残差を生む。この繰り返しは誤差を生んでいると考えられる。

モータの発振

ゲイン調整で最初に行ったのはゲインをできるだけ大きくすることである。ゲインが小さいと各軸を精度良く駆動することができないからである。しかし、ゲインを上げるとモータが発振しやすくなる。我々の望遠鏡でもモータが発振を起こし、ゲインを十分に上げてやることができなかった。フーリエ解析を行い本望遠鏡で共振を起こしやすい周波数を調べたところ、50~60Hzの間にあることが分かった。

モータドライバにはもともとローパスフィルタが内蔵されていた。これはある周波数以上の振動を減衰させるフィルタである。フィルタのしきい値を何通りか変えて試したが、振動を抑えることはできなかった。

次に、モータドライバにノッチフィルタという機械共振フィルタを組み込んだ。これはある特定の周波数の振動を減衰させるフィルタである。ノッチフィルタの減衰振動数を変えながら駆動試験を行った。しかし、ノッチフィルタを組み込むと高周波数側で振動の位相が回転してしまう。位相が180°回転すると、振動を止めようとする力が逆に振動を増幅して発振を起こしてしまう。この位相の回転が発振をもたらす原因となってしまってもうまいかなかった。

そこで、モータドライバにイコライザフィルタという機械共振フィルタを組み込んだ。このフィルタもローパスフィルタ同様にある周波数以上の振動を減衰させるが、高周波数側でもほとんど位相が回転しない特殊なフィルタである。このフィルタを組み込んだところ、モータが発振を起こしにくくなりゲインを上げることが可能になった。

3.2.2 望遠鏡構造の振動

モータのゲインを上げて駆動試験を行ったところ、高度軸駆動時に望遠鏡が音を立てて振動する事が問題となった。大きく振動する部分を探したところ、高度軸支持フォークで最も大きく振動が起きていた。特に高度軸を駆動するモータの直下にある部分の振動が大きかった。また、振動の発信源に注目したところ、平板状になっている部分で特に振動が大きいことが分かった。

平板の部分が太鼓のように振動しているのではないかと考え、特に振動が大きいモータ直下の平板上の部分に鉄板を両面テープで貼り付けたところ、振動はかなり抑えられた。また、鉄板のかわりに軟らかい鉛の板を貼った場合も振動を同程度に抑える事ができた。そこで、高度軸支持フォークの平板上の全ての部分に鉄板または鉛板を両面テープで貼り付けたところ、振動はさらに軽減された。

また、高度軸を駆動するモータから振動が伝わっていると考え、モータを支えているバネの両端に鉛板を挟んで振動を伝わりにくくしたところ、振動を軽減することができた。しかし、駆動を続けると鉛が変形して振動も徐々に大きくなってしまった。そこで鉛板の代わりにベークライト板を挟んで振動を伝わりにくくしようと試みた。その結果、ベークライト板を挟まないときに比べ高度軸の駆動精度は良くなった。

振動の発生源と軽減策についての考察

我々はこの振動の原因は高度軸支持フォークの構造だと考えている。つまり、高度軸支持フォークは「H」の形をしたH鋼と呼ばれる鋼材を用いている。H鋼の腹の部分が太鼓のように振動しやすい構造になっている。この部分とモータが共鳴を起こしたと考えている。

また、板を貼ることで振動が軽減した理由は以下のように考えている。鉄板や鉛板を貼ることで以下の2つの効果が得られる。

1. H鋼の腹の部分の質量が増し、固有振動数が下がった
2. 板を両面テープで貼ったために、板にフォークの振動を吸収する効果が生まれた

板を両面テープではなくボルトで固定し場合には振動は抑えられなかったことから、上記の2の理由からフォークの振動(共鳴)を抑えられたと考えている。

ゲインの自動切り替え

こうして、高度軸が天体追尾時の駆動速度、およそ15[秒角/秒]以下の速度で駆動するときの振動は抑えることができた。しかし、天体を導入するとき高度軸は最高速度3600[秒角/sec]で駆動する。速度3600[秒角/sec]で駆動するとき振動は抑えられなかった。

低速駆動時には高い精度が必要なのでゲインが大きくなければいけないが、高い精度が要求されない高速駆動時には大きなゲインは必要ない。また、ゲインが小さいほど振動は起こりにくくなる。そこで、低速駆動時と高速駆動時でゲインが自動的に切り替わる回路を駆動系に組み込むこととした。

回路には振動数 - 電圧変換器を用いる。モータドライバからモータへ送られるパルス数(振動数)がしきい値よりも大きくなったとき、ゲインが回路的に切り替わって小さくなる。パルス数がしきい値より小さくなったらゲインは再び切り替わって大きくなる。しきい値は回路に取り付けられた可変抵抗で調整することができる。ただし、この回路にはいわゆるヒステリシスが持たせてあり、ゲインが大 小となるときの小 大となるときのしきい値が異なる。これは速度がしきい値付近で変動したときにゲインが頻繁に切り替わるのを防ぐためである。

回路の設計・製作はシーク電子工業の責任で行った。この回路を組み込んだ結果、高速駆動時の振動を抑えることができた。

3.3 エンコーダ値補正

方位軸について1分間における駆動精度測定を行った。その結果、駆動速度10[秒角/sec]のときの駆動精度は0.5[秒角/1分]だった。これは目標駆動精度0.2[秒角/5分]に比べかなり悪い。制御試験中の結果より駆動誤差のグラフを示す。

グラフを見ると周期的な誤差が乗っているのが分かる。さらに制御試験を続けるとこの周期的誤差について以下のことが分かった。

- モータと軸の動力伝達機構であるフリクションドライブをずらしても誤差の位相は変化しない
- 誤差の周期は駆動速度よって変化するが、速度÷周期 = 36 秒角で一定となっている
- 方位の角度によって誤差の大きさが違う

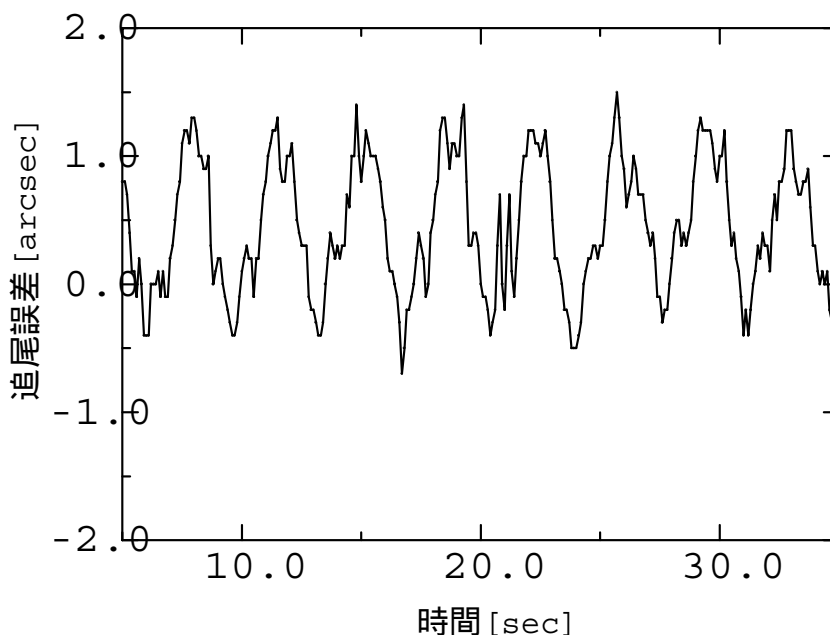


図 3.3: エンコーダの周期的誤差 (図は方位。駆動速度 10[秒角毎秒])

3.3.1 誤差発生の原因の考察

もしモータが原因で実際にぎくしゃくした駆動をしているとすれば、フリクションドライブをずらしたら誤差の位相はずれるはずである。また、誤差が駆動速度に関係なく 36 秒角周期であることから、これは以下に述べる理由によるエンコーダ起源の誤差ではないかと考えた。

エンコーダのテープ部分には、36 秒角刻みで 1 周 36000 本の目盛りが打ってある。目盛りを用いた光学的な測定によって位相の 90°ずれた 2 つの 36 秒角周期の正弦波信号を作り、その信号を 1024 分割することで、エンコーダは $36[\text{秒角}] \div 1024 = 0.035[\text{秒角}]$ の角分解能を得ている。エンコーダの目盛り部分と読みとり部分が正しく相対して置かれていないとき、正弦波信号の振幅・位相が乱れ 36 秒角周期の誤差が発生する可能性がある。

以下に示すような測定を行い、エンコーダの誤差を測定した。

ターンテーブルに板を設置する。方位ベースに最小目盛り $1\mu\text{m}$ のダイヤルゲージを取り付ける。(図 3.4 参照) ハンドコントローラを使って方位軸を、板がダイヤルゲージを軽く押す程度まで動かす。ハンドコントローラで少しだけ方位軸を動かして止め、エンコーダ値とダイヤルゲージの値を記録するのを繰り返す。ダイヤルゲージの値とダイヤルゲージの方位軸心からの距離 R から、ダイヤルゲージの変化量 $\Delta d[\mu\text{m}]$ は角度変化量 $\Delta\theta[\text{rad}]$ へ以下の簡単な式で換算できる。

$$\Delta\theta = \Delta d \div R$$

この測定において、ダイヤルゲージの方位軸心からの距離は 1750mm であった。ダイヤルゲージの値が $\Delta d[\mu\text{m}]$ 変化したとき方位軸の角度変化量は、

$$\Delta\theta = \frac{\Delta d[\mu\text{m}]}{1750.0[\text{mm}]} * \frac{1}{5.0 * 10^{-6}} = 0.114[\text{秒角}]$$

である。

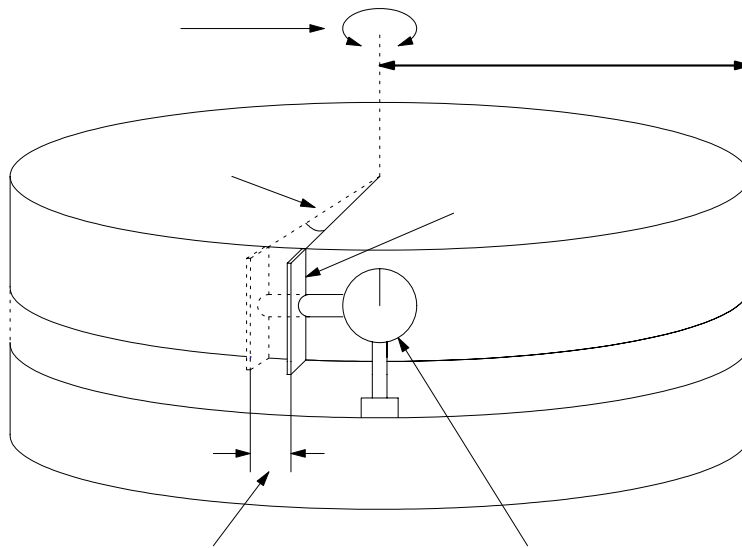


図 3.4: ダイヤルゲージを使ったエンコーダ誤差の測定

この測定では、ダイヤルゲージを信頼できる角度指標として、エンコーダ値の読み取り精度を測定した。また、この測定ではエンコーダ値とダイヤルゲージの値のみを使用するので、モータの駆動等には依存しない。測定結果を図 3.5 で示す。

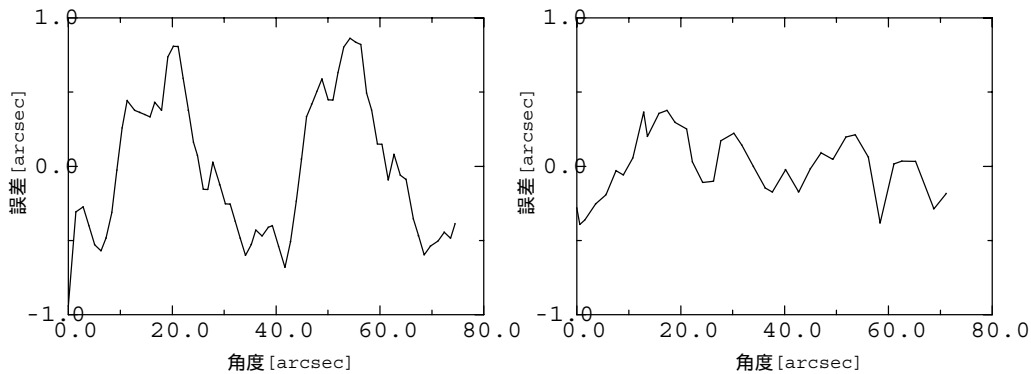


図 3.5: ダイヤルゲージを使ったエンコーダ読み取り精度の測定結果。方位 (左)、高度 (右)

この測定によって、周期的な誤差がエンコーダ起源であることを確認した。エンコーダの目盛り部分と読みとり部分が正しく相対して置かれていないと思われたので、正弦波信号を見ながらエンコーダ読みとり部分の再取り付けを行った。しかし、何度も再取り付けを行ったにもかかわらず周期的誤差はほとんど軽減しなかった。

エンコーダの製造元であるハイデンハインに問い合わせたところ、エンコーダの製造誤差が原因でこのような誤差が発生することは充分あり得るということだった。

3.3.2 エンコーダ誤差のソフトウェアによる補正

エンコーダの再取り付けなど、ハード的な方法ではエンコーダ値誤差は軽減しなかった。そこで、ソフトウェアによる補正を行うことにした。方位の角度によって誤差の大きさやパターンが違うので、複数の角度で誤差を測定して、エンコーダ値補正テーブルを作成する事にした。補正テーブルはエンコーダ値取得を行うモータ制御 PC のメモリ上に作ることにした。(補正テーブルの解説)モータ制御 PC のメモリの大きさによる制約から、36 パターンの補正テーブルを作る事にした。

補正テーブルの原理

エンコーダで得られる角度 θ は 36 秒角単位の角度 θ_0 と 36 秒角を 1024 分割した角度 θ' の和で得られる。式で書くと、

$$\theta = \theta_0 + \theta' \quad (3.1)$$

$$= \theta_0 + n * \frac{36}{1024} (n = 0, 1, 2, \dots, 1023) \quad (3.2)$$

である。 $n = i (i = 0, 1, 2, \dots, 1023)$ のときエンコーダ値に誤差 Δn_i がのっているとする、

$$n_i = i - \Delta n_i \quad (3.3)$$

となる。 i に対応する n_i を示す 1024 組の補正表 (補正テーブル) を作ることで、エンコーダ値誤差 Δn_i を補正することができる。

補正テーブルのソフトウェアへの組み込み

補正テーブルはモータ制御ソフトウェア内に作ることにした。起動時に補正テーブルを読み込み、エンコーダ値を読み込む際に補正を行うようにした。この補正テーブルをモータ制御ソフトウェア内へ組み込む部分は JSC 側が作成した。実際に作った補正テーブルの一部を以下に示す。

```
// 各テーブルの補正值 (0 ~ 1023)
// 0- 9 deg
[X-1]
0000=0,
0001=1,
0002=2,
.....
0299=319,
0300=320,
0301=322,
.....
1022=1022,
1023=1023,
// 10- 19 deg
[X-2]
0000=0,
.....
```

