

2024 年度 卒業論文

1.85m 電波望遠鏡における  
ROS2 を用いた新制御システムの  
駆動精度試験

大阪府立大学

生命環境科学域 理学類 物理科学課程

電波天文学研究室

1211305023 岡本結人

## 要旨

我々の研究室は、長野県野辺山に 1.85m 電波望遠鏡を所有し、これはで星形成過程解明のため分子雲観測を目的としている。また、電波望遠鏡の制御システムに使用していた ROS1 から ROS2 に移行し、制御システムを刷新した。

実際の観測において電波望遠鏡がコンピュータから指示された方向に、正しく動かせるかということが重要になる。また、電波望遠鏡に実装されているソフトウェアの利便性を高めることも、観測効率を上げることに繋がる。

本研究の内容は、新システムが搭載された 1.85m 電波望遠鏡を用いて、新システムのテストを行う目的も兼ねて、電波望遠鏡の設置誤差を校正する光学ポインティング、また実際の観測で用いる電波軸と光学軸の校正を行う太陽スキャンを行うことで、1.85m 電波望遠鏡の駆動精度を調査した。また、現在 1.85m 電波望遠鏡と NANTEN2 望遠鏡で用いられている望遠鏡制御ソフトウェアの NECST において、観測から解析までの利便性や効率を向上させる機能の開発も行った。

# 目次

第 1 章	イントロダクション	4
1.1	電波天文学	4
1.2	電波望遠鏡	4
1.3	NECST (NEw Control System for Telescope)	5
1.4	研究の目的	7
第 2 章	駆動精度試験	8
2.1	光学ポインティング	8
2.1.1	構成システム	8
2.1.2	設置モデル	9
2.1.3	実験手順	12
2.1.4	結果と考察	13
2.2	太陽スキャン試験	16
2.2.1	概略	16
2.2.2	実験と解析	16
2.2.3	結果と考察	19
第 3 章	制御システムの開発	21
3.1	Robot Operating System 2 (ROS2)	21
3.1.1	ROS2 の概要	21
3.1.2	ROS2 の特徴	21
3.1.3	ROS2 の通信方式	22
3.2	機能実装	23
3.2.1	分光データを保存しない機能	24
3.2.2	Total Power モード	25
第 4 章	まとめと今後	26
第 5 章	謝辞	27
第 6 章	参考文献	28

# 第1章 電波天文学

## 1.1 電波天文学

電波天文学の目的の一つは星形成過程の解明であり、そのためには星の母体である分子雲の観測が重要となる。分子雲の主成分は水素などの気体とダスト（塵）だが、これを電波で観測する理由として、電波の特徴が挙げられる。まず、電波は波長が長く、波長より短い大きさの塵に遮られにくいこと、また、電波を用いて観測する利点として、電波は波として扱えるため、ドップラー効果を使って天体の運動状態や乱流の度合いを調べること、微弱な電波を増幅器で増幅することが可能になる点が挙げられる。

分子雲観測では、主成分となる水素を直接観測することが理想であるが、水素分子は双極子モーメントを持たないため、代わりに一酸化炭素分子を観測する。分子雲内で一酸化炭素分子の存在量は水素分子と比べて、約  $10^{-4}$  倍で比例関係にあることが分かっているため、一酸化炭素を観測することで分子雲の物理的性質や分布を調べることができる。

## 1.2 電波望遠鏡

天体からの電波は以下の装置の順に通過し処理される。

### 1. アンテナ

アンテナは目標天体の方向へ向き、天体を追尾することで電波を集める。また、アンテナの各分解能は、ビームの HPBW（半値全幅）で表され、アンテナの主鏡の大きさと観測周波数帯によって異なる。以下はアンテナの各分解能を表す式である。

$$\text{HPBW} \approx \frac{\lambda}{D}$$

$\lambda$  は観測電波の波長、 $D$  はアンテナ開口部の直径である。また、以下で大阪公立大学 1.85m 電波望遠鏡での各周波数帯における各分解能を示す。

観測周波数帯 [GHz]	分解能 [分角]	分解能 [秒角]
115	5.91	354.6
230	2.95	177
345	1.97	118.2

また、主鏡に反射された電波は副鏡、ミラーで反射された後に受信機の入口であるホーンへと導かれる。この主鏡からホーンまでの電波の経路、領域をビーム伝送系または光学系と呼ぶ。

## 2. 受信機

天体からの電波は高い周波数かつ微弱であるため、そのまま計算機で処理することは困難である。そのため、受信機では電波の周波数変換と増幅が行われる。1.85m 電波望遠鏡では、超伝導素子である SIS ミクサが用いられている。

## 3. 分光計

分光計では、受信機によるアナログ信号をデジタル信号に変換し、高速フーリエ変換の処理をすることで、天体からの電波を周波数成分に分けて強度を算出する。最終的に計算機によって、電波情報がデータとして記録されるようになる。

### 1.2.1 指向誤差

望遠鏡の指向誤差とは、望遠鏡が向いている方向と目標天体のずれのことを表す。この指向誤差の原因は設置による誤差、モーターの回転軸のずれなどが挙げられる。詳しくは設置モデルの節で説明する。この指向誤差を補正する試験のことはポインティングと呼ばれる。

### 1.3 NECST (NEw Control System for Telescope)

NECST は NASCO と呼ぶチリ・アタカマ砂漠にある NANTEN2 望遠鏡を用いて、一酸化炭素分子の回転輝線 ( $J=1-0$ ) を全天の約 70% をサーベイ観測する計画を実現するための、柔軟で拡張性の高い望遠鏡制御システムである。

現在、NECST は名古屋大学 NANTEN2 望遠鏡に加え、大阪公立大学 1.85m 電波望遠鏡にも搭載され、電波天文学研究室は名古屋大学と共同で制御システムの開発や評価を行っている。

・ NANTEN2 望遠鏡



図 1.1 NANTEN2 望遠鏡

所在地：チリ、アタカマ砂漠高地（標高 4800m）

口径：4m

観測対象：一酸化炭素  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$   $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0, 2-1$ ) 輝線  
周波数は 115, 230 GHz 帯

・ 1.85m 電波望遠



図 1.2 1.85m 電波望遠鏡

所在地：長野県野辺山宇宙観測所

口径：1.85m

観測対象：一酸化炭素  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$   $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J = 2-1, 3-2$ ) 輝線  
周波数は 230, 345 GHz 帯

