

ガンマ線バースト残光望遠鏡用解析パイプライン
の開発

下川辺隆史

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

2005年 3月

要旨

ガンマ線バーストは、数十億光年ないし百数十億光年の遠方で発生する、宇宙最大の爆発現象である。ガンマ線バーストそのものは、人工衛星を用いないと観測することができないが、爆発の後に急速に減光する可視光の残光を伴う。我々は、この残光を地上の望遠鏡を用いて観測することによって、バースト源の距離、バーストの発生機構などバースト自身の謎に迫るとともに、さらには、ガンマ線バーストが遠方で発生することを利用して、これを強烈な光源とし用い、前人未到の原始宇宙を探索しようとして計画している。

時間の経過とともに急激な減光を示すガンマ線バーストの残光を捕らえるためには、衛星による位置速報に瞬時に対応して観測を開始するシステムが必要となる。明野望遠鏡では、バースト直後に無人で対応できるよう、これらの一連の動作を全て自動化する準備を行っている。

本研究では、その一環として、天体画像を自動的に解析しガンマ線バーストを自動検出するパイプラインの開発を行った。

天体画像に対する世界座標 WCS(World Coordinate System) の書き込みでは、天体画像と参照元のカタログが最もマッチングする座標を数分角の範囲でサーチすることで、4分角程度の望遠鏡の導入精度の範囲で、精度よく WCS の書き込みを行うことができるようになった。WCS の書き込み精度は、0.6arcsec 程度まで達成することができた。

天体画像からの未同定天体の検出では、天体検出のために画像に対して行うスムージングを複数のフィルターを用いたり、また、天体ではなく誤認する点を逆に検出し、その点をあらかじめ取り除いたりすることによって、誤認をなくすとともに、より多くの天体を検出することに成功した。

目次

第1章	はじめに	3
1.1	ガンマ線バースト	3
1.2	ガンマ線バーストの残光	4
1.3	明野望遠鏡	4
第2章	実験および結果	7
2.1	解析パイプラインの概要	7
2.2	開発環境	8
2.2.1	ハードウェア環境	8
2.2.2	ソフトウェア環境およびパイプライン開発に使用したソフトウェア	8
2.2.3	パイプライン開発に用いた画像ファイル	9
2.3	高精度に WCS を決定する方法を開発するための実験	10
2.3.1	参照天体数 $n_{extract}$ および高精度の書き込み処理の有無と WCS の精度	14
2.3.2	カタログで参照する等級範囲	15
2.3.3	画像中心の赤経赤緯が正確に与えられなかった場合の対応	19
2.4	未同定天体を検出する方法の開発のための実験	20
2.4.1	誤認点の座標に関する依存性	22
2.4.2	恒星のみの検出	24
2.4.3	スムージングに用いるフィルターと天体の検出数の差異	25
2.4.4	2.4.1-2.4.3 までの結果と課題	29
2.4.5	誤認点の検出	30
第3章	実験結果の議論および開発方針	33
3.1	WCS の書き込みに関する実験に関する考察	33
3.1.1	WCS の決定精度 n_{match}/n_{star} と 2.3.1 の考察	33
3.1.2	カタログで参照する等級範囲の決定	34

3.1.3	高精度の書き込み処理の有無の決定	34
3.1.4	望遠鏡の導入精度への対応	35
3.1.5	$n_{extract}$ と許容誤差 t の決定	39
3.1.6	座標に依存した誤認点の除去	40
3.2	未同定天体の検出	40
3.2.1	2.4.1 の結果について	40
3.2.2	SExtractor で用いるフィルターの決定	41
3.2.3	2.4.1-2.4.5 の結果について	44
第 4 章	まとめと今後の課題	47
4.1	WCS の書き込みについて	47
4.2	未同定天体の検出について	49
付 録 A	SExtractor の使い方	52

第1章 はじめに

1.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (GRB) とは、宇宙のある一点から 50keV から 300keV のエネルギーを持つガンマ線が爆発的に放射される現象である。バーストの継続時間は平均的には数秒から数十秒程度であるが、そのフラックスは毎秒 1cm^2 あたり 100 カウント以上にもなる場合もあり、全天で最も明るいガンマ線源となる。

この現象は、1960年代に地上での核実験を監視するために打ち上げられたアメリカの軍事衛星ヴェラによって偶然発見された (Klebsadel, Strong & Olson 1973)。1991年に打ち上げられたコンプトンガンマ線天文台 (CGRO) の BATSE (Burst And Transient Experiment) 検出器は 3000 発近いガンマ線バーストを観測しており、発生頻度が全天で 1日1回程度であること、バーストの発生位置が全天球上に等方的に分布していることを明らかにした (Meegan et al. 1992)。