補正テーブル内における [X-?] の X は方位軸を表す。方位軸では [X-1] から [X-36] の 36 パターンの補正テーブルを、高度軸では 1 パターンの補正テーブルを作成して、エンコーダ値補正を行うこととした。

補正テーブルの作成方法

上で述べたダイヤルゲージによるエンコーダ値の誤差測定は、時間がかかるので多くの補正テーブルを作成するには向かない。望遠鏡制御ソフトウェアから命令を送って等速駆動させれば自動的にデータを取得できる。しかし、望遠鏡制御ソフトウェアから命令を送って等速駆動させた場合、モータ制御ソフトウェアはエンコーダの値が等速に変化するように駆動する。エンコーダ値には誤差が乗っているため、結果としてギクシャクとした駆動をしてしまうことになる。そこで、モータ制御の手動モードを用いて補正テーブルを作成した。モータ制御の手動モードでは、ハンドコントローラのボタンを押している間は、モータ制御 PC はモータドライバへ一定量のパルスを送り続ける。このときエンコーダ値を用いたパルス数の再計算は行われないので、モータドライバはモータをほぼ一定の速度で駆動させる。

手動速度を 10[秒角/sec](約 173.6[パルス/sec] に相当) に設定して方位軸を駆動させ、72 秒間のエンコーダ値を記録する。記録は 0.1 秒間隔で行うので、角度でいうと 1 秒角ごとのエンコーダ値データを得る。データから平均速度を最小自乗法で求めて、理想的な等速駆動をしたときのエンコーダ値を仮定する。記録したエンコーダ値から理想的なエンコーダ値を引いて誤差を求める。36 秒角 (3.6 秒) ごとに誤差の値を足しあわせて平均を取り、1 秒角ごと 36 秒角の誤差の平均値を求め、これを補正值として用いる。1 秒角ごと 36 組の補正值を 1024 分割して 0.0352 秒角おき 1024 組の補正值を求め、それを補正テーブルとする。

方位軸では 0 °、10 °、20 °……350 °と 10 °おきに 36 パターンの補正テーブルを作成する。10 °の補正テーブルは 5 ~ 15 °で適用するというように各テーブルをそれぞれ作成した角度の前後 5 °において適用する。こうして方位軸全周にわたって補正テーブルを適用して、方位が 5 °、15 °、25 °……の前後で制御試験を行うと使用する補正テーブルが切り替わる前後どちらかで駆動精度が 0.2[秒角/5 分] より悪いところがある。このようなときは、精度の悪かった角度付近について 1 °おきに制御試験を行い、1 °単位で適用する補正テーブルを適切に割り振った。

3.3.3 補正後の駆動精度

補正テーブルを作成した後、駆動精度の測定を行った。測定は 20 °おきに 19 箇所で行い、駆動速度は 15[秒角毎秒] である。0 °付近での駆動誤差の変動と求めた駆動精度の結果をグラフで示す。

駆動精度は 0.18 ± 0.02 [秒角/5 分] であった。方位ではいくつかの角度で駆動精度 0.20[秒角/5 分] をわずかに超えているが、いずれも前半分と後半分で別の補正テーブルを使っているところで悪いのは片方だけである。適用するテーブルを適切に割り振れば全ての角度で駆動精度 0.20[秒角/5 分] を達成できると考え、京都でのエンコーダ値補正はここで終了した。

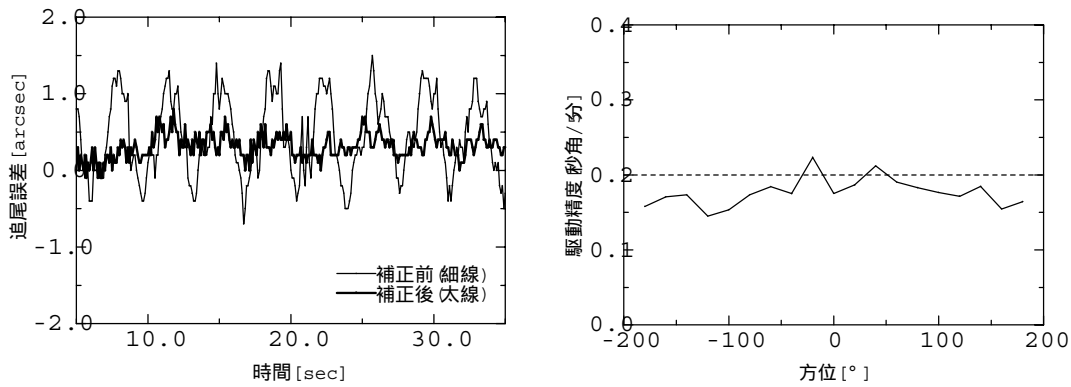


図 3.6: 駆動誤差の変動 (左) と駆動精度測定結果 (右)。左は比較のために駆動速度 10[秒角毎秒]。

3.4 到達予定時刻について

天体追尾時、望遠鏡制御ソフトウェアはモータ制御ソフトウェアへ 0.1 秒周期で移動命令を発行する。発行する命令は「ある時刻に、ある角度を、ある角速度で通過せよ」というもので、方位・高度・姿勢の 3 軸に命令する。この「ある時刻」というのは 3 軸共通であり、これを到達予定時刻と呼ぶこととする。

望遠鏡制御ソフトウェアはモータ制御ソフトウェアから受け取った現在時刻に「ある時間」を足してそれを到達予定時刻とする。そして到達予定時刻における天体位置計算を行い、その結果をモータ制御ソフトウェアへ命令として発行する。ここで到達予定時刻を作るときに現在時刻に足している「ある時間」、言い換えると到達予定時刻と現在時刻の差を「到達時間差」と呼ぶこととする。

この到達時間差を 0.1、0.2、0.5、1.0 秒の 4 通りにそれぞれしたときについて、制御試験を行った。そのときの駆動誤差の時間変動を図 3.7 に示す。

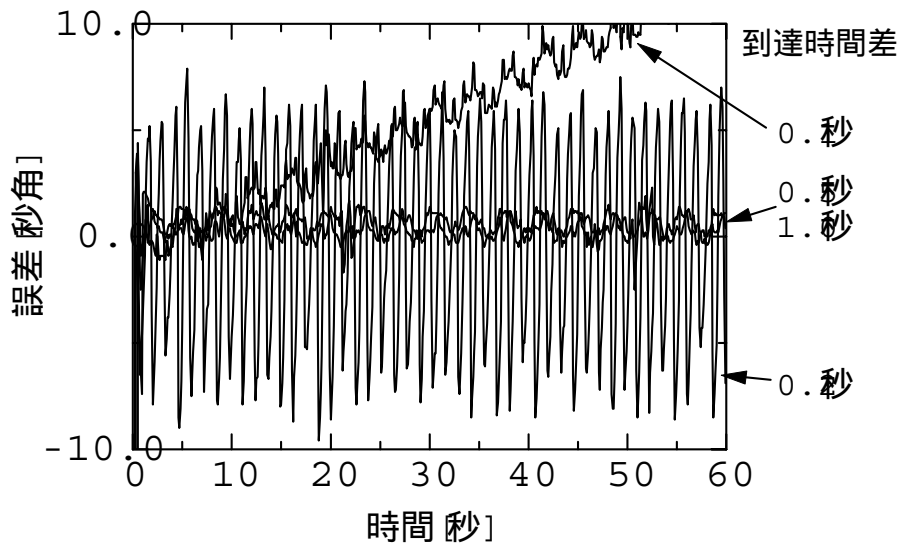


図 3.7: 到達時間差と駆動誤差の相関

到達時間差が 0.2 秒のとき、誤差が大きくなる。また、到達時間差が 0.1 秒のとき誤差が大きくなっていくのは、制御ができなくなって惰性で動いているからである。

このように到達時間差を適切に設定してやることで駆動精度が向上することが分かる。次に到達時間差を 0.4~1.0 秒で 0.1 秒ごとに変えての制御試験を方位・高度両軸について行った。そのときの両軸の駆動精度を表 3.1 に示す。(単位：秒角/5 分)

到達時間差 [sec]	方位 [秒角/5 分]	高度 [秒角/5 分]
0.4	0.16	0.21
0.5	0.15	0.21
0.6	0.15	0.20
0.7	0.16	0.21
0.8	0.18	0.22
0.9	0.19	0.23
1.0	0.19	0.24

表 3.1: 到達時間差 [sec] と駆動精度 [秒角/5 分]

最も駆動精度が良かったのは到達時間差が 0.6 秒のときであった。よって 0.6 秒を到達時間差として制御を行うこととした。

3.5 南アフリカでの駆動精度測定結果

2000 年 10 月に南アフリカサザーランド観測所において、本望遠鏡の駆動精度測定を行った。以下のその結果を示す。

3.5.1 駆動精度測定

南アフリカにおいても、方位・高度軸でエンコーダ値補正テーブルを作成し、制御系に導入した。そのうえで、方位・高度・姿勢軸の駆動精度を求めた。測定は方位 5°おき 73 箇所、高度 5°おき 14 箇所、姿勢 20°おき 19 箇所で行った。各軸とも駆動速度は 15[秒角毎秒]、測定時間各 5 分間である。

表 3.2 に各軸の駆動精度の平均値、標準偏差、最悪値を各軸ごとに示す。(単位：秒角/5 分)

軸	平均値	標準偏差	最悪値
方位	0.15	0.02	0.22
高度	0.15	0.00	0.16
姿勢	0.54	0.01	0.57

表 3.2: 各軸の駆動精度。平均値、標準偏差、最悪値。(単位：秒角/5 分)

方位軸で前半と後半の 2.5 分ごとに別々に駆動精度を求めた結果を図 3.8 に示す。

高度・姿勢軸の駆動精度はそれぞれ 0.2[秒角/5 分]、60[秒角/5 分] という目標を満たしている。京都での結果と同様、方位ではいくつかの測定点で駆動精度 0.20[秒角/5 分] をわずかに超えてい

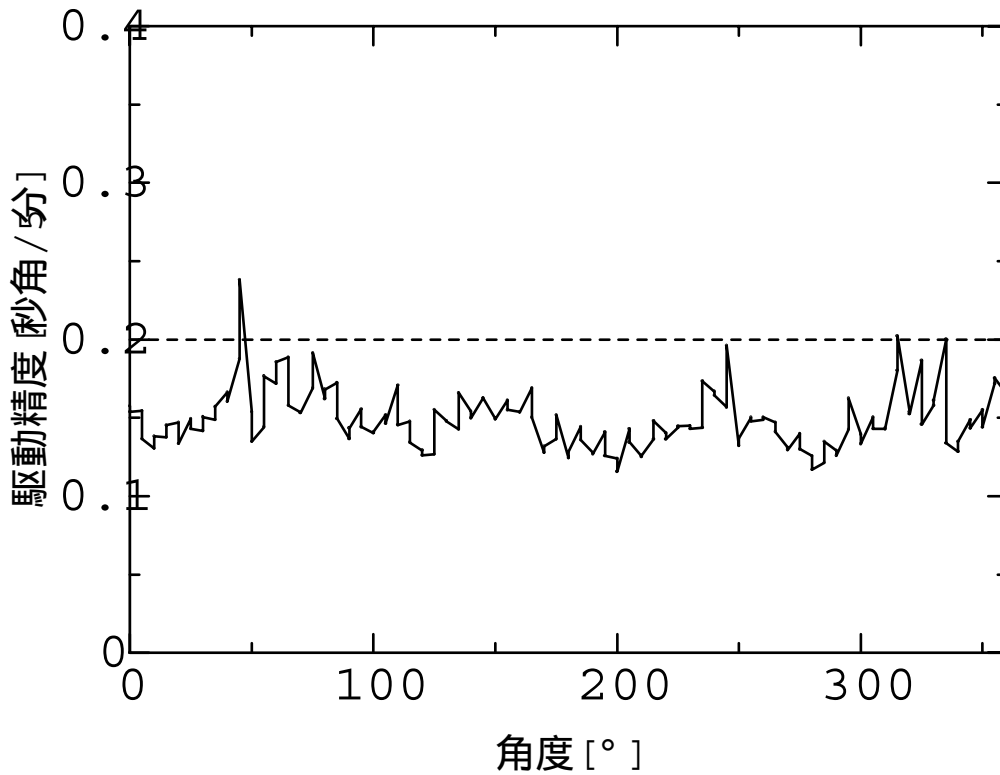


図 3.8: 方位軸駆動精度測定最終結果

る。2000年9月からの設置では時間の制約から行うことができなかったが、適用するテーブルを適切に割り振れば全ての角度で駆動精度 0.20[秒角/5分] を達成できると考えている。

3.5.2 異なる速度での駆動精度測定

前節では、各軸とも駆動速度 15[秒角/sec] における駆動精度を求めてきた。しかし、方位・姿勢軸は天体追尾時にはもっと高速で駆動することがある。

経緯台式望遠鏡では、方位軸の追尾速度は高度が高いほど大きくなり、天頂では無限大となる。よって、観測限界高度を設定してそれよりも高い高度の天体は追尾しないこととした。本望遠鏡では、観測限界高度を 88° に設定した。このときの天体追尾時における方位軸の最高駆動速度は約 400[秒角/sec] である。姿勢軸の最高駆動速度も方位軸とほぼ等しく約 400[秒角/sec] となる。なお、高度軸の最高駆動速度は約 13[秒角/sec] である。

追尾時に使用する速度範囲の中から各軸ごとに 5 通りの速度を選んで、駆動精度を測定した。試験は正負両方向について行い、それぞれを 1 回と数えることとする。表 3.3 に試験回数、駆動精度、遅れの平均を各軸ごとに示す。数値はそれぞれの試験結果の平均値である。(単位:速度は [秒角毎秒]、追尾精度は [秒角/5分]、遅れの平均は [秒角])