## 1.4 研究の目的

分子雲観測による星形成過程解明を目的とした電波望遠鏡の観測において、観測対象の天体と望遠鏡が向いている方向の誤差は最小限に抑えることが要求される。そのために今回は、光学ポインティングを行い夜空に存在する多数の天体の写真を取ることにより、様々な方位角と仰角での指向誤差を補正し、太陽スキャンを行うことで実際の観測で用いる電波軸と光学ポインティングで用いた光学軸の補正を行う。

また、1.85m 電波望遠鏡の制御システムは、その中で使用している ROS (Robot Operating System) が ROS2 へバージョンアップしたことを境にシステム全体を刷新した。新システム実装以降、1.85m 電波望遠鏡では、望遠鏡の駆動精度試験が十分に行えていなかった。今回の試験は前述した指向誤差の補正に加えて、新システムにおいて通信のリアルタイム性などの観点から問題がないか調査する目的もある。

また、電波望遠鏡の制御システム NECST において、今までは光学ポインティングのような電波の情報を用いない測定、つまり容量の大きい分光計のデータを用いない測定でも分光データを保存していたため、不必要にデータファイルの容量が大きくなってしまい、試験を重ねるに連れ PC の容量を圧迫しているのが問題であった。今回は特定の観測や測定において、分光データの取り扱いを変更することで、容量の問題や解析の際の利便性を高めるような機能開発も行った。

## 第2章 駆動精度試験

電波望遠鏡は実際の分子雲観測で必要とされる、駆動精度に達していなければならない、今回、電波望遠鏡の駆動精度試験である、光学ポインティングと太陽スキャンを行った。

光学ポインティングでは、望遠鏡に取り付けられた光学望遠鏡とカメラを用いて、全天に渡り天体を撮影することで、指向誤差を補正する。また、電波を用いて試験が可能な天体は多くないため、まずは光学ポインティングで機械的な誤差を補正する。太陽スキャンでは、電波を用いて太陽をスキャン観測することで、光学ポインティングでは補正できない光学系における誤差や光軸と電波軸のずれを補正する。

### 2.1 光学ポインティング

電波望遠鏡を設置する際に、完全な状態で設置することは難しいため、観測対象の天体座標と実際に望遠鏡が向いている座標には誤差が生じてしまう。その誤差を PC 上で校正することが必要となる。概略図は以下に示す。

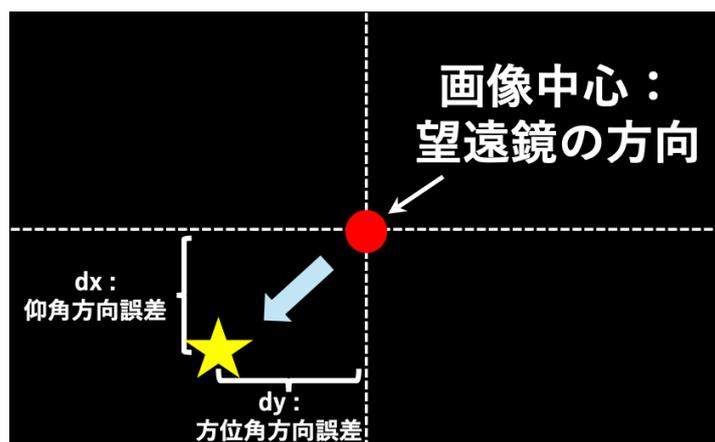


図 2.1 光学ポインティングにおける指向誤差の概略図

#### 2.1.1 構成システム

光学ポインティングで用いる機材は、図に示すような光学望遠鏡を取り付けたカメラを用いる。これを 1.85m 電波望遠鏡の EI ボックスに取り付け、電波軸と平行になるように設置する。カメラの制御は Raspberry Pi で行い、遠隔で撮影することが可能である。(図 2.2)



図 2.2 設置した光学望遠鏡とカメラ

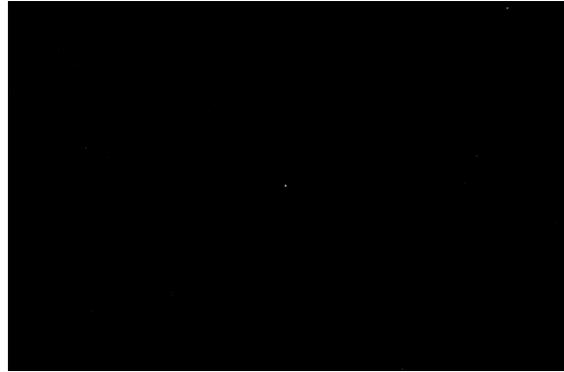


図 2.3 撮影した天体の例

使用した光学望遠鏡は BORG 製、焦点距離：500mm、口径：50mm、カメラは Canon EOS M100、画素数：2400 × 1600、画角：2.55° × 1.17° である。

### 2.1.2 設置モデル

1.85m 電波望遠鏡では、Az-El 経緯台方式を採用している。経緯台方式において、方位角 Az、仰角 El の天体を指向しようとしている場合の設置誤差のモデルは以下のよう  
に導かれる。(2010 國實 修士論文)

$$\begin{aligned}
 dx &= a_1 \sin(El) & dy &= b_1 \cos(Az) \\
 &+ a_2 & &+ b_2 \sin(Az) \\
 &+ a_3 \cos(El) & &+ b_3 \\
 &+ b_1 \sin(Az) \sin(El) & &+ g_1 El \\
 &- b_2 \cos(Az) \sin(El) & &+ c_1 \cos(Az - El) \\
 &+ c_1 \sin(Az - El) & &- c_2 \sin(Az - El) \\
 &+ c_2 \cos(Az - El) & &+ d_2 \\
 &+ d_1 & & \\
 dAz &= dx / \cos(El) & dy &= dEl
 \end{aligned}$$

$dAz, dEl$  は天球面における望遠鏡の方位角、仰角誤差であり、 $dx, dy$  は天球の接平面における誤差、ここではそれぞれを方位角、仰角方向誤差と呼ぶことにする。また、各式の右辺における係数は機差パラメータと呼ばれ、望遠鏡の指向誤差の要因別に分けられたパラメータであり、駆動精度試験を様々な方位角 Az と仰角 El で行うことで、方位角誤差と仰角誤差を求め、その結果を最小二乗法などで上式に Fitting を行うことで、各機差パラメータを推定し、望遠鏡の指向誤差を補正する。また、各機差パラメータの説明は以下で示す。