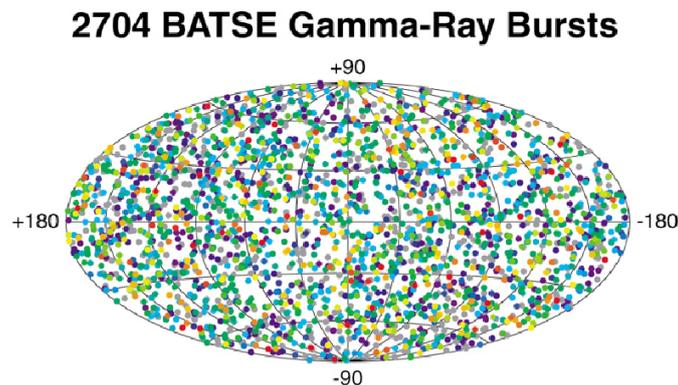


図 1.1: BATSE 検出器によるガンマ線バーストの天球分布図

1.2 ガンマ線バーストの残光

1997年に打ち上げられたイタリア・オランダのX線/ガンマ線天文衛星 BeppoSAX は、搭載したX線望遠鏡によってガンマ線バーストの発生後数日にわたって継続するX線放射、すなわち「残光」を初めて観測した (Costa et al. 1997)。このX線対応天体の発見は、さらに地上望遠鏡による可視光域での残光発見にもつながった (van Paradijs et al. 1997; 図 1.2)。BeppoSAX によってX線対応天体の発見された半年後に、ハッブル宇宙望遠鏡によって GRB970228 の観測が行われ、バーストの残光のあった領域に淡く広がった銀河が発見された。残光の位置はこの銀河の中心とはずれており、ガンマ線バーストが活動銀河核起源ではなく銀河に付随する星の爆発現象であると考えられるようになった。それまで、ガンマ線バーストが我々の銀河系内で起こっているのかそれとも系外で起こっているのかが大きな議論を巻き起こしていたが、これらの観測によりこの爆発現象は遙か数十から数百億光年かなたの銀河の中で起こっていることが分かった。ガンマ線バーストは、銀河形成、星形成が活発に行われていた太古の宇宙を探る貴重な現象なのである。

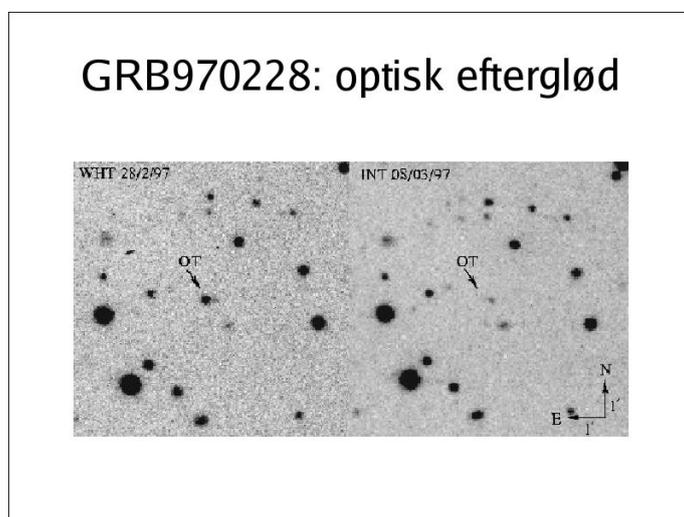


図 1.2: GRB970228 の可視光残光の観測 (van Paradijs et al. 1997)

1.3 明野望遠鏡

ガンマ線バーストは、いつ、どこで発生するか予測ができない上に、非常に短い時間スケールで起こる爆発現象であるため、その観測は難しい。

近年、ガンマ線バーストの理解が飛躍的に進んだ背景には、ガンマ線バーストの即時位

置決めと、全世界への位置速報の配信を行ってきた、HETE-2 衛星の開発とそのネットワークの構築、そしてこれに瞬時に対応する地上観測システムの構築というものがある。バーストの本体であるプロンプト放射が数秒から数十秒と非常に短い現象であるのに対して、急速に減光するとはいえ、X線および可視光の残光は長いものでは数日間に渡って観測が可能である。このため残光の観測がバーストの発生メカニズムを探る上で非常に重要となっている。

東京大学宇宙線研究所(山梨県明野)に設置された明野50cm望遠鏡は、このような、HETE-2衛星やSwift衛星によるガンマ線バーストの位置速報に瞬時に対応し、ガンマ線バーストの可視光残光を観測する地上観測システムである。この望遠鏡では、これまでよりも数多くのガンマ線バーストを多色で同時に観測し、バースト本体や残光の放射メカニズムの解明を行う。さらには、高赤方偏移のバースト残光の観測から、それを光源として宇宙進化の歴史を探ることを目標としている。

現在、明野望遠鏡では、バースト直後に無人で観測を開始できるよう、ガンマ線バーストの測光までの一連の動作を全て自動化する準備を行っている。

本研究では、ガンマ線バースト発生直後から測光を開始するために、撮像した天体画像を自動的に解析しガンマ線バーストを自動的に検出し、その位置を特定するパイプラインの開発を行った。

明野望遠鏡によるガンマ線バーストの位置の特定によって、明野望遠鏡自身による測光が可能だけでなく、その他の大型望遠鏡に対し数秒角程度の精度で位置速報を出すことができる。このような精度のよい位置速報が必要な理由は、衛星からの位置速報が数十分角程度の精度であり、大型望遠鏡では衛星からの速報だけでは望遠鏡をバーストに向けることができないためである。このため、本研究で開発したパイプラインを利用してバーストの位置を特定し、バースト発生直後に精度の良い位置速報を出すことによって、即座に大型望遠鏡による観測を開始し、ガンマ線バースト発生直後のバースト自身の物理の解明につなげることができると考えている。