速度 100、400[秒角/sec] の際の方位軸の駆動精度は 0.2[秒角/5分] より悪い。しかし、速度 100[秒角/sec] となるのは高度 82° 以上、速度 400[秒角/sec] となるのは高度 88° 以上の時のみである。地平面座標系では、高度 h において方位角が ΔA 変化したとき、実際に変化する角度 ΔD は以下の式

方位 2回			高度 2回			姿勢 4回		
速度	駆動精度	遅れ	速度	駆動精度	遅れ	速度	駆動精度	遅れ
0.1	0.07	0.11	0.1	0.07	0.11	0.1	1.04	0.28
1	0.07	0.05	1	0.08	0.06	1	0.91	0.41
10	0.16	0.28	5	0.11	0.13	10	0.52	0.76
100	0.39	2.26	10	0.13	0.29	100	1.44	2.51
400	1.05	8.88	15	0.15	0.39	400	2.93	9.20

表 3.3: 各軸の駆動速度と駆動精度、平均の遅れ。(単位:速度 [秒角/sec]、ほか [秒角/5分])

で表される。

$$\Delta D = \Delta A * \cos(h)$$

高度 82 °で方位が速度 100[秒角/sec] で駆動したとき、高度 88 °で方位が速度 400[秒角/sec] で駆動したときの実際の駆動精度はそれぞれ、

$$0.39'' * \cos(82^\circ) = 0.05''$$

$$1.05'' * \cos(88^\circ) = 0.04''$$

となる。これは駆動速度 10[秒角/sec] での駆動精度 0.16[秒角/5分] よりも良い。

また、駆動速度が速くなると平均の遅れは大きくなる。短い時間に駆動速度が変化すると、平均の遅れの変化が結果として追尾精度を落とすおそれがある。平均の遅れについても同じ計算をすると、

$$2.26'' * \cos(82^\circ) = 0.31''$$

$$8.88'' * \cos(88^\circ) = 0.31''$$

となる。これは駆動速度 10[秒角/sec] での駆動精度 0.28[秒角/5分] とほぼ等しい。よって、平均の遅れが追尾精度に与える影響は少ないと言える。

これらの結果より、各軸とも天体追尾時に駆動する速度範囲内で、目標とする駆動精度を満たしていると言える。

なお、速度依存性、角度依存性に関するデータを、付録に載せる。

第4章 望遠鏡性能評価

私は南アフリカ天文台サザーランド観測所において、本望遠鏡制御系の性能評価のために指向精度、追尾精度を測定した。また、本望遠鏡の光学性能を評価するために、ハルトマンテストを行いハルトマン定数を求めた。以下に指向精度、追尾精度の測定方法・結果と、本望遠鏡の光学系スベック及びハルトマンテストの方法・結果を述べる。

評価に用いた CCD

指向精度・追尾精度の測定及びハルトマンテストには同一の CCD を使用した。CCD の積分時間は 60 分の 1 秒から 10 万分の 1 秒の範囲で選択することができる。ピクセルスケールは縦と横で異なり、本望遠鏡へ取り付けられたとき、縦 0.156[秒角]、横 0.144[秒角] である。CCD を横方向が赤経、縦方向が赤緯成分となるように取り付けられた。

4.1 指向精度

4.1.1 望遠鏡解析とは

観測天体を視野の中心へ導入する精度を指向精度という。実際の望遠鏡では、望遠鏡を設置する基礎の傾き、望遠鏡構造の組立誤差・たわみが発生する。これらの要因は望遠鏡の指向精度に系統的な誤差をもたらす。これらの系統的な誤差は、全天の星を導入し、各方位・高度における導入誤差を観測することで定量的に求めることができる。こうして求めた系統的な誤差を天体位置計算に組み込むことで、指向精度を向上させることができる。

このように系統的な誤差を求めて補正し、望遠鏡の指向精度を向上させることを望遠鏡解析という。

4.1.2 望遠鏡解析と指向精度の算出方法

星を導入して、星の赤経・赤緯、望遠鏡の生の赤経・赤緯、地方恒星時を記録する。これを全天の星において行う。求めた補正値を天体位置計算に組み込んで観測した場合、補正前と補正後の両方のデータを記録する。以下に観測によって作成したデータの例を示す。

IRSF 1.4m 2000/11/05

: NODA

-32 22 48

観測地の緯度

(R.A. [Obj] DEC. [Obj] R.A. [Tel] DEC. [Tel] LST)

この 1 行は実際にはない

10 35 28.1 -78 36 28.0 10 35 23.7 -78 36 36.1 02 22.18

観測データここから

06 56 34.4 -79 25 13.0 06 56 29.1 -79 25 10.2 02 23.09

03 07 32.0 -78 59 22.0 03 07 30.2 -78 59 07.4 02 24.11

.....

05 04 24.4 -35 29 00.0 05 04 22.4 -35 28 54.7 05 00.92 観測データここまで

END

このデータをあらかじめ想定される系統的な誤差の補正項を用いて、最も指向精度が小さくなるようにフィッティングを行う。フィッティングには T-Point という望遠鏡解析ソフトウェアを使用する。

今回用いる補正項は 10 個である。各補正項の名称、内容、補正式を以下に記す。

名前	内容	補正式
IA	方位軸原点のずれ	$\Delta A = IA$
IE	高度軸原点のずれ	$\Delta h = IE$
AW	方位軸東西方向の傾き	$\Delta A = AW * \cos A * \tan h$ $\Delta h = AW * \cos A$
AN	方位軸南北方向の傾き	$\Delta A = AN * \sin A * \tan h$ $\Delta h = AN * \sin A$
CA	高度軸と光軸の直交度	$\Delta A = CA / \cos h$
NPAE	方位軸と高度軸の垂直からのずれ	$\Delta A = NPAE * \tan h$
TF	鏡筒のたわみ (sin 成分)	$\Delta h = TF * \cos h$
TX	鏡筒のたわみ (cos 成分)	$\Delta h = TX / \tan h$
ACES	方位角の中心のずれ (sin 成分)	$\Delta h = ACES * \sin A$
ACEC	方位角の中心のずれ (cos 成分)	$\Delta h = ACEC * \cos A$

表 4.1: 望遠鏡解析に用いた補正項一覧 (A:方位、h:高度)

補正項は 10 個あるが、補正する要素は以下の 5 つである。

1. 軸原点のずれ
2. 方位軸の傾き (望遠鏡構造の傾き)
3. 各軸間の直交度
4. 鏡筒のたわみ
5. 方位角の中心のずれ

このうち、軸原点のずれの補正は厳密には望遠鏡解析に含まれない。しかし実際には、軸原点は星を導入する観測によって合わせるので補正項として導入している。

ある観測データを用いて、10 の補正項のうち、軸原点ずれの項 (IA、IE) のみを導入して望遠鏡解析を行った。今後はこれを望遠鏡の生の指向精度という。次に、10 の補正項を全て用いて望遠鏡解析を行った。

さらに、望遠鏡解析を行うとき、方位軸の傾き、各軸間の直交度、鏡筒のたわみの補正項を導入せずにそれぞれ望遠鏡解析を行った。方位軸が傾いていると方位に対して正弦的に変化する高度成分の誤差が発生する。方位軸と高度軸、高度軸と光軸の間の直交度に誤差があるとき、高度に対して線形に変化する方位成分の誤差が発生する。鏡筒のたわみは高度が低くなるほど大きくなるので、高度に対して変化する高度成分の誤差が発生する。

望遠鏡解析前後の星の指向誤差を図 4.1 に示す。また、方位軸の傾き、各軸間の直交度、鏡筒のたわみの補正項を除いて望遠鏡解析を行った結果をそれぞれ 4.2、4.3、4.4 に示す。縦軸を高度、横軸を方位方向としてプロットした。また、各要素が指向精度にどのような誤差をもたらすかを示すために、以下の関係をグラフで表した。

図 4.2 方位軸の傾きを補正しないとき、方位と誤差の高度成分の関係

図 4.3 各軸間の直交度を補正しないとき、高度と誤差の方位成分の関係

図 4.4 鏡筒のたわみを補正しないとき、高度と誤差の高度成分の関係

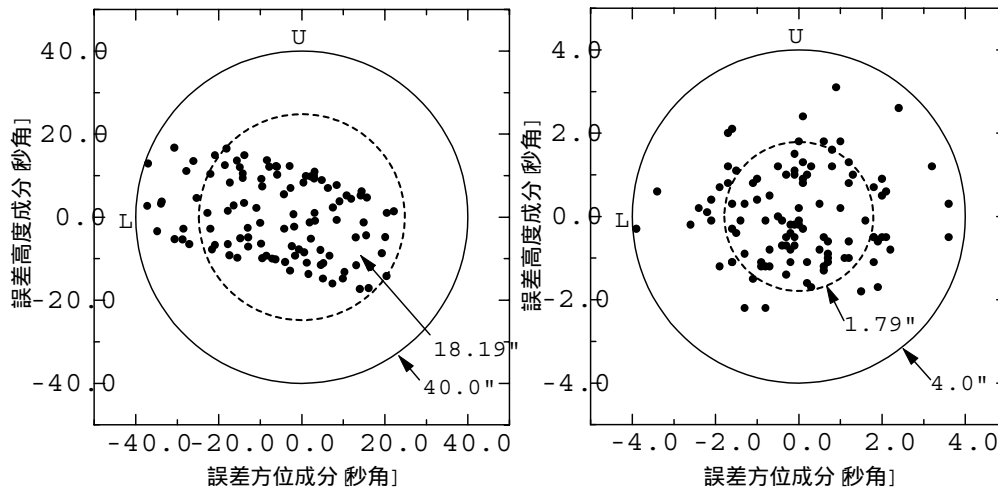


図 4.1: 望遠鏡解析前 (左) 後 (右) の指向誤差。(スケールが 10 倍異なることに注意)

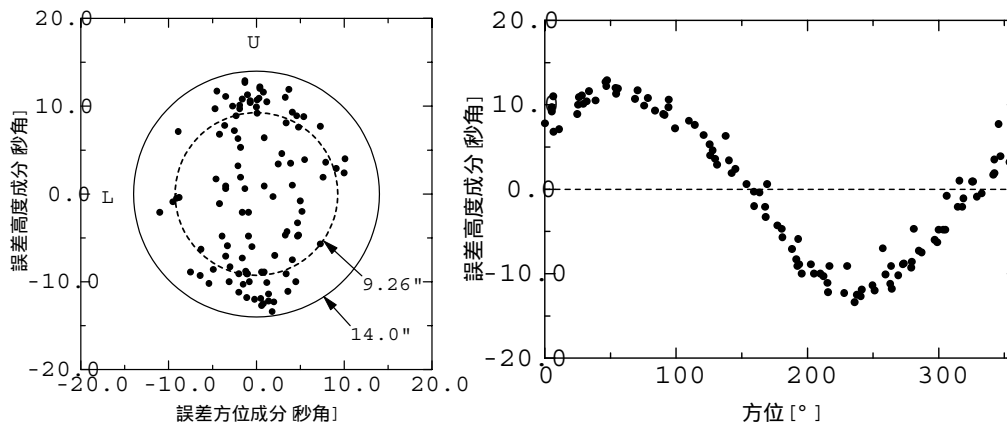


図 4.2: 「方位軸傾き」を補正しないときの指向誤差。右は方位と誤差の高度成分の関係

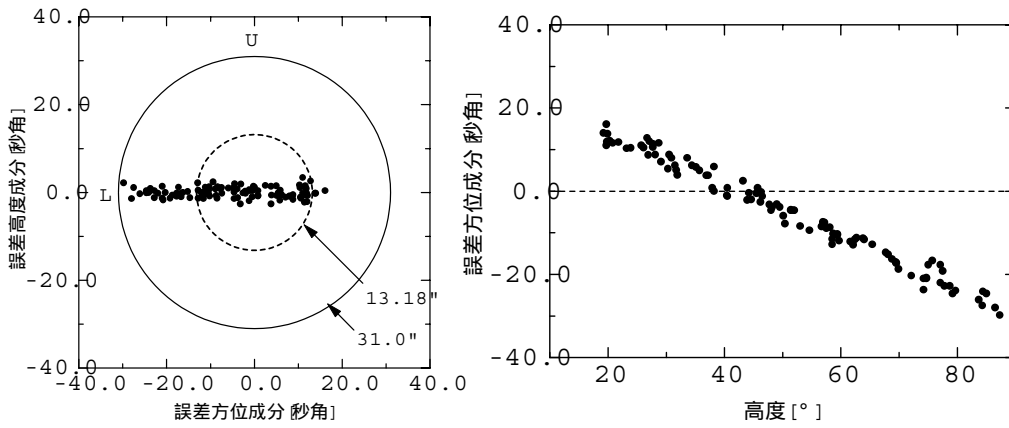


図 4.3: 「直交度」を補正しないときの指向誤差。右は高度と誤差の方位成分の関係

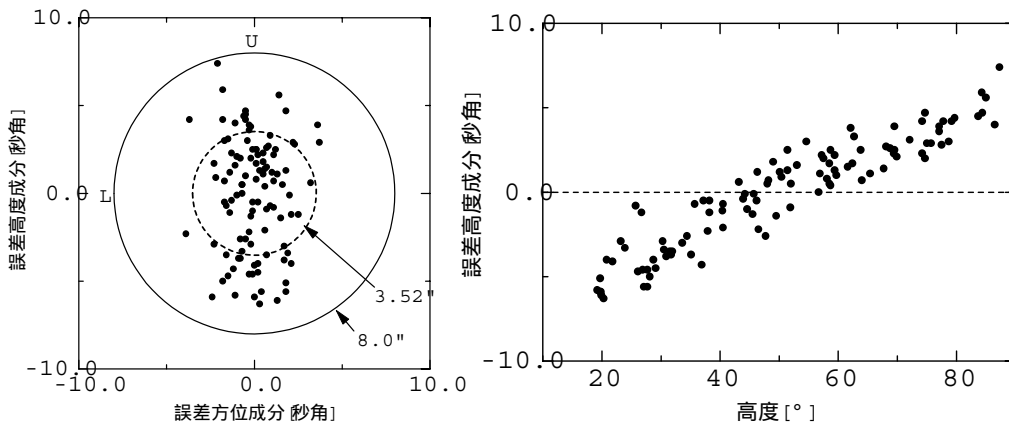


図 4.4: 「鏡筒たわみ」を補正しないときの指向誤差。右は高度と誤差の高度成分の関係

補正項の天体位置計算への組み込み

望遠鏡制御ソフトは起動するときに”t_point.dat”というファイルから 10 個の補正項を読み込む。”t_point.dat”は次のような形式になっており、望遠鏡制御ソフトは各行最初の数字を補正項として変数”t_point_d[10]”へ読み込む。

```
-14.83 //IA: 方位軸原点のずれ
-4.20 //IE: 高度軸原点のずれ
6.80 //AW: 方位軸東西方向の傾き
-5.55 //AN: 方位軸南北方向の傾き
15.61 //NPAE: 方位軸と高度軸の垂直からのずれ
15.01 //CA: 高度軸と光軸の垂直からのずれ
7.26 //TF: 鏡筒のたわみ (cos(al))
1.73 //TX: 鏡筒のたわみ (sin(al))
-1.91 //ACES: 方位軸中心のずれ (sin(al))
-4.81 //ACEC: 方位軸中心のずれ (cos(al))
```