## 機差パラメータ

- $a_1$  : Az軸, El軸の非直交性
- $a_2$  : Az軸と光学軸の非直交性
- $a_3$  : Az方向のエンコーダオフセット(ズレ)
- $b_1$  : 南北方向のAz軸の傾き
- $b_2$  : 東西方向のEl軸の傾き
- $b_3$  : El方向のエンコーダオフセット
- $g_1$  : 重力によるたわみ
- $d_1$  : 電波光学系とガイド光学望遠鏡のAz方向のオフセット
- $d_2$  : 電波光学系とガイド光学望遠鏡のEl方向のオフセット
- $c_1$  : 光学系の軸とホーン位置の東西方向のズレ
- $c_2$  : 光学系の軸とホーン位置の南北方向のズレ

$a_1$  : Az 軸と El 軸の非直交性

望遠鏡を動かす際に用いる Az 方向と El 方向の回転軸は、実際には正確に直交していないため、方位角方向にのみ望遠鏡を動かそうとしても、仰角方向にも動いてしまう。それを補正するために、Az 軸と El 軸の非直交性を表すパラメータを考える。以下に望遠鏡を正面から見たイメージ図を示す。

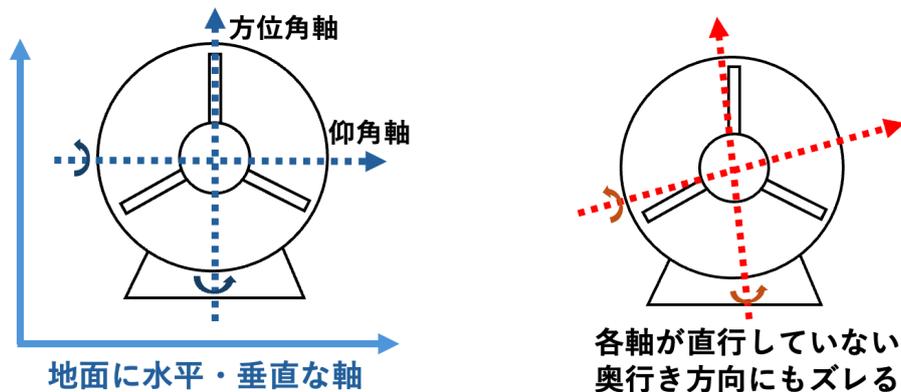


図 2.4 各回転軸が直行している場合と直行していない場合

$a_2$  : Az 軸と光学軸の非直交性

光学軸とは光学望遠鏡とカメラの方向の軸を表し、先述の通り実際にはカメラは El ボックスに取り付けているため、理想的には電波軸と光学軸は平行になるはずであるが、この設置時の誤差も考慮してこのパラメータを用いる。

$a_3$  : Az 方向のエンコーダのずれ

エンコーダとは座標を読み取る機械であり、その Az 方向の誤差を表す。

$b_1$  : 南北方向の Az 軸の傾き

Az 軸 (回転軸) が正常なときから、どのくらい傾いているかを表す。以下にイメージ図を示す。

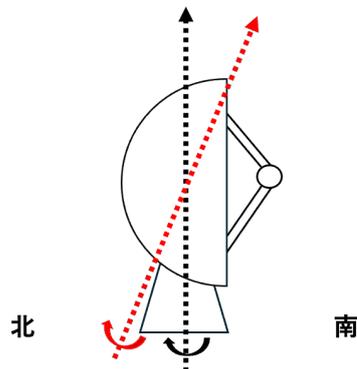


図 2.5 Az 軸の傾きのイメージ図

黒い線が理想的な Az 軸、赤い線が実際の傾いた Az 軸

$b_2$  : 東西方向の EI 軸の傾き  
 $b_1$  の東西の場合を表す。

$b_3$  : EI 方向のエンコーダのずれ  
 $a_3$  の EI 方向の場合を表す。

$g_1$  : 重力によるたわみ  
 アンテナは非常に重いため、自重によってわずかにでも変形してしまう。それによるずれを表す。

$c_1$  : 光学系とホーン位置の東西方向のずれ  
 光学系と電波を受信機へと導くホーンのずれを表す。以下にホーンのずれを表す図を示した。また、電波は簡略化のために実線で示す。

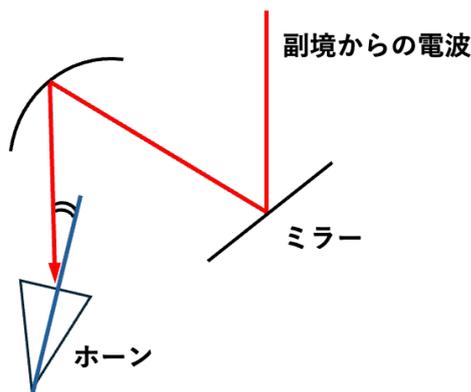


図 2.6 ホーンと光学系のずれを表す

$c_2$  : 光学系とホーン位置の南北方向のずれ  
 $c_1$  の南北方向の場合のずれを表す。

$d_1$  : 電波光学系とガイド光学望遠鏡の Az 方向オフセット

光学系の軸と光学望遠鏡の軸（光軸）の Az 方向のずれを表す。

$d_2$  : 電波光学系とガイド光学望遠鏡の Az 方向オフセット  
光学系の軸と光学望遠鏡の軸（光軸）の El 方向のずれを表す。

### 2.1.3 実験手順

はじめに光学ポインティングの観測を開始する手順から説明する。

1. カメラに取り付けた Raspberry Pi に接続  
Raspberry Pi IP : 192.168.100.43  
`ssh m1002raspi@192.168.100.43` でログイン  
RaspberryPi 内で `ros2 run necst ccd`
2. 制御 PC で光学ポインティングのソフトを起動  
制御 PC の IP アドレス : 192.168.100.191  
`necst optical_pointing -f "bsc5.dat" -l 1 -u 3`  
`-f "bsc5.dat"` で bsc5.dat のファイルにある天体リストを読み込む  
`-l 1 -u 3` で 1 等星から 3 等星を抽出する
3. 現時刻の空に昇っている天体の個数 (30~40 個程度) が表示され、y/n の入力が必要  
求められるため、y で観測を開始する