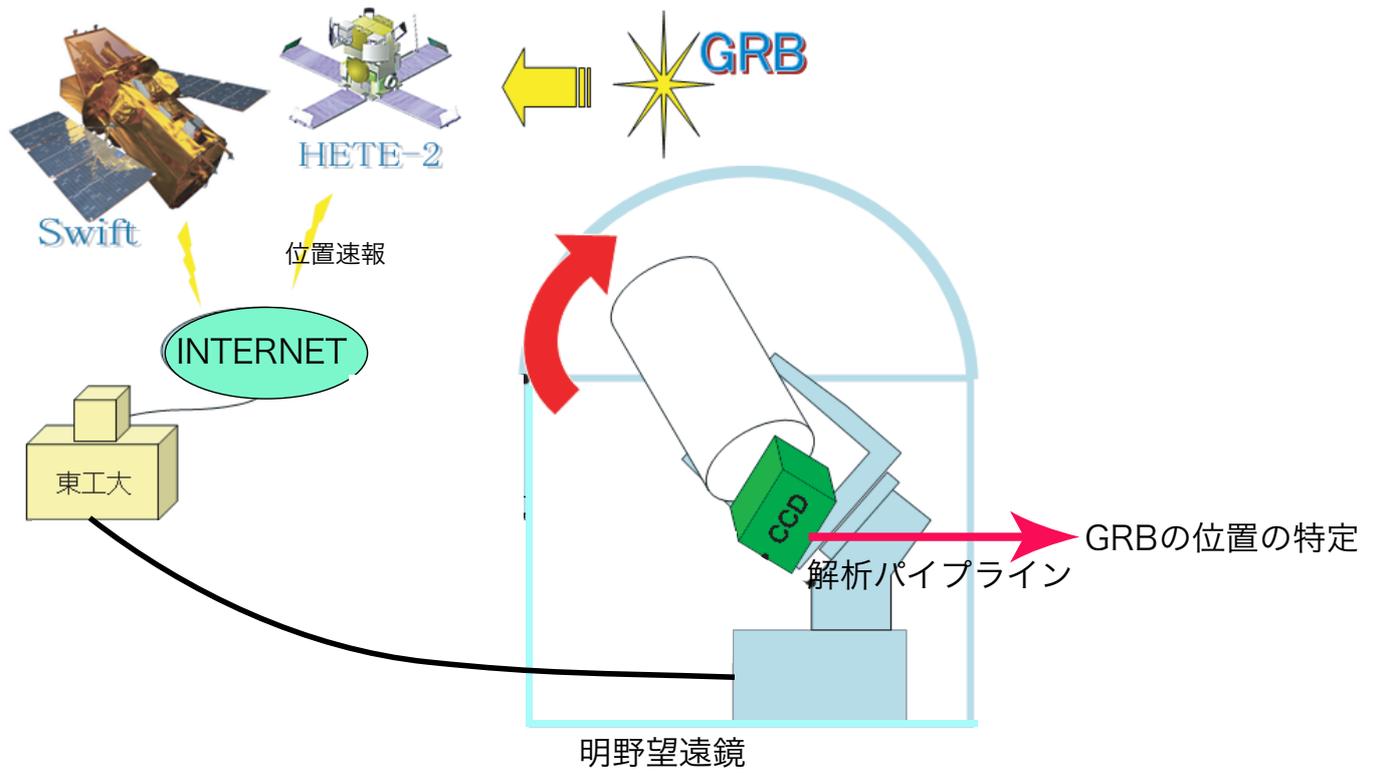


図 1.3: 明野望遠鏡システム概略

第2章 実験および結果

2.1 解析パイプラインの概要

ガンマ線バースト観測望遠鏡用パイプラインの概要について説明する。パイプラインは大きく分けて次の4つの処理が必要となる。

1. CCDカメラからの天体画像に対しダークフレーム、フラットフィールドを用いてリダクションを行う
2. リダクションを行った画像ファイルに対して世界座標 WCS(World Coordinate System) を決定する
3. WCS が決定した画像ファイルから全ての天体を抽出し、これと天体カタログとを比較しガンマ線バーストを検出し、位置を特定する
4. 特定したガンマ線バーストに対して測光を行う

ここで、上の処理の過程で出てきた用語について説明する。

- ・ダークフレーム：CCDカメラのシャッターを閉じた状態で適当な時間積分して得られたフレーム。天体画像データから CCDカメラの暗電流成分を除去するために用いる。
- ・フラットフィールド：CCDカメラに一樣な光を当てて得たフレーム。CCDの各ピクセルの感度が一つ一つ異なるため、それを補正するために用いる。
- ・リダクション：CCDカメラから得た天体画像に対し、ダークフレームを引き、フラットフィールドで割ることで、周辺減光やピクセルごとの感度むらを補正すること。
- ・WCS：画像のピクセル座標 (x, y) に対応づけられた天球の赤経、赤緯 (α, δ) 。すなわち、WCSを決定するとは、画像のピクセル座標 (x, y) と天球の赤経、赤緯 (α, δ) を対応づけることをいう。

本論文では、2. リダクションを行った画像ファイルに精度よく WCS を決定する方法の開発、および 3. 画像ファイルから正確に天体のみを検出し未同定天体の特定を行う方法の開発について説明する。