望遠鏡制御ソフトは天体位置計算をするときに望遠鏡解析結果による補正を行う。補正を行う場所は天体位置計算の項ですでに述べた。

指向精度向上補正テーブルの導入

13回の観測を行い、その結果を用いて望遠鏡解析を行った。13回の観測の日時、導入した星の数を表4.2に示す。

回	観測日	星の数
1	2000.10. 4	100
2	2000.10. 5	104
3	2000.10. 6	172
4	2000.10. 8	166
5	2000.10. 9	83
6	2000.10.18	104
7	2000.10.19	103
8	2000.10.20	102
9	2000.10.20	104
10	2000.10.21	104
11	2000.10.23	105
12	2000.10.24	107
13	2000.10.25	109

表 4.2: 13 回の観測の日時と導入した星の数

13回の観測で導入した全ての星について、横軸に方位、縦軸にそれぞれ方位方向・高度方向の偏差を取ったグラフを図4.5に示す。

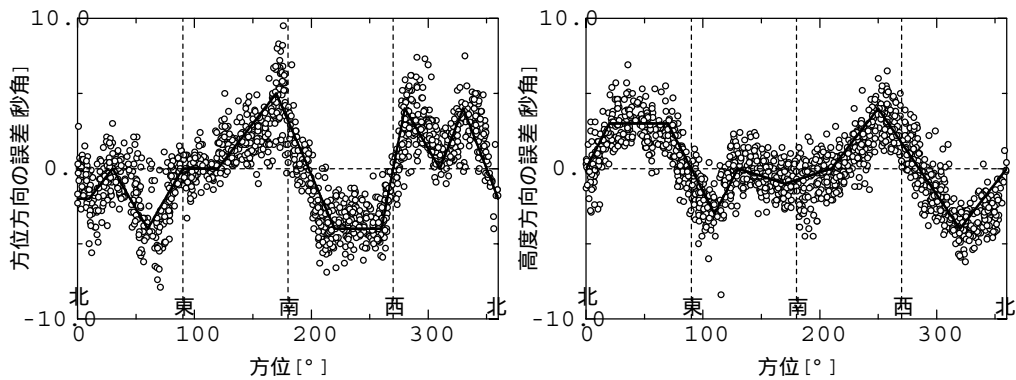


図 4.5: 望遠鏡解析後に残った誤差 (白丸)。実線は簡単化した線

明らかに方位に依存した誤差が残っているのが分かる。この誤差は13回の観測を通して現れ、望遠鏡解析で用いたどの項とも異なる振る舞いをする。

この誤差を補正するために、方位の値に応じて方位・高度の計算値に補正項を加える補正テーブル

ルを作った。補正項は上のグラフの中に実線で示したように誤差を簡単化して、1°おきのテーブルを作成した。

4.1.3 指向精度の測定

指向精度向上補正テーブルを使用した上で、指向精度を求めた。観測は10回行い、1回につき105～110個の星を導入した。また、4回目(11/3, 1回目)の観測で求めたパラメータを天体位置計算に組み込んで5回目以降の観測を行った。

生の指向精度

まず、軸原点のずれのみを補正し、望遠鏡の生の指向精度を求めた。以下に、観測回数、観測日、導入した星の数、生の指向精度を表4.3に示す。(単位：秒角)

回	観測日	星の数	生の指向精度
1	2000.10.31	108	18.46
2	2000.11. 1	107	17.85
3	2000.11. 2	105	16.60
4	2000.11. 3	108	16.32
5	2000.11. 3	106	17.19
6	2000.11. 5	109	18.23
7	2000.11. 7	110	16.49
8	2000.11. 8	108	17.23
9	2000.11. 9	108	16.76
10	2000.11.10	108	19.00
平均		107.7	17.41 ± 0.92

表 4.3: 生の指向精度 (単位：秒角)

望遠鏡の生の指向精度は 17.4 ± 0.9 [秒角] であった。

補正項を導入した指向精度

1回の観測ごとに10の補正項全てを導入して望遠鏡解析を行い、各補正值を求めた。また、10個の補正值について10回の観測結果より求めた値の平均値を求めた。各観測ごとの各補正項の値を図4.6に、各補正項の平均値を表4.4に示す。

補正項	IA	IE	AW	AN	NPAE	CA	TF	TX	ACES	ACEC
補正值	-11.82	-4.90	8.26	-5.72	19.11	10.72	6.20	2.01	-2.97	-4.67

表 4.4: 各補正值の平均値 (単位は秒角)

10回の観測結果について、この平均値を用いて指向精度を求めた。結果を表4.5に示す。

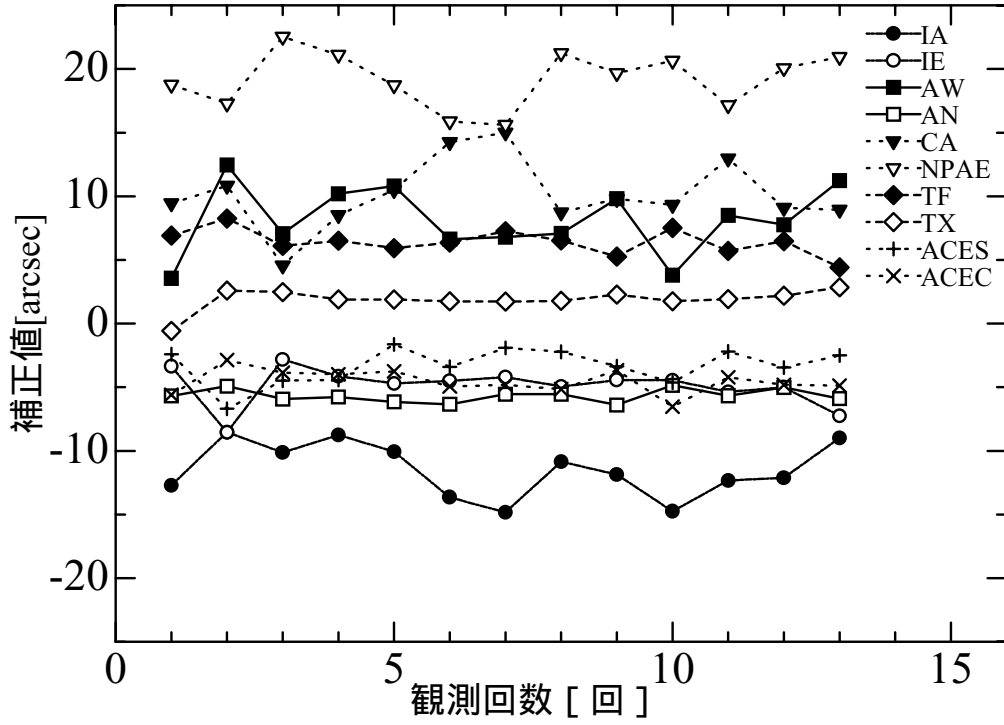


図 4.6: 各補正值の観測ごとの変動

回	観測日	星の数	指向精度
1	2000.10.31	108	3.22
2	2000.11. 1	107	3.28
3	2000.11. 2	105	2.39
4	2000.11. 3	108	2.36
5	2000.11. 3	106	2.00
6	2000.11. 5	109	2.47
7	2000.11. 7	110	4.52
8	2000.11. 8	108	2.20
9	2000.11. 9	108	2.54
10	2000.11.10	108	4.33
平均		107.7	2.93 ± 0.89

表 4.5: 望遠鏡解析後の指向精度 (単位: 秒角)

望遠鏡解析後の指向精度は 2.9 ± 0.9 [秒角] であった。

また、望遠鏡解析前後の星の導入誤差を図 4.7 に示す。これは中心に視野中心、横軸に方位方向のずれ、縦軸に高度方向のずれを取り、星の導入誤差の全測定結果をプロットしたものである。黒は望遠鏡解析前、赤は望遠鏡解析後の結果である。指向精度が良いほどプロットは中心に集まる。

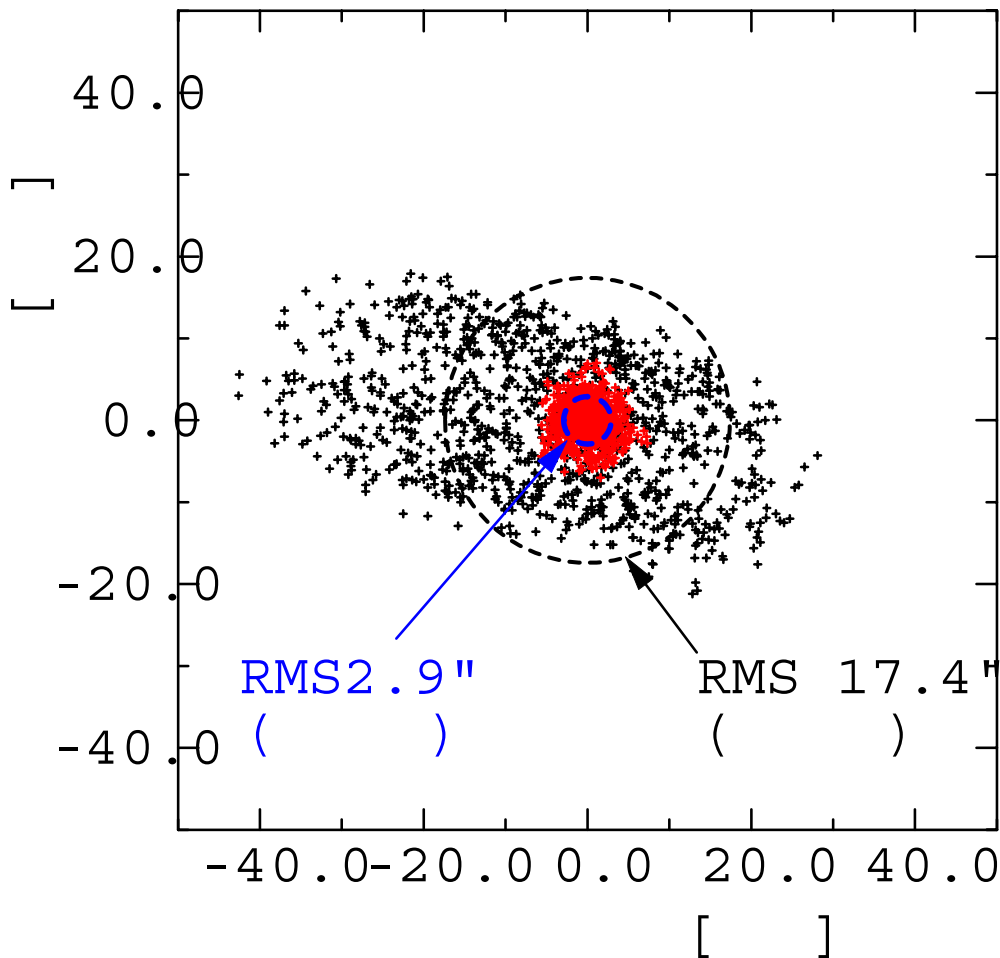


図 4.7: 指向精度測定結果。濃い点は望遠鏡解析前、薄い点は望遠鏡解析後の結果

4.1.4 考察

算出した指向精度を実際に得られるか？

望遠鏡解析によって求めた補正値を天体位置計算に組み込むことで、指向精度を向上させることができる事はすでに述べた。算出した指向精度で天体が導入できることを実際に観測で確認したい。

今回行った 10 回の観測では、4 回目 (11/3, 1 回目) の観測で求めた補正値を天体位置計算に組み込んで 5 回目以降の観測を行っている。5 回目以降の観測結果について 4 回目の観測で求めた補正値を用いて指向精度を求め、この計算結果が実際の観測結果より求めた指向精度と等しくなるか

どうか調べた。

表 4.6 に、観測回数、観測日、観測した星の数、実際の観測結果より求めた指向精度、計算で求めた指向精度、2つの値の間の誤差を示す。

回	観測日	星の数	観測指向精度 (A)	計算指向精度 (B)	誤差 (A-B)
5	2000.11. 3	106	1.83	1.80	-0.03
6	2000.11. 5	109	3.41	3.44	+0.03
7	2000.11. 7	110	3.92	3.96	+0.04
8	2000.11. 8	108	2.49	2.54	+0.05
9	2000.11. 9	108	2.87	2.92	+0.05
10	2000.11.10	108	5.38	5.32	-0.06
平均		108.2	3.32	3.33	+0.01

表 4.6: 指向精度 観測結果と計算結果の比較 (単位：秒角)

観測結果と計算結果の誤差は最大でも 0.06[秒角] であった。これは、算出した指向精度 2.9 ± 0.9 [秒角] の誤差よりも充分小さい。このことから、算出した指向精度は実際の観測でも得られると考える事ができる。

求めた指向精度の値について

望遠鏡の生の指向精度 17.4 ± 0.9 [秒角] は望遠鏡構造の各 부품の精度や組み立て精度が高いときに初めて達成できる数字である。このレポートにはそれらの精度については触れていないが、これは誇ることでできる数字であると考えている。

望遠鏡解析後の指向精度 2.9 ± 0.9 [秒角] は当初の目的を十分に満たしている。ただ、観測ごとの指向精度を見るとばらつきがあり、最悪値は 4.5[秒角] と大きくなっている。

この原因を見るために、各観測結果より求めた各補正項の値と指向精度との相関を調べた結果、指向精度と補正項の1つである AW 値の間に相関があることが分かった。AW は方位軸の東西方向の傾き、すなわち望遠鏡構造の東西方向の傾きを表す。10回の観測結果について望遠鏡解析を行って得た AW 値の平均を取り、10個の AW 値の平均値からのずれを求めた。AW 値の平均値からのずれと指向精度の値の相関を図 4.8 に示す。