次に観測終了時のデータの解析方法について説明する。

4. 分光計制御 PC で jupyter notebook を起動  
分光計制御 PC の IP アドレス : 192.168.100.61
5. ディレクトリ移動
6. 解析ファイル内でセルの実行
  - (1) 使用するモジュールの import、関数の定義、データの読み込み
  - (2) 指向誤差の算出  
撮影した天体の画像から、画像中心と天体の輝度中心を求めることで、輝度重心が画像中心、つまり望遠鏡が向いている方向がどれほどずれているかを計算する。画像の 1 ピクセルは 3.84 秒角であることから、指向誤差を算出することが可能である。
  - (3) 天体と望遠鏡の間に雲がかかってしまったり、目標の天体の周りに明るい天体が存在したりして天体の写真が上手く撮影できていない画像は、画像から輝度重心を求める際に大きく外れることがあるため、そのような結果は除外する。  
図の中心に薄く赤色の十字が求めた輝度重心である。

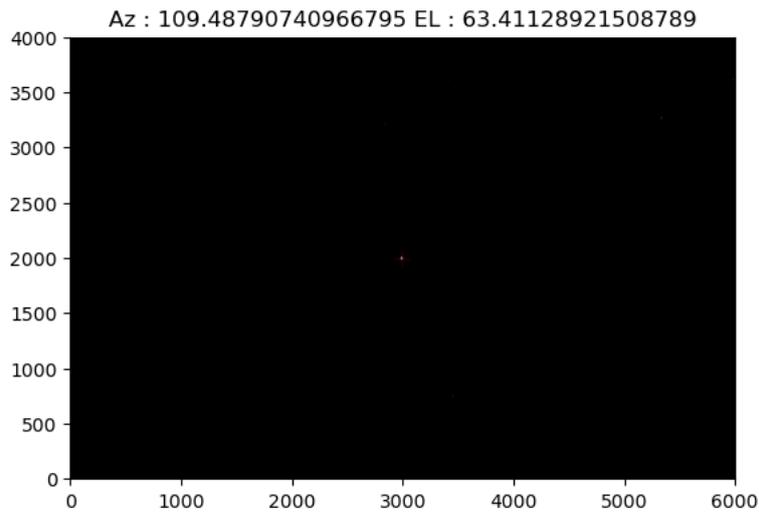


図 2.7 天体の輝度重心が上手く算出できている画像

### 2.1.4 結果と考察

2024年11月22日から29日にかけて光学ポインティングを行った。ここでは、最初に光学ポインティングを行ったときの結果と初回から補正を繰り返し行い最終的に得られた結果を紹介する。

下図は11月23日に光学ポインティングを行ったときのデータである。

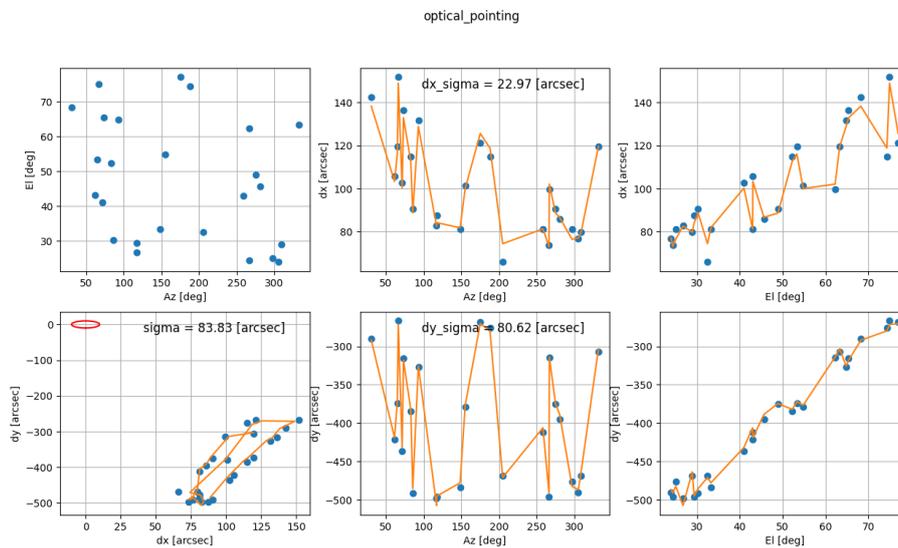


図 11月23日初回の光学ポインティングの結果

左上：撮影した天体の Az, El の値（指示値）

左下：撮影した天体の輝度重心と画像中心のずれ(赤い丸は目標値の 10 arcssec の範囲)

光学ポインティングのずれ（指向誤差）を表す

中央上下：x, y 方向の Az 依存性

右上下：x, y 方向の EI 依存性  
 黄色の実線：補正式にフィッティングした結果

図のように、指向誤差の標準偏差が 83.83 arcsec と非常に大きく、目標である 10 arcsec の範囲から明らかに離れてしまっている。これは、1 日前の 11 月 22 日に望遠鏡を雨風から守るためにブルーシートを被せる際に、主鏡などに干渉してしまうのが原因と考えられる。この作業はその日の光学ポインティングが終わるたびに行う作業であるため、次の日の光学ポインティングの結果が著しくずれる傾向があるが、数回の光学ポインティングで指向誤差を収束させることができた。

下図は最終的に指向誤差が収束し、得られた結果である。

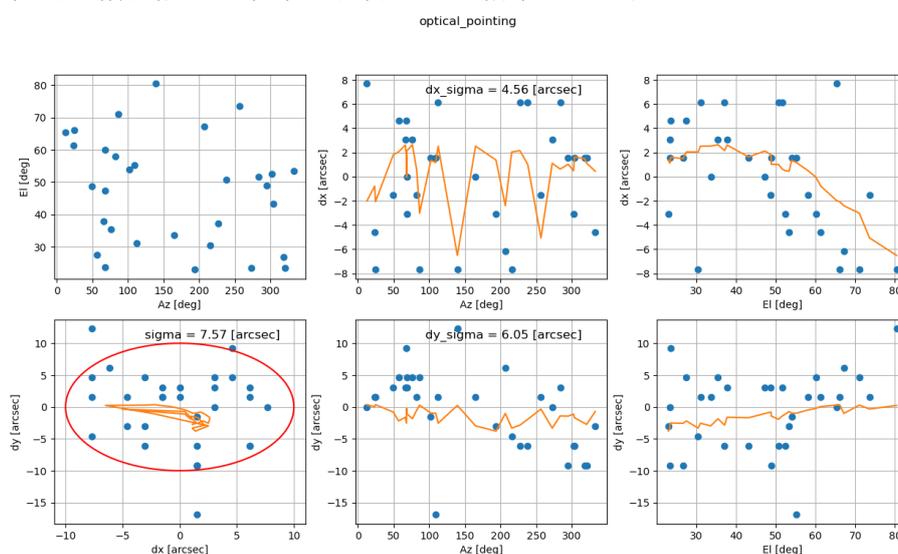


図 2.8 11 月 27 日光学ポインティングの結果

図のように、dy においては 10 arcsec を超えるずれが見られるが、dx に関してはすべて目標の範囲内に収まっている。全体として大きくずれていることもなく、多くの天体で 10 arcsec の範囲に収まりかつ、標準偏差も 7.57 arcsec と小さい値になったため、光学ポインティングは新システムでも問題なく動作し、指向誤差を補正することができた。