2.2 開発環境

解析パイプラインの開発にあたって使用したハードウェア環境、ソフトウェア環境についてまとめる。本研究で行った実験は、すべて以下の環境で行っている。

2.2.1 ハードウェア環境

- CPU:Celeron D 330 (2.66GHz)
- メモリー:256MB

2.2.2 ソフトウェア環境およびパイプライン開発に使用したソフトウェア

- OS:Vine Linux 2.6 あるいは Vine Linux 3.1 (途中でバージョンアップを行っている)
- スクリプト作成言語:Perl v5.8.2
WCS の決定、未同定天体の検出で行う一連の処理をスクリプト化するために使用した言語。
- SExtractor 2.3.2(2003-12-03)
fits ファイル形式の天体画像から天体を抽出し、各々の天体に関する、ピクセルの xy 座標、WCS、その相対的な等級をテキスト形式のリストにすることができるソフトウェア。
- Wcstools 3.5.2
fits ファイル形式の画像ファイルに対して WCS の情報操作を行うことができるソフトウェアパッケージ。
 - imwcs
fits ファイル形式の天体画像に対して、画像に写っている天体のピクセルの xy 座標と相対的な等級をもとに WCS を決定することができるソフトウェア。初期条件として、画像の中心座標の赤経赤緯、画像の 1pixel あたりの arcsec を与える必要がある。
 - scat
ある赤経赤緯を与えると、カタログを検索し与えられた赤経赤緯に天体がある

かどうか調べるソフトウェア。未同定天体の検出の処理の中で、画像ファイルから天体を検出し、既存のカタログと比較し照合を行う際に用いる。

– imrot

fits 形式の画像ファイルを回転、反転することができるソフトウェア。明野望遠鏡で撮影された画像が表裏逆となるため、その修正に使用する。

- ds9

fits ファイル形式の天体画像を表示することができるビューワー。本論文に掲載している天体画像ファイルはこのビューワーを利用し表示したものである。

- USNO-A 2.0

WCS を決定する際に、天体の照合に使用したカタログ。21 等級までの 526,280,881 個の天体の位置と等級が掲載されている。明野望遠鏡の限界等級が 20 等級であるため、このカタログとの比較で未同定天体を検出可能。

2.2.3 パイプライン開発に用いた画像ファイル

- 開発する際に使用した画像

- 撮影器機：明野 50cm 望遠鏡
- 撮影時期：2004 年 12 月 14 日
- 露光時間：30 秒
- 視野：約 28 分角 × 28 分角
- 画像サイズ：1024pixel × 1024pixel
- 画像形式：fits ファイル

各画像ファイルの中心座標の赤経赤緯は表 2.1 の通りである。特に、これらの画像は、画像にある天体数および赤緯が偏らないように選択し用いている。これは、極付近の画像は赤道付近に比べて、回転の影響を受けやすいと考えたためであり、このような画像に対しても WCS を決定できる必要があるためである。

実際のパイプラインの運用段階では、画像中心の赤経赤緯は望遠鏡から与えられることとなっているが、今回の実験では望遠鏡側の準備ができていなかったため、望遠鏡からの

値ではない。図 2.1 と同様のプロセスで一度画像に WCS を書き込み、その WCS をもとに画像の中心座標 $(x, y) = (512, 512)$ にあたる赤経赤緯の値を計算し、その値を画像中心の赤経赤緯として用いている。表 2.1 の画像中心の赤経、赤緯の値が計算して求めた値である。

画像ファイル	天体の個数	画像中心の赤経	画像中心の赤緯
f_pointing-001R.fit	572	07:14:48.582	+88:01:31.59
f_pointing-023R.fit	359	11:59:22.989	+39:50:22.64
f_pointing-044R.fit	426	09:59:19.011	+39:57:39.44
f_pointing-053R.fit	512	08:59:15.090	+40:01:43.02
f_pointing-057R.fit	703	08:58:01.644	-00:00:06.63
f_pointing-061R.fit	2288	07:57:26.151	-30:00:20.11
f_pointing-063R.fit	1920	07:57:57.993	-09:59:13.52
f_pointing-071R.fit	657	08:01:02.258	+70:03:11.96
f_pointing-077R.fit	1223	06:58:58.595	+40:02:34.91
f_pointing-083R.fit	2193	06:58:03.846	-19:59:47.02
f_pointing-087R.fit	743	05:58:24.097	-10:01:48.84
f_pointing-090R.fit	1964	05:58:40.776	+19:59:07.87
f_pointing-091R.fit	3101	05:58:46.477	+29:59:21.08
f_pointing-098R.fit	1325	04:58:52.784	+69:57:47.89
f_pointing-108R.fit	440	03:58:40.791	+09:52:31.36
f_pointing-114R.fit	1420	03:58:40.239	+69:53:29.92
f_pointing-116R.fit	924	02:58:10.141	+79:49:10.15
f_pointing-123R.fit	488	01:58:56.967	+59:43:16.90
f_pointing-129R.fit	731	23:59:57.191	+69:33:11.35

表 2.1: 各画像ファイル中の天体の個数と画像の中心の赤経と赤緯

2.3 高精度に WCS を決定する方法を開発するための実験

画像ファイルに対して、WCS を精度よく決定する方法の開発を行う。

WCS の決定方法の開発は、柳澤顕史氏（自然科学研究機構 国立天文台 岡山天体物理

観測所)が開発したスクリプトを明野望遠鏡用に修正および改良していくという方法で行った。以下では、元のスクリプトで用いられている各パラメータの値を明野望遠鏡用に調整していく。

元のスクリプトで画像ファイルへの1回のWCSの書き込みの流れは次の通りである。

1. SExtractor を使用して、画像に写っている全ての天体を抽出し、各天体に対して、

- ・ 天体の位置を示すピクセルの xy 座標
- ・ 天体の相対的な等級
- ・ 天体の位置のピークのフラックス (バックグラウンドのフラックスからの値)
- ・ 天体の位置のバックグラウンドのフラックス