AW 値が平均値よりずれるほど指向精度は悪くなっているのが分かる。

AW 値が変動するということは、望遠鏡構造全体、または一部が東西方向について変形、あるいは振動していることを示す。AW が変動する原因として温度変化が考えられる。温度が高いほど望遠鏡構造は膨張する。望遠鏡の東側部分と西側部分の間に温度差が発生していてしかも日によって変動している場合、結果として方位軸の傾きの変動につながる、という考えである。この「部分」というのは方位ベース、または基礎の部分である。それよりも上の部分で温度変化によって膨張の度合いが違っている場合、方位軸はみそすり運動をするので誤差は AW のものとは違った関係式で現れるからである。方位ベースより下の部分の厚さはおよそ 1m である。望遠鏡構造には鉄を使用しており、鉄の熱膨張率 α は 11.8×10^{-6} [m/K]、方位ベースより上の構造を支えている部分の直径は約 3m である。東西で 5[秒角] の傾きを発生させるために必要な温度差は、

$$\Delta\theta = \frac{\Delta T * d * \alpha}{R}$$

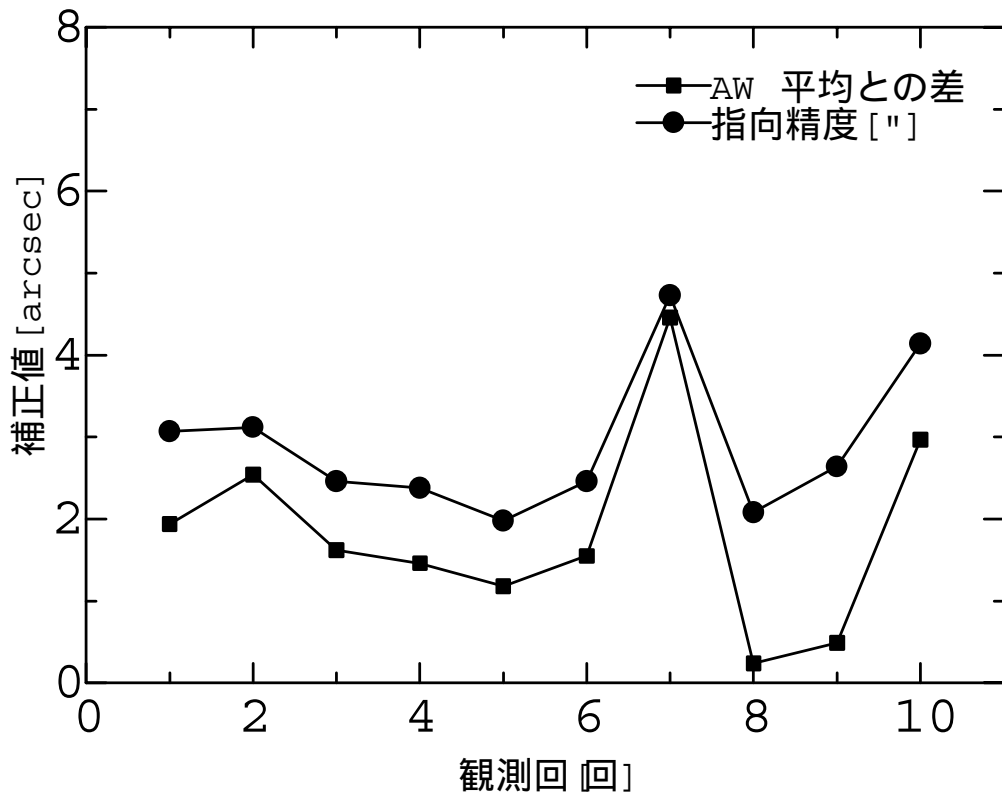


図 4.8: 指向精度と AW 値との相関

これを变形すると、

$$\begin{aligned}
 \Delta T &= \frac{R}{\alpha * d} * \Delta \theta \\
 &= \frac{3[m]}{11.8 * 10^{-6}[m/K] * 1[m]} \frac{5 * \pi}{180 * 3600} \\
 &= 6.16[K]
 \end{aligned}$$

となる。実際にこれだけの温度差が発生するかどうかは疑わしいが、ないとも言い切れない。

単に望遠鏡解析というフィッティングの計算結果にすぎないという考え方もできるし、他の要因で実際に望遠鏡が東西に揺れている可能性もありえる。この問題をさらに追求するには、指向精度の観測を行いそのときの天気や温度・湿度などを繰り返し記録することが必要だろう。

4.2 追尾精度

4.2.1 観測する星の選択

赤道儀式架台を採用している望遠鏡の場合、天体追尾時には赤緯は停止し、赤経のみ速度 15[秒角/sec] で定速に動く。しかし、この望遠鏡は経緯台式架台を採用している。方位・高度の追尾速度は観測天体の方位・高度によって大きく変化する。望遠鏡の追尾精度を測定するためには、様々な条件にある星を観測する必要がある。

追尾精度の測定にあたり、以下の星を観測した。

- 観測中に北中(南中)する星
- 方位・高度いずれかの追尾速度がほぼ 0[秒角/sec] である星
- 方位・高度ともに追尾速度が 0[秒角/sec] でない星
- 天の南極付近の星(方位・高度ともに追尾速度がほぼ 0[秒角/sec])

4.2.2 追尾精度の測定方法

望遠鏡に CCD を取り付ける。CCD は望遠鏡解析で用いたのと同じものである。星を導入して、星を視野の中心へ持ってくる。60 分の 1 秒露光の CCD を用いて 1 秒間隔、930 秒間の連続撮像を行う。こうしてできた 1 秒おきに撮った 930 枚の画像について、大気の揺らぎによる星像位置が乱れる影響を排除するため、30 秒ごとに画像を平均する。平均してできた 31 枚の画像内における星像の中心位置を求め、さらにその平均を求める。各画像について星位置の平均からの標準偏差を求め、その平均を追尾精度とする。

4.2.3 結果

15 分間の追尾記録から、5 分、10 分、15 分ごとの追尾精度を求めた。以下に天体名・観測日・5、10、15 分間の追尾精度、北中時を表 4.7 に示す。

高度の単位は [°]、追尾精度の単位は [秒角/5 分]、北中時は北中したときの時間(単位は [分]、- は北中しない)である。また、方位・高度いずれかの追尾速度がほぼ 0 である星、天の南極付近の星(方位・高度ともに追尾速度がほぼ 0)、方位・高度とも追尾速度が 0 でない星については、それぞれ方、高、両、- で示した。

4.2.4 考察

観測天体の高度と追尾精度の相関を調べたところ、高度が高くなると追尾精度が悪くなる傾向が見られた。追尾天体の高度と追尾精度の相関を図 4.9 に示す。5 分間の追尾精度は 0~5 分、5~10 分、10~15 分の平均、10 分間の追尾精度は 0~10 分、5~15 分の平均を用いた。

高度 32~80° の星では、追尾精度は 0.5[秒角/5 分] よりも良いが、高度 80° 以上の星の追尾精度はそれよりも悪くなっている。

駆動精度の項で、高度が高いときは方位の誤差は $\cos(h)$ 倍でしか効かないと述べた。しかし追尾精度は高度が高いときに悪くなっている。高度が高いとき方位の駆動速度は速くなるので方位の

Name	date	高度	0-5	5-10	10-15	ave	0-10	5-15	ave	0-15	北中時
SAO258857	10/08	32	0.23	0.16	0.22	0.20	0.27	0.21	0.24	0.27	両
SAO236693	10/04	32	0.20	0.25	0.31	0.25	0.33	0.35	0.34	0.43	-
SAO075012	10/04	36	0.23	0.19	0.22	0.21	0.26	0.27	0.27	0.35	-
SAO247683	10/08	46	0.24	0.32	0.27	0.28	0.35	0.31	0.33	0.35	高
SAO129009	10/08	46	0.22	0.18	0.16	0.19	0.28	0.19	0.24	0.29	-
SAO256029	10/04	48	0.17	0.35	0.29	0.27	0.41	0.43	0.42	0.55	9
SAO169981	10/08	52	0.14	0.13	0.24	0.17	0.19	0.27	0.23	0.31	-
SAO217153	10/08	52	0.18	0.17	0.17	0.17	0.23	0.25	0.24	0.32	方
SAO132028	11/09	58	0.32	0.42	0.34	0.36	0.51	0.67	0.59	0.80	7
SAO131568	10/30	63	0.40	0.32	0.61	0.45	0.60	0.77	0.68	0.97	12
SAO132793	11/09	64	0.33	0.50	0.33	0.39	0.71	0.66	0.69	0.95	4
SAO147632	10/29	68	0.66	0.47	0.37	0.50	1.03	0.71	0.87	1.28	2
SAO151602	11/09	70	0.16	0.32	0.46	0.32	0.47	0.58	0.52	0.73	12
SAO147986	10/29	73	0.42	0.41	0.47	0.43	0.47	0.56	0.52	0.64	12
SAO215996	10/04	78	0.27	0.24	0.15	0.22	0.38	0.38	0.38	0.51	-
SAO167471	10/29	78	0.29	0.44	0.50	0.41	0.36	0.83	0.60	0.74	12
SAO170892	11/09	80	0.30	0.64	0.43	0.46	0.74	1.07	0.91	1.26	8
SAO168373	10/04	85	0.52	0.36	0.89	0.59	0.69	1.16	0.93	0.29	-
SAO166716	10/29	87	0.62	0.57	0.94	0.71	1.03	1.26	1.15	1.40	10
SAO195148	10/29	88	0.44	0.95	0.82	0.74	0.97	1.54	1.26	1.50	12

表 4.7: 追尾精度

角度変化も速い。望遠鏡解析による補正に誤差があった場合、角度変化が速ければ追尾精度にも誤差をもたらすかもしれない。

方位、高度の片方、または両方の追尾速度が 0[秒角/sec] になるときとならないときでは、追尾精度に大きな違いはなかった。しかし、北中する星を追尾した場合、北中する前後 5 分間の追尾精度はそれ以外のときに比べて悪くなっている。この測定では、追尾した星のうち高度の高い星はほとんど北中する星だったが、同じ高度の北中する星としない星を追尾して精度を求める必要があるかもしれない。

高度 60~70° の星を追尾したときの追尾精度が <60° や 70~80° の星を追尾したときより悪くなっている。比較のために、高度 68、73° で北中した星について時間とともに星位置が視野内で動く様子を図 4.10 に示す。15 分間の追尾における視野内での星位置を最初の星位置を原点としてプロットし、時間の順に線で結んだ。

右の高度 73° で北中する星は視野内でほぼランダムな動きをする。これに対して左の高度 68° で北中する星は視野内を一定の方向へずれていく。このように追尾中に星が視野内を一定方向へ動いてしまう結果、高度 60~70° の星を追尾したときの追尾精度が 70~80° の星を追尾したときより悪くなっていると思われる。なぜこのような現象が起きるのか、原因は分かっていない。

最後に、この測定では 30 秒単位の星位置の動きを見ているが、SIRIUS の観測では 30 秒、1 分間で積分を行う。このような短い時間での追尾精度を測定する必要があるだろう。

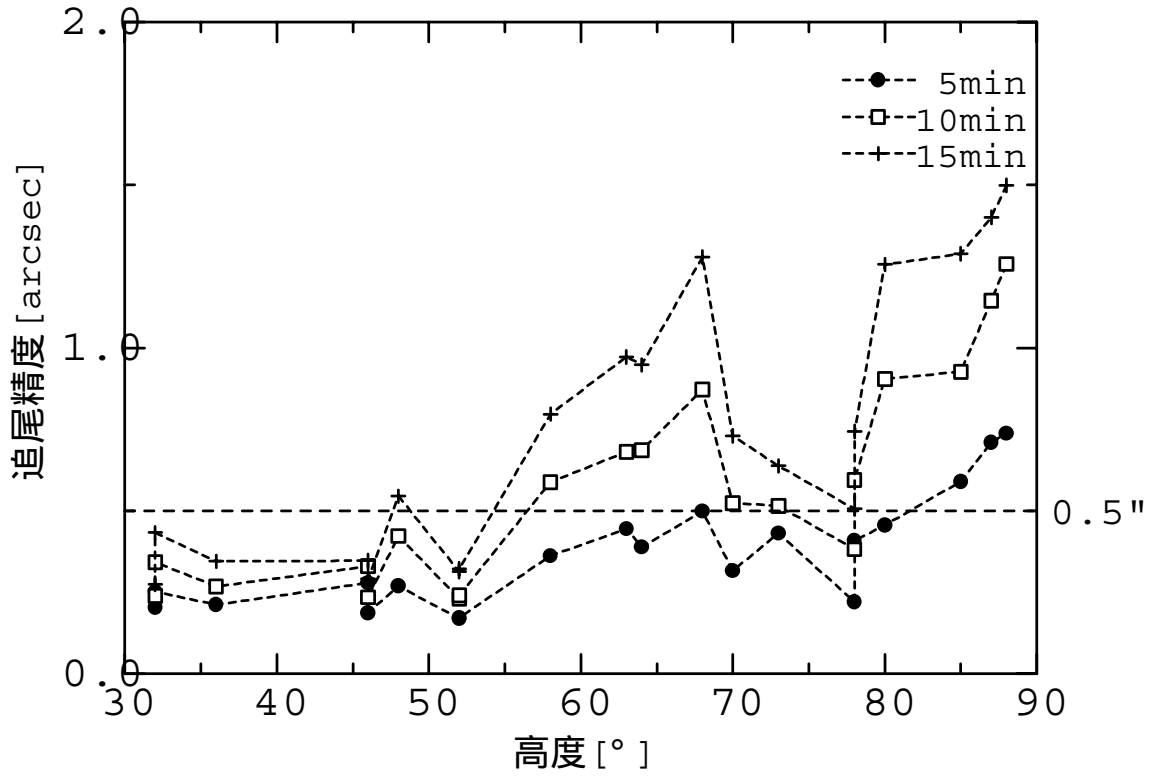


図 4.9: 追尾天体の高度と追尾精度の相関

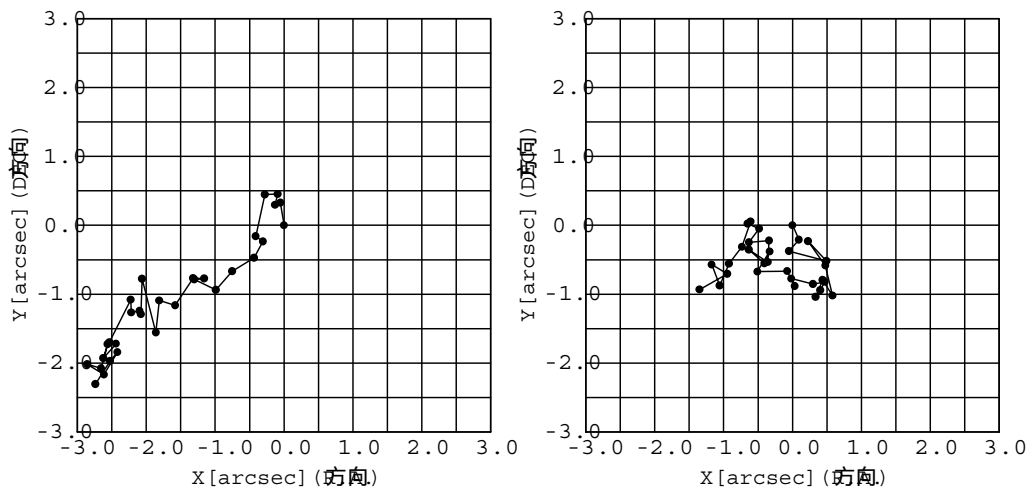


図 4.10: 追尾した星の視野内での移動。それぞれ高度 68 °(左)と 73 °(右)で北中。

4.3 望遠鏡の光学性能評価

4.3.1 光学系パラメータ

本望遠鏡の主鏡・副鏡はロシアの LOMO 社製である。1997.11.19 付 LOMO 社資料に基づく光学系パラメータ及び鏡の測定データを示す。

主鏡	材質	Astro-Sitall
	口径	1412.1mm
	厚さ(周縁にて)	199.2mm
	中心穴径	300.5mm
	有効口径	1395mm
	焦点距離	4060mm
副鏡	材質	Astro-Sitall
	口径	399.7mm
	厚さ(周縁にて)	53.2mm
	有効口径	382mm
	焦点距離	1517.5mm
カセグレン系	合成焦点距離	13800mm
	倍率 m2	-3.4
	合成 F 比	9.89
	主鏡・副鏡間距離	2985mm
	Back Focus	650mm