この最終的な結果における機差パラメータは以下の通りである。

機差パラメータ	値
a1	-0.01729789
a2	0.019932119
a3	2.423558432
b1	0.007318911
b2	-0.00469585
b3	-0.68560952
g1	0.000161356

図 2.9 光学ポインティング終了時の機差パラメータ

## 2.2 太陽スキャン

光学ポインティングではカメラを用いた光で行う観測だったため、Az, El 軸やエンコーダが要因となるような機械的な誤差に対して補正することしかできていなかった。そのため、電波を用いて試験を行うことで実際に電波の通る光学系における誤差に対して補正を行う。

### 2.2.1 概略

太陽スキャンでどのように指向誤差を補正するか説明する。

先述の通り、光学ポインティングのように明るく輝く点源のような天体は、電波においては少ないため、電波によるポインティングは太陽をスキャンし、端（エッジ）を検出することで、望遠鏡の指向誤差の補正を行う。

最初に太陽中心を設定し、端から端までスキャンするように観測を行う。この太陽のスキャンは Az 方向と El 方向の 2 回ずつ観測を行う。

そして、この観測で得られたデータの各周波数の強度を周波数方向に積分した電波強度（Total Power）を計算する、アンテナの受信する範囲が太陽の端から中心に進むにつれ、電波強度は強くなっていき、受信する範囲が完全に太陽の中に入ると一定の強度となる、最終的にもう一方の端に近づくと、アンテナの受信範囲が太陽から出ていくため強度は弱くなっていく。

この電波強度を微分したものを微分強度と呼び、最初のアンテナが太陽に入っていくときには微分強度は大きくなり、アンテナの受信範囲の半分ほどに太陽が入っている状態から、電波強度はなだらかに強くなっていく、そして完全に太陽に入ると微分強度は 0 に近づき、太陽から出ていくときは入っていくときと逆となる。したがって、微分強度を計算すると正と負の 2 つの山が現れることになる。

この微分強度に対してガウシアンフィットを行い、それぞれのガウシアンの中点が太陽をスキャン観測することで得られた太陽のエッジとみなすことができる。したがって、この 2 つの中心から太陽の中心を求めることができ、この観測で得られた太陽中心が最初に設定した太陽中心とどこでどのくらいずれるかを求めることで、望遠鏡の指向誤差を算出することが可能となる。

### 2.2.2 実験の手順

実際に太陽スキャンを行う上での手順を説明する

1. 太陽スキャンにおける指示が書かれているファイルのあるディレクトリ（今回はホームディレクトリ）において以下のコマンドを入力する。

```
necst radio_pointing -f "suncan.toml"
```

-f “suncan.toml” : sunscan.toml という指示書を読み込む

指示書に書かれた内容の回数などで観測が行われる。

2. 観測データは野辺山現地にある分光計制御 PC に保存されるため、太陽スキャンの解析ファイルのある、大阪公立大学の PC にデータはダウンロードする。
- 3 以下で解析ファイルの jupyter notebook の手順について説明する
  - (1) 観測データの読み込み、フォルダの指定、解析で用いる関数の定義。
  - (2) Total Power の plot、微分強度の算出、ガウシアンフィットを行う。
  - (3) 正しく太陽を観測できているか、ガウシアンフィットが問題なく行えているかを確認する。以下は良い結果と悪い結果の例である。

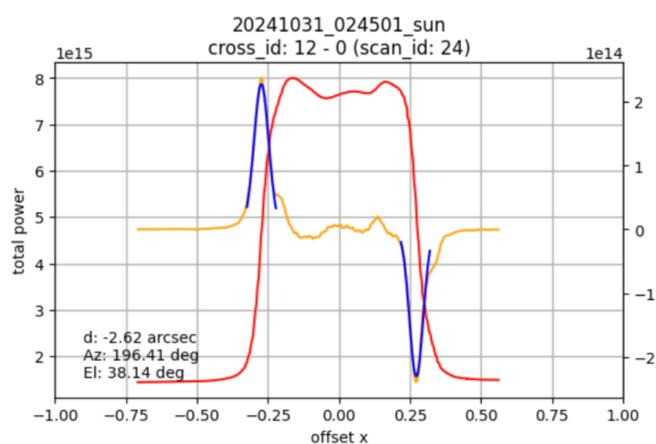


図 2.10 良い結果の例

横軸は太陽中心からのずれ、左の縦軸が電波強度、右が微分強度  
赤い線が電波強度、黄色の線が微分強度、青い線がガウシアンフィットの結果  
左下の数字は上から太陽中心のずれ、観測したときの Az, El の値

良い結果では、まず太陽のエッジにおいて電波強度が増減し、全体の電波強度が綺麗な台形になっていることと、その微分強度が正しくガウシアンフィットされている。

以下では悪い結果を示す。

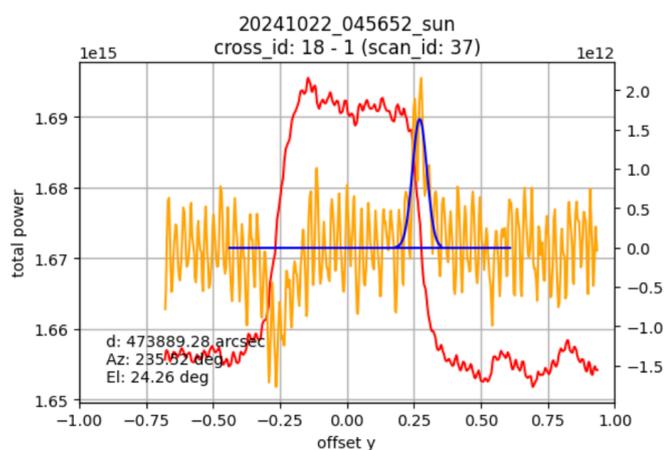


図 2.11 悪い結果の例

悪い結果となる一番の要因は、悪天候などの理由で太陽の電波強度が弱くなってしまっていることである。この電波強度が弱くなると、図のようにガウシアンフィットが正しく計算できていないため、このような結果は除外して解析を進めることにする。