をリストとして書き出す。

2. 画像を縦 $3 \times$ 横 3 の 9 つのフレーム (1 辺 341 pixel の正方形) にわけ、リストに書き出された各天体の xy 座標をもとに、それぞれのフレームで明るい順に天体を $n_{extract}/9$ 個選択する。これは、 xy 座標に対し偏りなく天体を選択するためである。また、このとき、

ピークのフラックス + バックグラウンドのフラックス < CCD の飽和レベル

となるような天体のみ選択する。CCD の飽和レベルは 55000.0 カウントである。

3. imwcs を使用し、初期条件として

- ・ 画像の 1 pixel あたりの秒角 (明野望遠鏡では、 $1\text{pixel} \simeq 1.630\text{arcsec}$ である)
- ・ 画像の中心の赤経、赤緯

を与え、全 9 フレームから選ばれた合計 $n_{extract}$ 個の天体の xy 座標・相対的な等級を用いて $n_{extract}$ 個の天体とカタログ USNO-A 2.0 に掲載された天体とを照合し、ピクセルの xy 座標と WCS を対応づける。得られた WCS を画像ファイルに書き込む。¹

上記は1回のWCSの書き込みの流れを示したもので、元のスクリプトでは、上の2、3を5回繰り返して、WCSの決定精度を向上させている。これをまとめると、図2.1に示す

¹ここでは簡単のため、各フレームから選択する天体の個数を $n_{extract}/9$ 個としたが、 $n_{extract}$ が 9 の倍数でない場合は、各フレームから $[n_{extract}/9] + 1$ 個の天体を選択し、全 9 フレームから $n_{extract}$ 個の天体を選ぶ際に天体の明るい順に選択する。

通りである。図 2.1 では参照する天体数 $n_{extract}$ を増やしながらか許容誤差 $t[\text{pixel}]$ を小さくし、WCS の書き込みを 5 回行っていることがわかる。これは、書き込まれた WCS を次の初期条件として用いて WCS を書き込むことで、精度よく WCS を決定する仕組みである。²

図 2.1 で `imrot` を使用して画像ファイルを 178.8 度回転させ、表裏反転しているが、これは、明野望遠鏡で撮影された画像は表裏が逆転しているため、これを修正するためである。元のスクリプトには含まれていない。ただし、WCS の決定精度には直接影響を与えない。

図中のパラメータについては、次に説明する。

WCS を書き込む際に使用するパラメータについて次のように定義する。

- $n_{extract}$: 画像ファイルから抽出された天体のうち、画像に WCS を書き込む際に、カタログとの照合に使用する天体の個数。前述したように 9 つのフレームから均等に選択し、CCD の飽和レベルに達していない天体から明るい順に選択する。
- 許容誤差 t : `imwcs` を使用して画像ファイルに WCS を書き込む際、画像から抽出された天体のリストとカタログを照合するが、その際 t_{pixel} の範囲まで画像とカタログの天体が一致したとするかを決定するパラメータ。
- 反復計算の有無 : `imwcs` は、画像ファイルに WCS を書き込む際、反復計算を行って WCS を精度よく書き込むことができる。この仕組みの利用するかの有無を表す。利用すると精度は向上するものの計算時間は増加する。
- 高精度の書き込み処理の有無 : 図 2.1 のステップ 3 以降の WCS の書き込みの処理の有無。ありにした場合、高精度の書き込み処理を行う流れに入る。
- 上限の等級 : 画像ファイルから抽出された天体とカタログとの照合を行う際に、カタログで参照する最も明るい天体の等級。この等級よりも明るい天体は照合の際に参照されない。元のスクリプトでは、ステップ 1,2 では定義せず、ステップ 3-5 では、10.0 等級と定義している。
- 下限の等級 : 画像ファイルから抽出された天体とカタログとの照合を行う際に、カタログで参照する最も暗い天体の等級。この等級よりも暗い天体は照合の際に参照さ

² 「WCS の書き込み」とある場合は 1 回のステップでの WCS の決定を意図しており、「WCS の決定」とある場合は一連の流れによる最終的な WCS の決定を意図している。これ以降も同じ。