表 4.8: 南ア 1.4m 望遠鏡 光学系パラメータ (1997.11.19 付 LOMO 資料に基づく)

カセグレン系	波面誤差 振幅, RMS	0.208 , 0.036
	ゾーン誤差 振幅, RMS	0.033 , 0.008
	非点的誤差 振幅, RMS, 角度(反時計回り)	0.089 , 0.019 , -65.56 度
	局部誤差 振幅, RMS	0.192 , 0.029
	Strehl 比	0.942

表 4.9: 鏡面精度測定値 (校正済平面鏡を用いての干渉計試験 1997.11.11 LOMO)

測定波長 =632.8nm、光軸：水平方向

数字 誤差 ()

0	-0.09334
1	-0.07078
2	-0.04823
3	-0.02567
4	-0.003129
5	0.01944
6	0.04199
7	0.06454
8	0.08710
9	0.1098

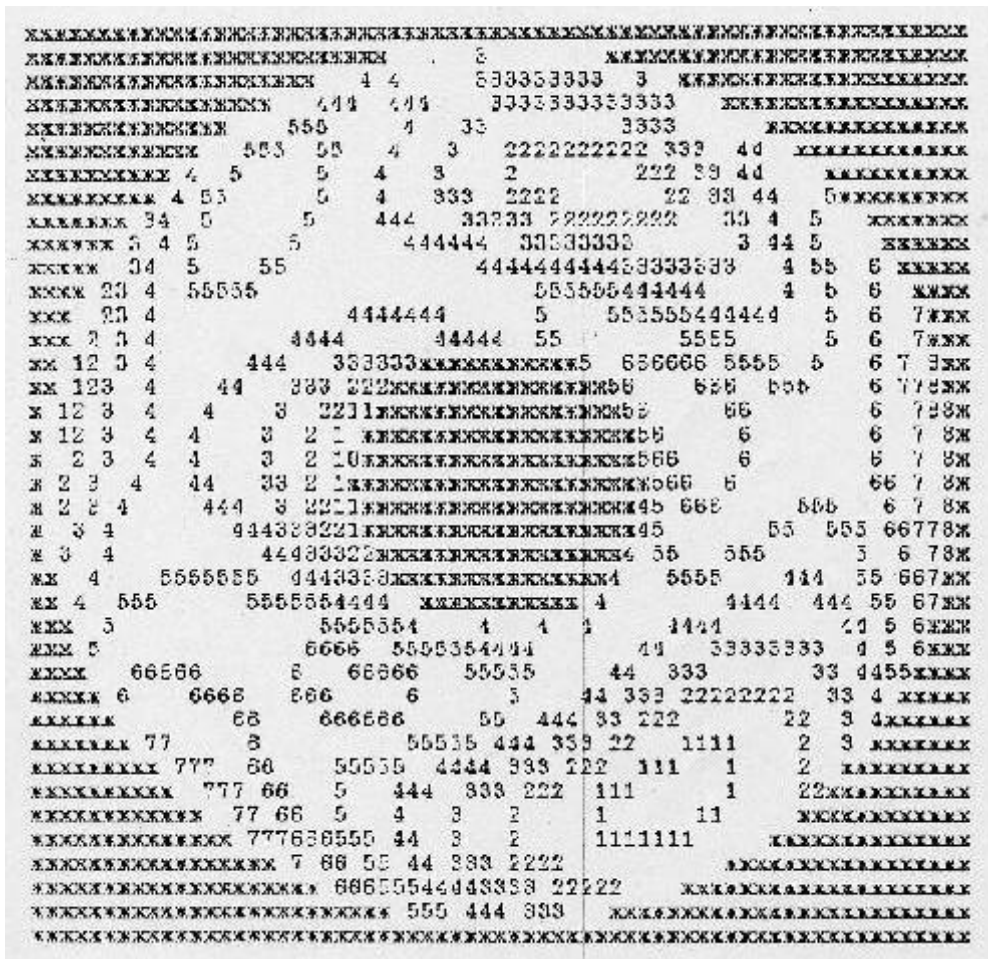


図 4.11: 主鏡の波面誤差マップ (2D)

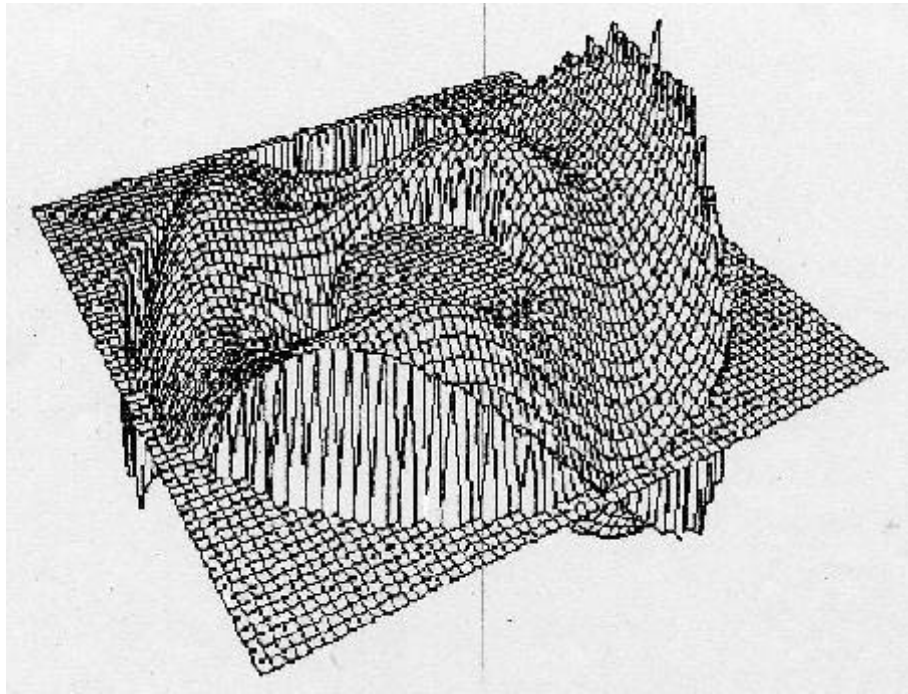


図 4.12: 主鏡の波面誤差マップ (3D)

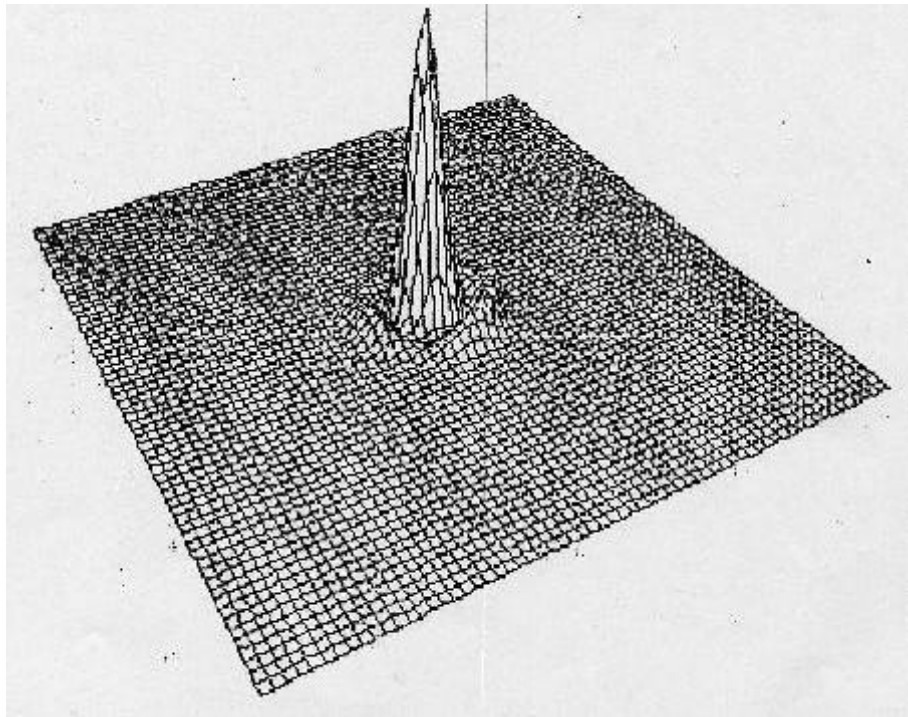


図 4.13: 集光時の光強度 (3D)

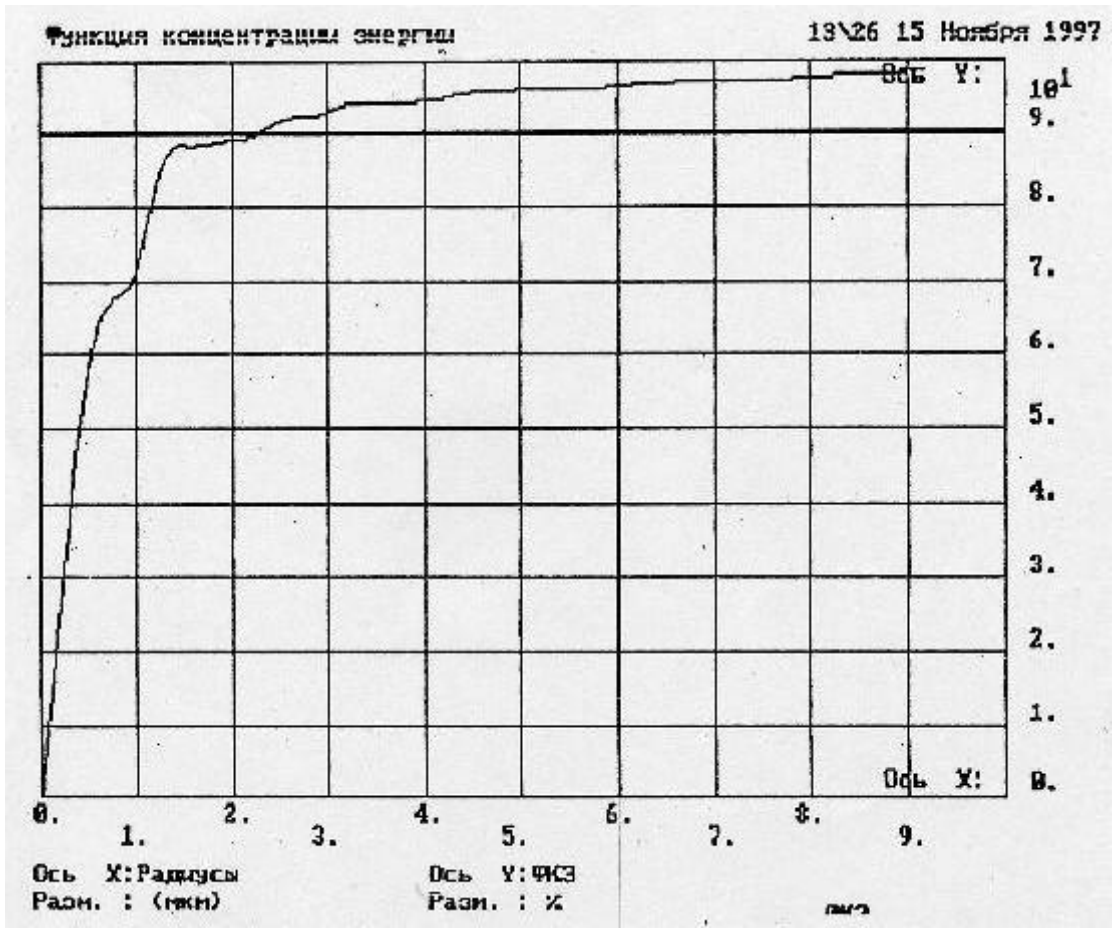


図 4.14: 集光時の光強度 (グラフ)。横軸は中心からの距離 [$10\mu m$]、縦軸は光の強度 [%*10]

4.3.2 光軸調整

主鏡と副鏡を正しく相對させるための光軸調整について述べる。

光軸調整には光学望遠鏡を用いる。この光軸望遠鏡は望遠鏡として位置を測定することができ、またオートコリメータとして角度を測定することもできる。光軸調整の際には、以下の仮定をしている。

- 主鏡・副鏡の穴は正確に中心に開けられている
- 主鏡の穴とローテータの穴の中心は同軸上にあり、この軸を視野の中心と考える
- 主鏡とローテータの距離は理想的な光学系の設計通りである