- (4) (3)の良い結果から、指向誤差にあたる太陽中心の誤差が求まるので、それを補正する。

## 2.2.3 結果と考察

今回の太陽スキャンの目的は、主に光学ポインティングで用いた光軸と実際の観測で用いる電波軸の誤差の補正と、光学系内で生じるずれの補正であるため、示す結果はこれらを補正する前の機差パラメータを用いたデータ、つまり光学ポインティングで最終的に得られた機差パラメータで太陽スキャンを行った結果と、その後に該当のパラメータを更新して試験を行った結果である。

以下は光学ポインティング後の最初の結果である。

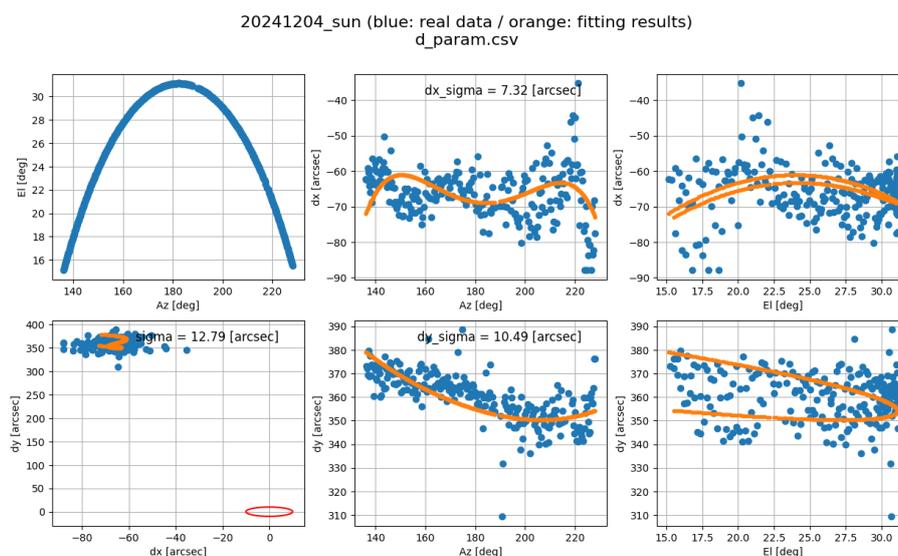


図 2.12 太陽スキャン初回の結果

図が表すものはすべて光学ポインティングと同じ

光学ポインティングでは、最終的に指向誤差を補正することができていたが、電波で行うと始めに示したものが原因となり、指向誤差が顕著に現れている。しかし、光学ポインティングである程度補正したため、各誤差の幅は大きくはなっていないことが分かる。

次に示すのは、初回の太陽スキャンから得られた電波に関する機差パラメータを追加して試験を行った結果である。

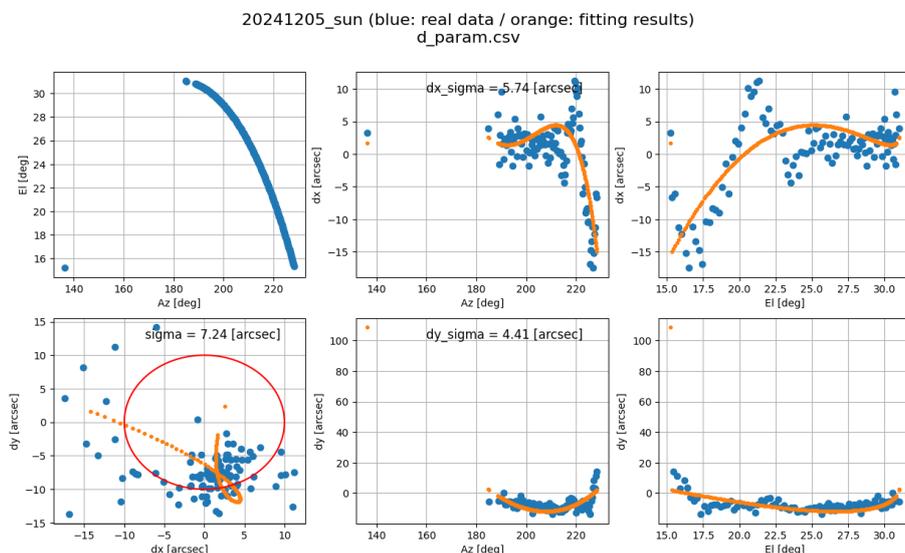


図 2.13 太陽スキャンの 2 回目の結果

太陽スキャンによる補正の結果、1 回目の光学ポインティング直後の結果に比べて多くの回で 10 arcsec の範囲内に収まった、また指向誤差の標準偏差も 12.79 から 7.24 arcsec まで収めることができた。10 arcsec の範囲に入っていないものに関しては、Az が大きく El が小さいとき、つまり太陽が沈む位置で dx, dy が大きくなってしまっている。しかし、顕著に大きくずれていないため許容範囲とした。

このときの機差パラメータの追加は以下の通りで、それ以外は光学ポインティング最終回の機差パラメータと同じである。

機差パラメータ	値
d1	-0.01839866
d2	0.100021248

図 2.14 太陽スキャン後のパラメータ

## 第 2 章 制御システムの開発

### 3.1 ROS2 (Robot Operating System 2)

#### 3.1.1 ROS の概要

ROS とはオープンソースのロボットソフトウェア開発フレームワークであり、デバイス制御、通信などのロボットを制御するための機能を提供している。ROS1 では安全性やリアルタイム性などの観点から、実際のロボット制御に対する要求を満たしていなかった。そこで、後継バージョンである ROS2 が開発され、安全性の高い通信やリアルタイム性が向上した。

#### 3.1.2 ROS2 の特徴

ROS1 の通信には TCP (Transmission Control Protocol) が使用されていたが、この方式はデータの送信に成功するまで通信を繰り返されるため、ネットワーク障害が発生すると次のデータを送信することができず、制御のリアルタイム性を保証することが難しかった。また、各ノードに対して 1 対 1 の通信を行うため、データを受け取るが多くなるとそれに伴って通信量も多くなってしまっていた。