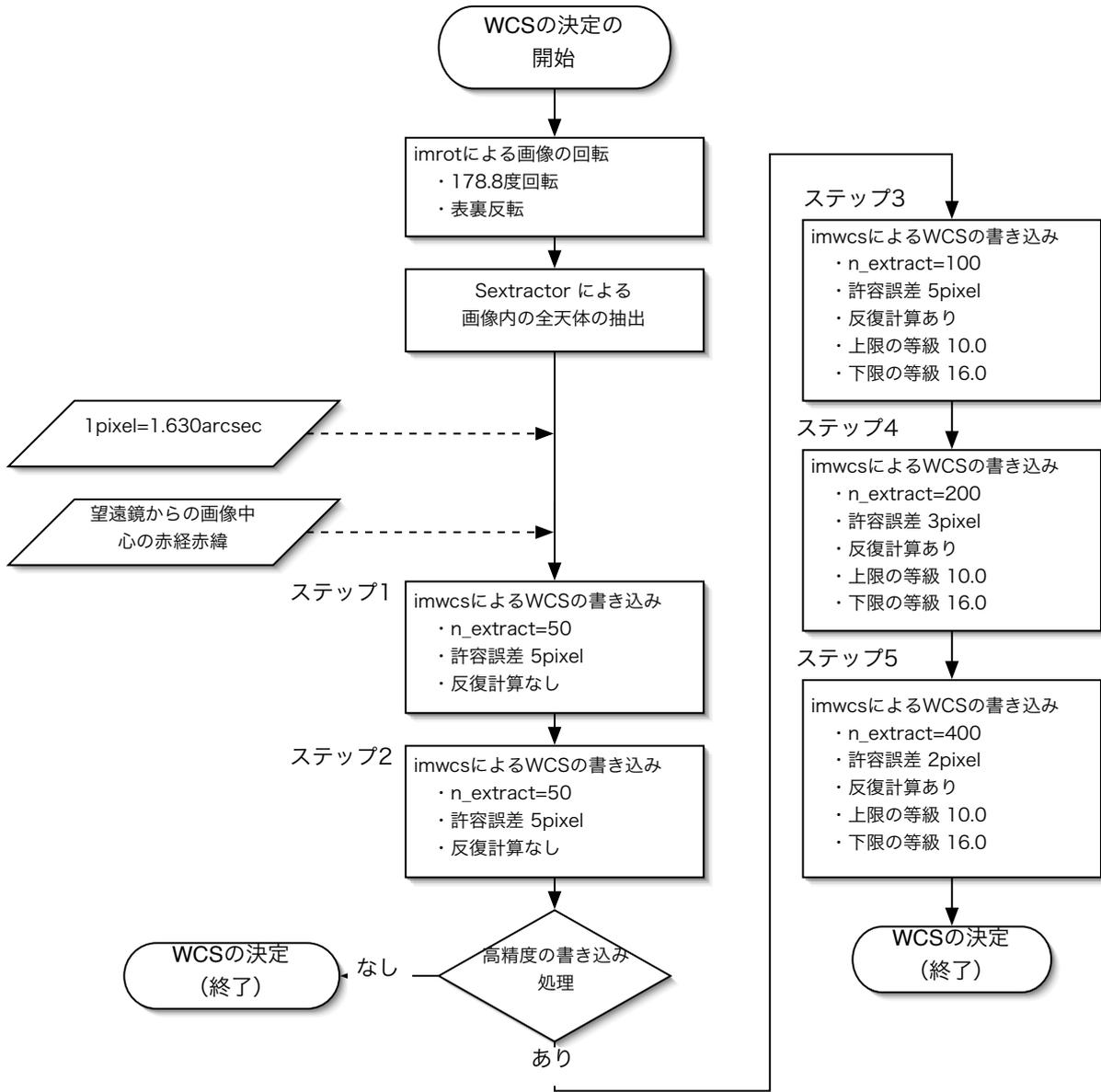


図 2.1: fits ファイルに WCS を決定する一連の流れ

れない。元のスクリプトでは、ステップ 1,2 では定義せず、ステップ 3-5 では、16.0 等級と定義している。

ここで、 $n_{extract}$ 、許容誤差 t 、反復計算の有無、上限の等級、下限の等級は図 2.1 の WCS を書き込む各ステップに対して個別に定義される。

次に、画像ファイルに最終的に書き込まれた WCS の決定精度の評価の方法について説明する。

$nstar$ 、 $nmatch$ を、次のように定義する。

- $nstar$: WCS を書き込む際に、画像ファイルから抽出された天体のうち最終的にカタログとの照合に用いられた天体の個数。前に定義した $n_{extract}$ が初期条件としてカタログとの照合で用いようとした天体の個数を表すのに対して、 $nstar$ は最終的に WCS を書き込む際に $imwcs$ が照合に使用した天体の個数を表す。 $imwcs$ はカタログとの照合でマッチングが悪い場合、カタログから参照する天体の数を減らすことがあるため、一般に $nstar \neq n_{extract}$ である。
- $nmatch$: WCS を書き込むためにカタログとの照合に用いた $nstar$ 個の天体のうち、実際にカタログとマッチングした天体の個数。

ここで、定義した $nmatch$ 、 $nstar$ を用い、以下では最終ステップでの $nmatch/nstar$ で WCS の決定精度を評価する。すなわち、図 2.1 で高精度の書き込み処理を行った場合は、WCS の決定精度はステップ 5 の $nmatch/nstar$ で評価し、高精度の書き込み処理を行わなかった場合は、WCS の決定精度はステップ 2 の $nmatch/nstar$ で評価する。

ここから、実際に WCS の決定精度を上げるために行った実験について説明する。

2.3.1 参照天体数 $n_{extract}$ および高精度の書き込み処理の有無と WCS の精度

図 2.1 の各ステップで参照する天体の個数 $n_{extract}$ を変化させ、WCS の決定精度 $nmatch/nstar$ がどのように変化するか調べる。元のスクリプトでは、 $n_{extract}$ は図 2.1 のようになっているが、この値が妥当であるかを判断するためである。また、この実験では、参照する天体数 $n_{extract}$ を決定するとともに、高精度の書き込み処理を行うことの優位性について同時に検討する。

測定方法

各ステップの $n_{extract}$ を表 2.2 ように (1)、(2)、(3) と変化させ実験をおこなった。高精度の書き込み処理を行わない場合は、表の二重線までの値を使用したこととなる。

ステップ	(1)	(2)	(3)
1	40	50	60
2	40	50	60
3	80	100	120
4	160	200	240
5	320	400	480

表 2.2: WCS を書き込む各ステップでの $n_{extract}$ の値

実験結果

実験の結果は、表 2.3 の通りである。

まず、(1)、(2)、(3) の組み合わせ全てにおいて、高精度の書き込み処理を行った場合、多くの画像に対して WCS の決定精度が向上することがわかる。ただし、`f_pointing-001.fit` は、高精度の書き込み処理の有無に関わらず精度が悪いことがわかる。