これらの仮定をしたうえで、光軸調整は以下の手順で行う。

1. 副鏡に開けてある穴の中心に平面鏡を置く。ローテータを回転させながら光軸望遠鏡の光軸が平面鏡と垂直になるように副鏡及び光軸望遠鏡の向きを調整する。これ以後、光軸望遠鏡の向きは変化させない。
2. 副鏡に開けてある穴の中心に十字線を置き、ローテータを回転させながら光軸望遠鏡の視野中心にこの十字線が来るように副鏡及び光軸望遠鏡の位置を調整する。これ以後、光軸望遠鏡は向き、位置ともに固定する。
3. 主鏡と副鏡の間に糸を光軸の鉛直方向へ十字に張り、十字の中心を視野の中心に合わせる。光軸望遠鏡から、直接、副鏡で反射、主鏡・副鏡両方で反射、という3つの糸の像を見ることができる。まず、副鏡で反射した糸の像と直接見える糸の像が一致するように副鏡の向きを調整する。次に、主鏡・副鏡で反射した糸の像が一致するように主鏡の向きを調整する。
4. 光軸望遠鏡を外し、CCDを取り付ける。ハルトマンテストを行い、穴の間隔が一定になるように主鏡の向きを調整する。こうすることでコマ収差を消すことができる。

4.3.3 ハルトマンテスト

ハルトマンテストとは

ハルトマンテストは望遠鏡の光学性能評価を行うための幾何光学的なテスト方法の一つである。

望遠鏡光学系の直前に、多数の穴を開けた板を置く。副鏡位置を予想焦点位置から前後に動かしてハルトマン板のデフォーカス像を撮る。それぞれの穴を通過した光束をそれぞれの光線として取り扱うこととする。対応する穴の像の中心位置を結ぶことによって最良像面付近における光線を追跡する。(図 4.15) 光学系に収差がある場合、光線群の焦点、または最良像面上において光線群はある分布を持つ。その分布を表すものをスポット・ダイアグラムといい、最良像面上におけるスポット・ダイアグラムの光軸からの平均半径をハルトマン定数 T という。ハルトマン定数は焦点距離の異なる望遠鏡の光学性能を比較するひとつの評価尺度である。

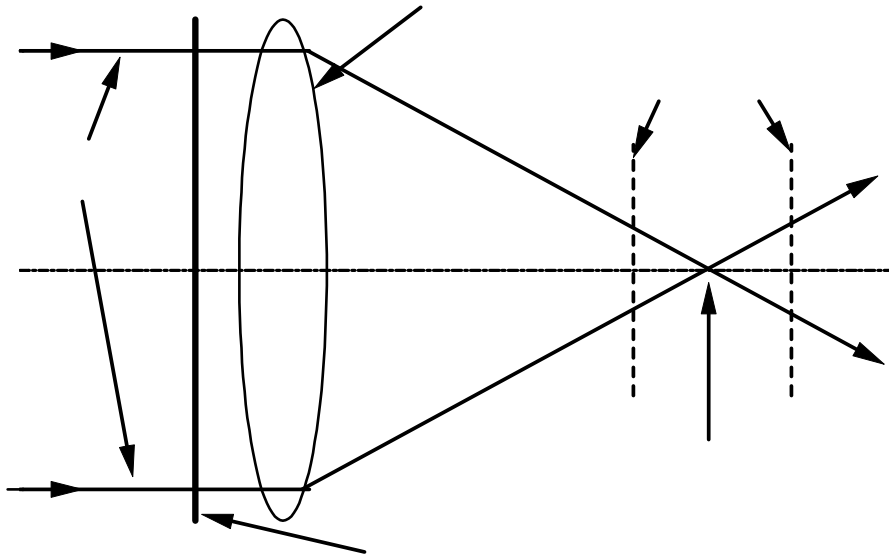


図 4.15: ハルトマンテスト

方法

直径 50mm の穴が 140mm 間隔で格子状に開いているハルトマン板を、望遠鏡トップリングに取り付ける。任意の星を視野の中心に導入する。焦点から前後 3.5mm ピントをずらす。60 分の 1 秒積分の CCD でハルトマンパターンを 1 秒間隔で各 240 枚ずつ撮像する。それぞれ 240 枚の画像を平均してシーイングの影響を排除する。平均の画像からハルトマンパターンの穴位置を算出する。算出した穴位置を元にハルトマン定数を算出する。なお、ハルトマン定数の算出方法には最小錯乱円法を採用した。

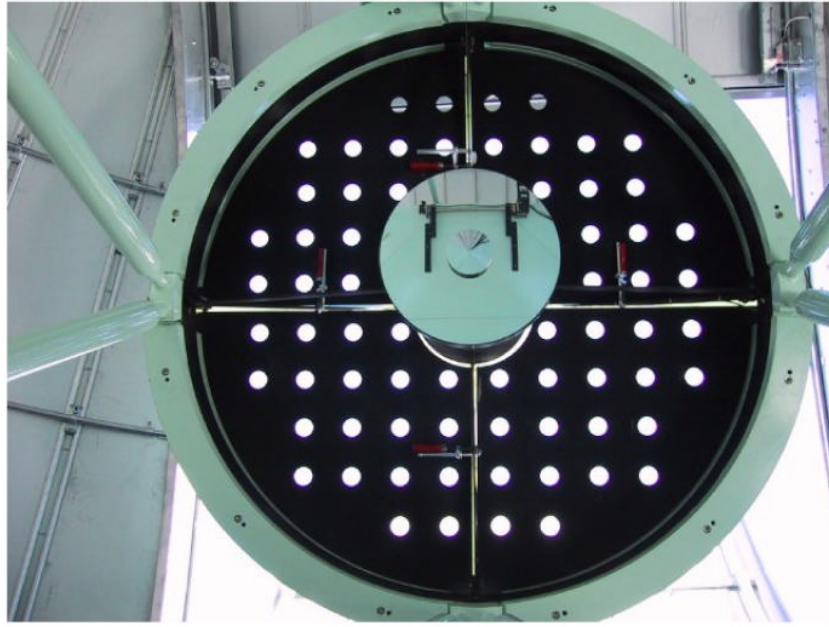


図 4.16: 望遠鏡トップリングに取り付けたハルトマン板

ハルトマン定数の計算方法 (最小錯乱円法)

ハルトマンパターンを撮像した面の望遠鏡側を M 、CCD 側を M' とする。 M と M' の中心を O 、 O' とし、この 2 点を通る直線を光軸と定義する。光軸を z 軸、像面上の座標を (x, y) とする。光軸の像面上の位置座標を全穴の位置座標の平均値と定義する。内側像面のスポット座標 $P(x_i, y_i)$ と外側像面のスポット座標 $P'(x'_i, y'_i)$ に対して、光軸の座標 $O(x_c, y_c)$ と $O'(x'_c, y'_c)$ は、

$$x_C^{(')} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^{(')}}{N}, y_C^{(')} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i^{(')}}{N} \quad (4.1)$$

で与えられる。また内側像面 M 上の z 座標を $z = 0$ 、外側像面 M' 上の z 座標を $z = l$ とおくと、光線 i の内・外側像面 M 、 M' における座標はそれぞれ、 $(x_{1i}, y_{1i}, 0)$ 、 (x_{2i}, y_{2i}, l) となる。 $0 \leq z \leq l$ の位置にある像面における光線 i の座標を (x_i, y_i, z) とすると、

$$x_i = \frac{x_{2i} - x_{1i}}{l} + x_{1i}, y_i = \frac{y_{2i} - y_{1i}}{l} + y_{1i} \quad (4.2)$$

で与えられる。光軸の座標を (x_c, y_c, z) とすると、光線 i の光軸からの距離 r_i は、

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (4.3)$$

で与えられる。その像面におけるスポットダイアグラムの平均半径 \bar{r}_z は、

$$\bar{r}_z = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N} \quad (4.4)$$

で与えられる。

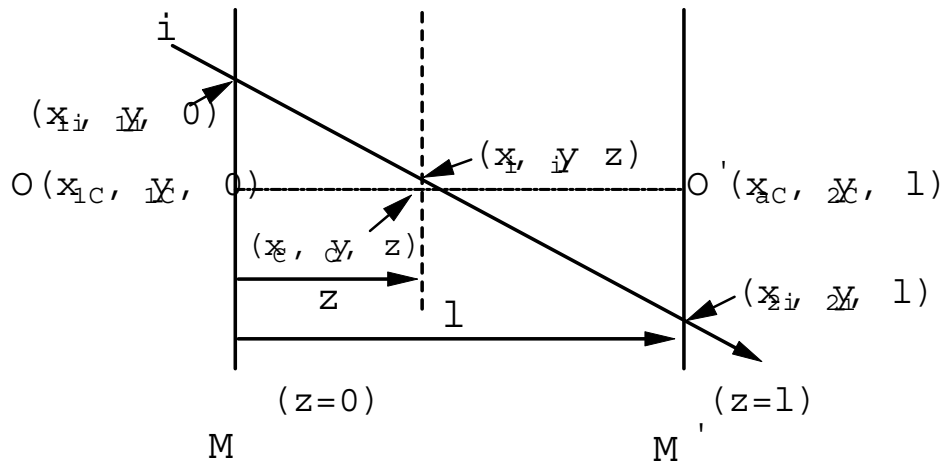


図 4.17: 最小錯乱円法

結果

2000/10/5 に 3 回、2000/10/08 に 10 回のハルトマンテストを行った。測定日、星の名前、星の高度 [°]、ハルトマン定数 [秒角] を以下に示す。

date	名前	高度	H.C.
10/5	SAO222321	21	0.43
10/5	SAO110920	49	0.43
10/5	SAO170051	78	0.44
10/8	SAO54471	21	0.42
10/8	SAO170457	28	0.44
10/8	SAO108378	34	0.43
10/8	SAO91781	42	0.39
10/8	SAO246574	43	0.40
10/8	SAO255670	45	0.43
10/8	SAO230992	52	0.43
10/8	SAO191524	63	0.45
10/8	SAO232573	70	0.44
10/8	SAO215093	79	0.39
average			0.42
stdev			0.02

SAO54471 を用いて行ったハルトマンテストの結果から、最良像面及びその前後の像面上において、各光線の (x, y) 座標をプロットしたものを図 4.18 に示す。図は左上から右下へ順に、最良像面から副鏡位置が $-50, -20, 0, +20, +50\mu\text{m}$ ずれたときの光線である。(主鏡へ近づくと正方向) 黒丸はハルトマンパターンの内側 12 個に対応する。

副鏡を主鏡から遠ざけたときは各光線が縦 (Y) 方向へ伸びているが、副鏡を主鏡へ近づけたとき各光線は横 (X) 方向へ伸びている。これは望遠鏡光学系に非点収差がのっていることを示している。また、図内において黒丸のハルトマンパターンの内側 12 個に注目すると、他の 60 個とは異

なる振る舞いをしているように見える。これらの傾向は 13 回の実験全てでみられた。

考察

13 回のハルトマンテストを行ってほぼ同じハルトマン定数を得た。13 回のテストでは高度 21 ~ 79 °の星の光を用いて行った。つまり望遠鏡光学系を 11 ~ 69 °傾けてテストを行ったことになる。それでほぼ同じ結果を得たことからこのテストは再現性があると言える。また、高度が変化しても望遠鏡光学系は変化していないとも言える。

次に、非点収差について述べる。一般に非点収差の大きさを表すとき、最も細長くなったときの長辺と短辺の差が使われる。本望遠鏡においてこの差はおよそ 0.5[秒角]であった。

非点収差がのる原因は主に以下のいずれかである。

- 主鏡と副鏡が正しく相對していない
- 主鏡または副鏡の形状が LOMO 社の資料とは違っている

主鏡と副鏡が正しく相對していないのが原因とすると、光軸調整について考える必要がある。

光軸調整の手順 4 を行う際、コマ収差をほぼ消したとしても非点収差は依然として残る可能性がある。コマ収差は、主鏡軸上に副鏡の曲率中心があるときに消えるが、非点収差は主鏡軸上に副鏡そのものがないために消えないからである。副鏡の主鏡軸からのずれを $\delta[mm]$ とおくと、非点収差の大きさ Ast は以下の式で求めることができる。

$$Ast = -\frac{m_2}{N} \left[1 - \frac{r_1 r_2^3}{(r_1 - 2d_1)^2 (r_1 - sd_1 - 2r_2)^2} \right] \left(\frac{\delta}{d_1} \right)^2 (206265)[\text{秒角}]$$

r_1 、 r_2 は主鏡、副鏡の曲率半径、 m_2 は倍率、 d_1 は主鏡 - 副鏡間の距離、 N はである。 $r_1 = -8120[mm]$ 、 $r_2 = -3035[mm]$ 、 $m_2 = -3.4$ 、 $d_1 = -2985[mm]$ 、 $N = 9.89$ を代入すると、

$$Ast = 0.0175\delta^2[\text{秒角}]$$

となる。非点収差 Ast が約 0.5[秒角] のとき、副鏡の主鏡軸からのずれ δ は 5.3[mm] となる。

光軸調整の際に行った仮定のどれかが正しくない場合、このずれが発生するかもしれない。

主鏡・副鏡の形状については、LOMO 社が行った鏡の測定データを見る限り、鏡の形状が原因でこの大きさの非点収差が発生するとは考えられない。しかし、副鏡は日本へ来てから中心に穴を開ける加工を行っている。このときに鏡の形状が変化した可能性はあり得る。

今後非点収差の原因を探る方法としてできることとして、副鏡を回転させて取り付けることが考えられる。もし副鏡の形状が原因なら、副鏡を回転させれば非点収差の方向も回転するはずである。ただ、副鏡を回転させて取り付けた場合、光軸調整を行わなくてはならない。この方法を試す際には、光軸調整のできる準備が必要である。