ROS2 の通信では UDP (User Datagram Protocol) が使用され、この方式ではデータの通信に失敗した場合でも次のデータを送信することができ、リアルタイムにデータを転送することを得意とする。また、1 対多の通信が可能になりデータを受け取る側が複数存在する場合にもデータの転送量の減少が期待される。

#### 3.1.3 ROS の詳細

以下で ROS に関する用語の説明をする。

##### ・ノード (node)

ROS では最小のプログラムの単位をノード (node) 呼ぶ。各ノードは後述する Topic 通信、Service 通信などの通信方法を使って、ノード間でデータのやり取りを行う。

##### ・トピック (topic)

ROS での基本的なデータ通信の経路をトピック (topic) と呼ぶ。ノードはメッセージをトピックへ向けて配信 (publish) し、また購読 (subscribe) することでノード間での情報の共有が可能になる。配信を行うノードを publisher、購読を行うノードを subscriber と呼ぶ。トピックには名前が付いていて、同じトピックに複数のノードがデータを送る、受け取ることが可能である。

- ・ Topic 通信

Topic 通信は Topic を用いた通信方式で、一对多の非同期通信を行うモデルであり、publisher は subscriber 側の変更に影響を受けないため、システムの変更に柔軟で拡張性に優れている特徴がある。しかし、非同期通信のため高いリアルタイム性が求められるシステムには向かない。

- ・ メッセージ (message)

トピックへ配信したり、購読したりするときのデータの型をメッセージ (message) と呼びます。メッセージの型は msg ファイルに記述されていて、使用するプログラミング言語によらないデータ形式になっている。

実際に望遠鏡を制御する PC で管理にしている msg フォルダには、望遠鏡の向いている座標、装置や機械の出力値ははじめとする多数の msg が管理され、通信を行っている。

## 3.2 機能実装

天体からの電波信号がアンテナから受信機を経由して、分光計から得られる電波強度を数値として記録する分光データの容量は非常に大きい。標準で分光データは、0.1 秒間隔で 32768 個のスペクトルチャンネルで保存されるようになっている。また現在、1.85m 電波望遠鏡では 3 つのボードを使用して、同時に 3 つの分光データを保存している。例えば、10 分間観測したときのボード 3 つで、分光データには  $6000 \times 32768 \times 3$  の計算から、約 6 億個の数値が記録される。また、この数値データには float32 型を採用しているため、1 個の数値データの容量は 4 B (バイト) となる、結果的に 10 分間の分光データの容量は約 2.4 GB となる。分光データは分光計制御 PC 内に保存され、解析など行う際は大阪公立大学内の PC にデータを移行する方法を取っている。

今回は、従来のシステムにおいて、全ての試験や測定において分光データをそのまま記録していたという仕様から、目的に応じて分光データを保存しない機能と周波数方向に積分する処理を加えたデータ (Total Power) を保存する機能の 2 つの追加機能を開発した。以下に今回開発した追加機能の概略図を示す。

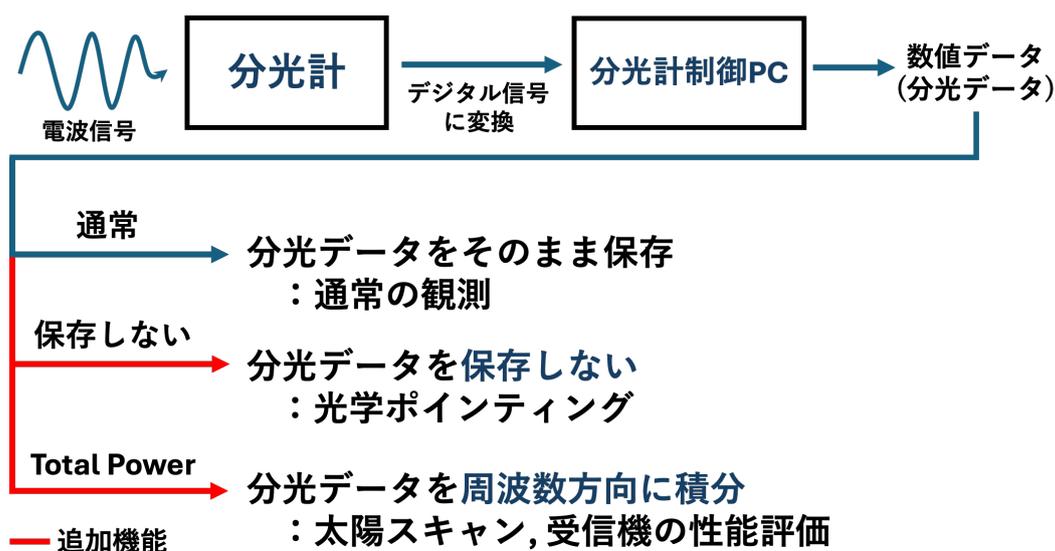


図 3.1 追加機能の概略図

### 3.2.1 分光データを保存しない機能

今回は、分光データを必要としない光学ポインティングや受信機の出力を測定する試験において、標準で分光データを保存しない機能を追加した。

今回行った光学ポインティングは電波信号を必要としない、つまり分光データを使わない試験である。しかし、従来のシステムでは光学ポインティングの試験中でも、必要としない分光データを保存し続けていた。そのため、PC内の容量を上限まで使用してしまうと、OSの不具合やデータ損失などの引き起こす可能性が高くなる。

この機能の実装により、記録するデータの容量を大幅に削減し、PCへの負荷やデータ移行の早さが改善した。

#### ・プログラムについて

トピック名とメッセージの型を決めるフォルダ `necst-msg/msg` 中の `Sampling.msg` に以下のように編集を行った。

```
int32 nth      # Take every nth data, dropping others.
bool save      # If ``true``, spectral data will be saved.
float64 time   # Timestamp.
```

2行目に `save` という `bool` 型の Topic を新たに定義し、`True` ならば分光データを保存し、`False` なら保存しないとした。この Topic は分光データを記録するファイルである `necst/necst/rx/spectromer.py` で `Subscribe` されることで `save` の値によって、分光データの保存を変える処理を加えた。

#### ・実際の操作

例として、今回の試験の1つである光学ポインティングにおける操作を説明する。以下がそのコマンドである。

```
necst radio_pointing -f "suncan.toml" -save_spec
```