`f_pointing-001R.fit`、`f_pointing-090R.fit` を除けば、高精度の書き込み処理を行った (2) の場合の精度が他の場合に比べてよいことがわかる。

また、高精度の書き込み処理を行った場合、(1)、(3) では決定精度が悪い画像があるのに対して、(2) は全ての画像に対して、一定以上の精度で WCS が決定していることがわかる。

2.3.2 カタログで参照する等級範囲

WCS の決定精度向上のため、SExtractor によって抽出された天体とカタログを照合する際に、カタログ上で利用する天体の等級の範囲を指定する。範囲を指定することによって、抽出された天体とカタログがマッチングしやすくなると考えられる。図 2.1 で上限の等級、下限の等級が定義されているが、これを再検討するものである。

	$n_{extract}$ の組み合わせ	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
画像ファイル	高精度書込処理の有無	なし	なし	なし	あり	あり	あり
f_pointing-001R.fit		0.08	0.06	0.00	0.10	0.04	0.04
f_pointing-023R.fit		0.83	0.72	0.70	0.86	0.86	0.86
f_pointing-044R.fit		0.75	0.74	0.80	0.93	0.93	0.93
f_pointing-053R.fit		0.80	0.82	0.78	0.95	0.95	0.95
f_pointing-057R.fit		0.78	0.82	0.80	0.95	0.95	0.95
f_pointing-061R.fit		0.65	0.72	0.73	0.81	0.82	0.82
f_pointing-063R.fit		0.63	0.64	0.65	0.85	0.88	0.85
f_pointing-071R.fit		0.70	0.76	0.82	0.75	0.93	0.93
f_pointing-077R.fit		0.65	0.70	0.70	0.95	0.96	0.96
f_pointing-083R.fit		0.63	0.58	0.60	0.78	0.78	0.78
f_pointing-087R.fit		0.90	0.92	0.83	0.99	0.99	0.99
f_pointing-090R.fit		0.48	0.48	0.57	0.82	0.90	0.93
f_pointing-091R.fit		0.48	0.54	0.53	0.74	0.78	0.78
f_pointing-098R.fit		0.60	0.14	0.63	0.88	0.92	0.90
f_pointing-108R.fit		0.78	0.78	0.77	0.95	0.95	0.95
f_pointing-114R.fit		0.25	0.62	0.68	0.90	0.91	0.91
f_pointing-116R.fit		0.68	0.12	0.12	0.93	0.90	0.16
f_pointing-123R.fit		0.05	0.64	0.63	0.01	0.76	0.75
f_pointing-129R.fit		0.50	0.48	0.52	0.90	0.90	0.90

表 2.3: カタログとの照合に使用する天体の個数 $n_{extract}$ と精度 n_{match}/n_{star} の関係

CCD カメラの飽和レベルと上限の等級の関係

CCD カメラの飽和レベルに対応する等級を調べる。カタログとの照合に用いる $n_{extract}$ 個の天体を選択する際に、

$$\text{ピークのフラックス} + \text{バックグラウンドのフラックス} < \text{CCD の飽和レベル}$$

である天体を選び出している。したがって、ここで求めた等級を上限としてカタログを参照すればよいこととなる。

今回使用しているカタログ USNO-A 2.0 には、Bバンドフィルターと Rバンドフィルターによる等級が掲載されているので、両方のフィルターについて等級と (ピークのフラックス + バックグラウンドのフラックス) の関係を調べる。

ここでは、f_pointing-053R.fit、f_pointing-057R.fit、f_pointing-071R.fit、f_pointing-087R.fit、f_pointing-108R.fit からいくつかの天体を抽出し、合計 24 個の天体に対してこの関係を調べた。

実験結果

実験の結果は、図 2.2 の通りである。

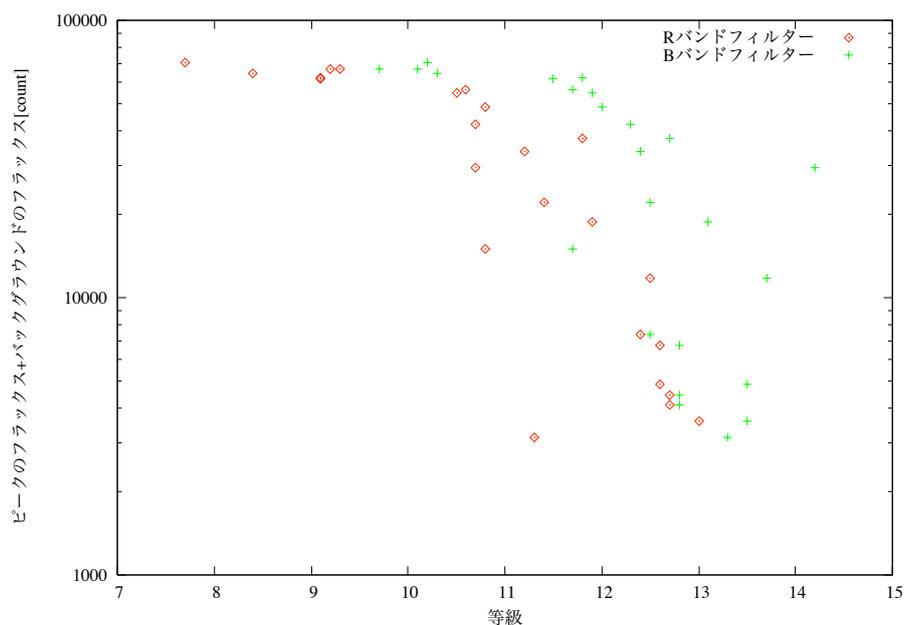


図 2.2: Rバンドフィルター、Bバンドフィルターにおける等級と (ピークのフラックス + バックグラウンドのフラックス) の関係

図 2.2 からわかるように、CCD カメラの飽和レベルに対応するフラックスは 55000 であり、これに対応する等級は R バンドフィルターでは 10.5 等級、B バンドフィルターでは 11.5 等級である。