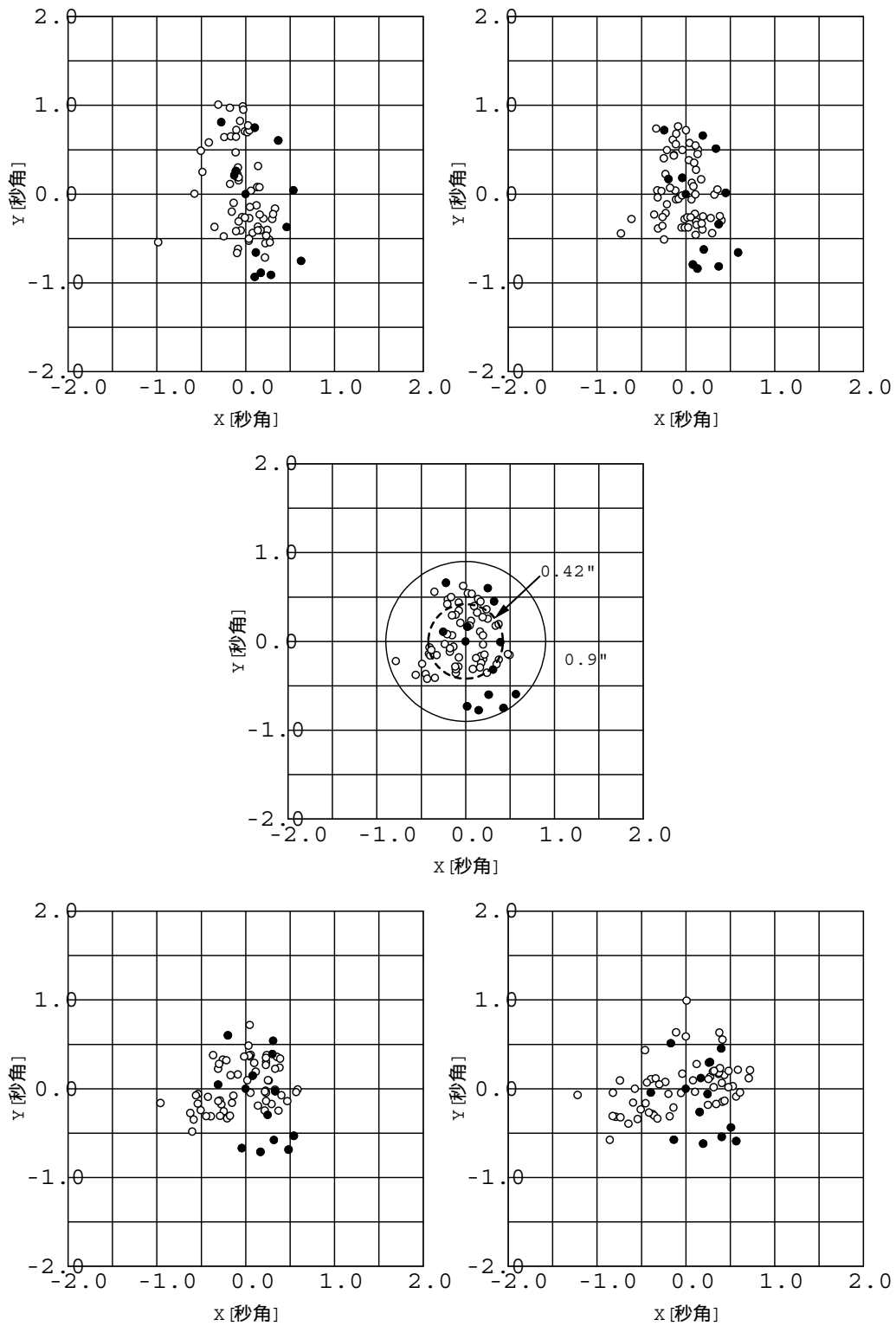


図 4.18: 最良像面付近の穴位置。中央が最良像面。黒丸は内側 12 個の穴に対応

付録 A 望遠鏡制御系の仕様

望遠鏡制御 PC、モータ制御 PC の仕様を表 A.1 に、駆動系の仕様を表 A.2 に示す。また、望遠鏡制御ソフトウェアとモータ制御ソフトウェア、ドームコントローラとのシリアル通信の仕様を表 A.3 に示す。

PC	望遠鏡制御 PC	モータ制御 PC
CPU	Celeron 333MHz	PentiumMMX 266MHz
Memory	128MB	SO-DIMM 16MB
HDD	4GB	500MB
OS	TurboLinux 3 (Linux 2.0.35)	MS-DOS 6.2/V

表 A.1: PC 仕様。望遠鏡制御 PC とモータ制御 PC

軸	方位	高度	姿勢
モータ角度分解能 [秒角]	1.2	0.6	13.5
減速機構	フリクション	フリクション	平ギア
減速比	22:1	11:1	24:1
駆動角度分解能 [秒角]	0.0576	0.0576	0.45
エンコーダ角度分解能	0.0352	0.0352	0.45
最高駆動速度 [秒角毎秒]	7200	3600	9000

表 A.2: 駆動系仕様

通信相手	モータ制御 PC	ドームコントローラ
ボーレート	115200	9600
キャラクタ長	7	8
パリティ	偶	偶
ストップビット	1	1
入力	カノニカル	非カノニカル

表 A.3: 望遠鏡制御 PC シリアル通信仕様

コード	状態
00	なし
01	ハード不良
02	バックアップデータエラー
03	シャットダウン処理中にエラーが発生しました
04	ホストとの通信にエラーが発生しました
05	GPS との通信に異常が発生しました
06	チェックサムエラー
10	現在位置を確定する為に原点復帰をして下さい
11	モーターが停止するまで処理できません
12	非常停止ボタンが押されました
20	方向軸 (X) ドライバーに異常が発生しました
21	方向軸 (X) オーバーランエラー
22	方向軸 (X) エンコーダーに異常が発生しました
23	方向軸 (X) の Ref 信号が検出できませんでした
30	高度軸 (Y) ドライバーに異常が発生しました
31	高度軸 (Y) オーバーランエラー
32	高度軸 (Y) エンコーダーに異常が発生しました
33	高度軸 (Y) の Ref 信号が検出できませんでした
40	姿勢軸 () ドライバーに異常が発生しました
41	姿勢軸 () オーバーランエラー
42	姿勢軸 () エンコーダーに異常が発生しました
43	姿勢軸 () の Ref 信号が検出できませんでした
50	副鏡制御 (F) ドライバーに異常が発生しました
51	副鏡制御 (F) オーバーランエラー
52	スケールユニットに異常が発生しました
60	予期せぬエラーが発生しました
61	X 軸で無効な動作モードが起動しました
62	Y 軸で無効な動作モードが起動しました
63	軸で無効な動作モードが起動しました
64	X 軸で無効な動作パターンが起動しました
65	Y 軸で無効な動作パターンが起動しました
66	軸で無効な動作パターンが起動しました
67	X 軸で無効な動作フェーズが起動しました
68	Y 軸で無効な動作フェーズが起動しました
69	軸で無効な動作フェーズが起動しました
70	COM3 の通信でエラーが発生しました
71	COM1 の通信でエラーが発生しました
72	COM2 の通信でエラーが発生しました
73	定義ファイルの設定が間違っています
74	XMS メモリが確保できませんでした
75 以降	システムエラー

表 A.4: モータ制御ソフトウェアエラーコード一覧

ビット	状態
B00=	1...レディ状態 (追尾可能な状態)
B01=	1...追尾モード / 0...以外のモード
B02=	1...移動中 / 0...停止中
B03=	1...電源 OFF 処理中
B04=	1...非常停止
B05=	1...ミラーカバー OPEN 状態
B06=	1...ミラーカバー CLOSE 状態
B07=	
B08=	1...追尾完了 / 0...未到達
B09=	1...前回のデータを無視しました
B10=	1...計算結果オーバーフロー (最適地に丸めた)
B11=	1...通信サイクルに間に合わなかった
B12=	
B13=	
B14=	
B15=	1...GPS 衛星をキャッチ / 0...衛星を確認中

表 A.5: モータ制御ソフトウェアステータスコード一覧。下位ビット順

表 A.4 にモータ制御ソフトウェアエラーコード一覧、表 A.5 にモータ制御ソフトウェアステータスコード一覧を示す。モータ制御ソフトウェアは望遠鏡制御ソフトウェアへ 0.1 秒周期で以下の形式の現在情報を出力する。

```
"hh:mm:ss.s +ddd:mm:ss.s +ddd:mm:ss.s +ddd:mm:ss.s ff.fff ff.fff ff.fff ee ssss**"
```

前から順に時刻、方位、高度、姿勢、副鏡位置 A-B、副鏡位置 A、副鏡位置 B、エラー、ステータス、サムである。このうちエラーは 2 桁の整数、ステータスは 16 ビットの整数である。モータ制御ソフトウェアが正常に動いているとき、エラーは"00"が出力される。エラーが発生したとき一覧で示したデータが出力される。同時に複数のエラーが発生しても、出力データではその内の 1 つしか表示されない。ステータスは一覧で示した条件によって決まる。GPS 時刻を受信し、ミラーカバーを開け、原点復帰も終了してレディ状態のときステータスは"8027"となる。

表 A.6 に望遠鏡制御ソフトウェアが受け付けるコマンドの名前、内容、形式を示す。形式のうち、1 つ目の引数がコマンドで 2 つ目以降が入力パラメータである。入力パラメータの az は方位、al は高度、ir は姿勢、ra は赤経、de は赤緯、epo は分点、focus は副鏡位置、num はデータの通し番号を、_の後の r は角度 (位置)、v は速度、o はオフセット、m は固有運動を表す。

num は 3 桁の整数、az_r、al_r、ir_r は"+ddd:mm:ss.s"、ra_d は"+hh:mm:ss.s"、de_d は"+dd:mm:ss.s"という形式で入力しなければならない。これ以外のパラメータは浮動小数点を入力する。

命令名	内容	形式
GET_NOW	現在の情報を得る	"A num1 num2 ..."
DOMESTOP	ドーム停止コマンドを送る	"C"
DOMEORDER	ドーム制御コマンドを送る	"D"
EMERGENCY	非常停止を解除する	"E"
END	望遠鏡制御ソフトウェアを終了する	"F"
SHU_OPEN	ミラーカバーを開ける	"G"
SHU_CLOSE	ミラーカバーを閉める	"H"
MIRROR_A	副鏡スケールのゼロクリア	"I"
MIRROR_B	副鏡スケールのゼロクリア	"J"
MIRROR_AB	副鏡位置の変更	"K focus"
MIRROR_REF	副鏡スケール A の原点復帰	"L"
MOVE	地平座標系で動作命令する	"M az_r az_v al_r al_v ir_r ir_v"
NO_ORDER	無効な命令を送る	"N"
POWER_OFF	モータ制御 PC の電源を切る	"O"
OFFSET	オフセット値を変更する	"P ra_o de_o az_o al_o ir_o"
ONCE_MOVE	地平座標系で 1 回だけ動作命令する	"Q az_r az_v al_r al_v ir_r ir_v"
ROT_FRAG	姿勢軸の駆動の是非を書き換える	"R"
STOP	停止する	"S"
TRACKING	赤道座標系で動作命令する	"T ra de ra_m de_m epo"
FEED_BACK	目標にオフセットを加える	"U"
DOME_OPEN	ドームシャッター上下を開く	"V"
DOME_CLOSE	ドームシャッター上下を閉じる	"W"
MOVE_FLAT	ドームフラット位置へ移動する	"X"
MOVE_END	終了位置へ移動する	"Y"
ZERO_SEARCH	原点復帰する	"Z az_r az_v al_r al_v ir_r ir_v"

表 A.6: 望遠鏡制御ソフトウェア受付コマンド一覧。

付録B 各軸の駆動精度元データ

方位・高度・姿勢軸についてそれぞれ5通りの駆動速度における駆動精度の測定を行った。行った全ての測定の結果を表B.1に示す。1st、2nd、3rd、4thは測定の回数を表し、3rdの欄には3回目の測定における駆動精度測定結果を示す。aveは測定した駆動精度の平均であり、本編ではこの数字を用いている。速度の単位は[秒角/sec]、駆動精度の単位は[秒角/5分]である。同様に、平均の遅れの測定結果も示す。

軸	速度	1st	2nd	3rd	4th	ave	軸	速度	1st	2nd	3rd	4th	ave
方位	0.1	0.07	0.07			0.07	方位	0.1	0.11	0.11			0.11
	1	0.07	0.07			0.07		1	0.05	0.05			0.05
	10	0.16	0.18			0.16		10	0.29	0.28			0.28
	100	0.39	0.39			0.39		100	2.25	2.26			2.26
	400	1.04	1.05			1.05		400	8.85	8.90			8.88
高度	0.1	0.06	0.07			0.07	高度	0.1	0.16	0.06			0.11
	1	0.08	0.07			0.08		1	0.11	0.01			0.06
	5	0.11	0.12			0.11		5	0.18	0.09			0.13
	10	0.13	0.13			0.13		10	0.33	0.24			0.29
	15	0.16	0.15			0.15		15	0.44	0.34			0.39
姿勢	0.1	0.82	0.76	1.13	1.45	1.04	姿勢	0.1	0.54	0.17	0.29	0.10	0.28
	1	0.55	0.96	1.13	0.99	0.91		1	0.58	0.30	0.51	0.26	0.41
	10	0.50	0.48	0.53	0.52	0.51		10	0.78	0.77	0.73	0.77	0.76
	100	1.44	1.65	1.54	1.44	1.52		100	2.48	2.46	2.54	2.56	2.51
	400	3.11	3.81	3.04	2.93	3.22		400	9.14	9.24	9.23	9.18	9.20

表 B.1: 駆動速度と駆動精度、遅れの平均 (駆動精度 (左) と遅れの平均 (右))

謝辞

本研究に携わることができたことは一生の喜びです。Z 研長田哲也助教授には、本研究全てにおいて多大なご指導をいただきました。本当にありがとうございました。本研究に携わる機会を与えてくださった Z 研佐藤修二教授に心よりお礼申し上げます。制御系全般について数多くのご指導をいただいた物理金工室の河合利秀氏に心より感謝いたします。

また、開発当初から一緒になって悪戦苦闘して下さった、西村製作所の西村有二氏、関敬之氏、桑田宗晴氏、柿本久仁氏、シーク電子工業の須戸恒文氏、奥村亨氏、JSC の西澤裕樹氏、河崎智一氏に心よりお礼申し上げます。

現地での組み立てに多大な貢献をして下さった Elvin Davids 氏、また現地で大変お世話になった Piet Fourrier 氏にお礼申し上げます。

そして、京都でも南アフリカでも同じ部屋に泊まり同じ釜の飯を食い、苦労を共に分かち合った栗田光樹夫君との日々は一生の思い出となるでしょう。ありがとう、栗田君。

参考文献

- [1] 見城尚志、永守重信著 『DC サーボモータ』 (総合電子出版社、1982 年)
- [2] 長沢工著 『天体の位置計算 増補版』 (地人書館、1985 年)
- [3] 村上博敏著 『Z 研山上望遠鏡の光学的性能評価』 (Z 研修士論文、1998 年度)
- [4] 吉田正太郎著 『望遠鏡光学屈折編』 (誠文堂新光社、1989 年)
- [5] 吉田正太郎著 『望遠鏡光学反射編』 (誠文堂新光社、1988 年)
- [6] DENIS の HP 『<http://cdsweb.u-strasbg.fr/DENIS/overvie.htx>』
- [7] 2MASS の HP 『<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/overview/about2mass.htm>』
- [8] R.N.Wilson 著 『Reflecting Telescope Optics II』 (Springer 社、1999 年)
- [9] LOMO 社「本望遠鏡光学系の資料」(1997 年 11 月 19 日付)