`-save_spec` というオプションを追加することで、Topicの `save` が `False` となり分光データを保存しないようになる。

### 3.2.2 Total Power モード

先述の通り太陽スキャンでは、分光データを周波数方向に積分した Total Power を解析に使用する。

今回は、分光データをそのまま記録する前に、分光計制御 PC で分光データを任意の周波数の範囲を取り出し、Total Power を算出したデータを分光データとして記録する機能を開発した。

この機能により、記録する前に Total Power を計算することや周波数の範囲指定を行えるようになったため、分光データの容量削減が可能になった。

同様に Total Power モードでもプログラムや操作例について説明する。

#### ・プログラムについて

まず、新たな Topic を定義するため、necst-msg/msg の中に TPModeMsg.msg というファイルを以下の内容で追加した。

```
bool tp_mode # If ``true``, Total power will be saved.
int32[] tp_range # total power in a specific channel range
float64 time # Timestamp.
```

tp\_mode : bool 型の Topic で True なら Total Power モードとなり、False なら通常の分光データを記録する。

tp\_range : int32 型のリスト構造の Topic で、Total Power の計算する範囲を表す。

#### ・実際の操作

例として、今回の試験の 1 つである太陽スキャンにおけるコマンドにおいて説明する。

```
necst radio_pointing -f "suncan.toml" -tp
```

-tp というオプションを加えることで、Topic の tp\_mode が True となり全範囲の周波数方向で積分したデータが記録される。

また、積分範囲を指定する場合は以下のようなになる。

```
necst radio_pointing -f "suncan.toml" -tp_range 1 100 300 500
```

-tp\_range というオプションの引数を指定することで、tp\_mode が True となった上で、この場合は 1~100 ch と 300~500 ch の 2 つの範囲で積分される。また、指定する範囲の数は任意である。

## 第4章 まとめと今後

ROS2 を用いた新たな望遠鏡の制御システムを搭載した 1.85m 電波望遠鏡において、駆動精度試験の光学ポインティングと太陽スキャンを行い、望遠鏡の指向誤差を分解能の 10 分の 1 程度まで補正することができた。また、この試験の最中に制御システムによる問題はなく、新たな制御システムにおいても問題なく動作することが確認できた。

また、望遠鏡制御システムである NECST の追加機能の、分光データを保存しない機能と Total Power を保存する機能を開発し、前者は今回行った光学ポインティングの際に 1.85m 電波望遠鏡のシステムに搭載でき、実際に動作し容量の削減を確認することができた。後者の Total Power の機能では従来はそのままの分光データを記録していたが、Total Power を計算したデータを記録することで、容量の削減に伴うデータ移行の容易さの向上が期待される。

今回行った太陽スキャンでは、太陽の観測する際の望遠鏡の駆動スピードは常に一定であったが、望遠鏡の駆動スピードを速くしたり、駆動の方向を変えたりすると、それに伴う指向誤差が確認された。

今後は上記のような問題を解決し、さらに 1.85m 電波望遠鏡の詳しい性能評価を行った後に、試験観測や科学的観測に繋がられるような準備をする予定である。

## 第 5 章 参考文献

- [1] 中井直正、坪井昌人、福井康雄 (2009)  
“宇宙の観測 II—電波天文学” (シリーズ現代の天文学 16 巻[第 2 版])  
日本評論社
  
- [2] 西村淳  
“1.85m 電波望遠鏡観測システムの開発と望遠鏡性能評価”  
大阪府立大学 大学院理学系研究科 物理科学専攻 2010 年度修士論文
  
- [3] 國實真人  
“1.85m 電波望遠鏡のビーム伝送系と評価システムの開発”  
大阪府立大学 理学部 物理科学科 宇宙物理学研究室 2008 年度卒業論文
  
- [4] 松本健  
“チリ、アタカマでのリモート観測に対応した 1.85m 電波望遠鏡の制御システムの開発”  
大阪府立大学 理学部 物理学科 宇宙物理研究室 2019 年度卒業論文
  
- [5] 西川薫  
“太陽観測で得られるビームパターンの考察、ドップラートラッキングモジュールの開発及び ROS2 を用いた望遠鏡制御ソフトウェアの開発に向けた検討”  
名古屋大学 理学部 物理学科 天体物理学研究室 2020 年度卒業論文
  
- [6] 中川凌  
“マルチビーム受信機用電波望遠鏡制御システムの開発”  
大阪府立大学 生命環境科学域 理学類 物理科学課程 宇宙物理学研究室  
2022 年度卒業論文

## 第6章 謝辞

本研究を進めるにあたり、電波天文学研究室の小川英夫客員教授、大西利和教授、村岡和幸准教授、前澤裕之准教授には天文学に関する知識のみならず、資料の作成や発表の仕方などの指導もいただきました。また、澤田聡子研究員には光学ポインティングの出張の際にサポートしていただきました。

博士後期課程3年松本健さんには Python や 1.85m 電波望遠鏡について学ばせていただきました、また研究内容をはじめとする様々な相談に乗っていただきました。博士後期課程2年小西亜侑さんには 1.85m 電波望遠鏡の制御でお世話になりました、また日常の研究室生活でも常に明るく接していただき、新しく研究室に配属となった私たち学部4年生を快く歓迎してくださりました。博士前期課程2年中川凌さんには解析や制御系に関する多くの知識を教えてくださいました、また野辺山出張の際も様々なことを丁寧に教えてくださいました。

また、NECST の開発に携わらせていただき、名古屋大学の方々にも大変お世話になりました。立原研悟准教授には望遠鏡の制御や試験などについて助言を頂きました。山田麟さんの大阪府立大学や名古屋大学で制御系の紹介で関心を持ち、この研究をしたいと感じました。出町史夏さんには機能開発の方法を初歩から丁寧に教えてください、常に気にかけてくださり相談などをしていただきました。石川竜巳さんには 1.85m 電波望遠鏡の制御について助言や相談を快くしていただきました。高山楓菜さん、伊藤拓冬さんには光学ポインティングの出張に帯同して補助していただきました、初めての長期の出張でしたがとても思い出に残る経験でした。

同期の角越仰くん、藤本湧大くん、宮崎正成くん、山下晃矢くん、山本美咲さんのおかげで研究室生活が楽しく実りのあるものになり、また皆それぞれ研究内容が異なるため各々の研究を聞いているときは楽しかったです。大学院でもお互い切磋琢磨できたら嬉しいです。

また、大学生活の4年間のみならず今現在も支えてくれる両親に感謝申し上げます。

最後になりましたが、今回の研究や研究生活において少しでも関わっていただいたすべての方々に感謝を申し上げます。ありがとうございました。