カタログで用いる天体の下限の等級

次に、SExtractor によって抽出された天体とカタログを照合する際に、カタログで使用する最も暗い天体の等級、すなわち下限の等級を決定する。高精度の書き込み処理を行い、パラメータは図 2.1 の通りに計算を行う。WCS を決定する際に、カタログで使用する天体の下限の等級を、13.0-21.0 まで 1 等級ずつ増加させていき、WCS の決定精度をステップ 5 の $nmatch/nstar$ で評価する。

ここでは、画像ファイル `f_pointing-098R.fit`、`f_pointing-123R.fit` を使用している。

実験結果

実験の結果は、次の表 2.4 の通りである。

下限の等級	f_pointing-098R.fit			f_pointing-123R.fit		
	$nmatch/nstar$	$nmatch$	$nstar$	$nmatch/nstar$	$nmatch$	$nstar$
13	0.52	11	21	0.81	21	26
14	0.79	41	52	0.88	60	68
15	0.89	107	120	0.91	148	162
16	0.92	261	283	0.76	279	366
17	0.83	332	400	0.73	289	398
18	0.83	332	400	0.73	289	398
19	0.83	332	400	0.73	289	398
20	0.83	332	400	0.73	290	398
21	0.83	332	400	0.73	290	398

表 2.4: 下限の等級と WCS の決定精度 $nmatch/nstar$ の関係

`f_pointing-098R.fit` においては、下限の等級が 16 等級の時、 $nmatch/nstar$ の値が最も良いことがわかる。`f_pointing-123R.fit` においては、下限の等級が 15 等級の時、 $nmatch/nstar$ の値が最も良いことがわかる。

また、どちらも17等級を超えると、 n_{match} 、 n_{star} が同一の値をとるため、 $n_{\text{match}}/n_{\text{star}}$ が変化しないことがわかる。

2.3.3 画像中心の赤経赤緯が正確に与えられなかった場合の対応

解析パイプラインの開発としては、画像中心の赤経赤緯が正確に与えられた場合の WCS の決定精度を向上させるとともに、望遠鏡の導入精度が数分角程度であることを考慮して、望遠鏡の目標視野中心の赤経赤緯が画像の中心からずれている場合も WCS を決定できる必要がある。

以下では、画像中心の赤経赤緯を本来の値から意図的にずらしても、WCS が決定できる方法を検討する。

ステップ1の n_{extract} および許容誤差 t の決定

画像中心の赤経赤緯として本来の値からずらした赤経赤緯を与えていき、WCS が決定できるかどうかを調べる。このとき、ステップ1の WCS の書き込みの n_{extract} 、許容誤差 t を変化させ、赤経赤緯のずれに対するこれらの最適値を求める。ここで注意しなければならないのは、最終的には高精度で WCS を決定しなければならないので、高精度の書き込み処理を行い、ステップ2以降の WCS の書き込みに関しては、2.3.1の結果の通り表2.2の(2)の値の n_{extract} 、図2.1の許容誤差 t を用いる。また、2.3.2の結果から、全ステップで上限の等級は10.5等級、下限の等級は16.0等級を用いる。

今回の実験では、画像ファイル $f_{\text{pointing-098R.fit}}$ 、 $f_{\text{pointing-123R.fit}}$ 、 $f_{\text{pointing-129R.fit}}$ に対して、画像の中心座標の赤経を+方向に2arcmin ずつ増加させていき、WCS が決定できるかどうかを評価していく。ここで赤経方向についてのみ実験を行った理由は明野望遠鏡では赤経方向の導入精度の方が赤緯方向の導入精度に比べ悪いためである（谷津修論, 2005）。

実験結果

画像ファイル $f_{\text{pointing-098R.fit}}$ に対する実験結果は表2.5に示す通りである。表2.5の○は $n_{\text{match}}/n_{\text{star}} = 0.92$ を表していて、これは表2.3の精度と同じであり、ステップ1の WCS の書き込みの n_{extract} 、許容誤差 t を変化させても最終的な WCS の決定精度は変わらないことがわかる。

ステップ1の $n_{extract}$ が、 $n_{extract} = 10, 18$ の場合、WCS を決定するには情報量が足りないことがわかる。 $n_{extract} = 27, 36, 50$ の場合はほぼ同じ様な結果になっている。ただ、 $n_{extract} = 27$ の場合、許容誤差 $t = 20, 25, 30$ では、12arcmin まで問題なく WCS が決定できていることがわかる。

f_pointing-123R.fit、f_pointing-129R.fit において、最も赤経がずれた時に WCS の決定に成功した参照する天体の数 $n_{extract}$ と許容誤差 t の組み合わせをまとめると、表 2.6 の通りである。

f_pointing-123R.fit、f_pointing-129R.fit に関して、 $n_{extract} = 10$ では f_pointing-098R.fit と同じように情報量が足りなく WCS を決定できなかった。また、f_pointing-123R.fit では $n_{extract} = 18$ で赤経が 4arcmin ずれた場合、WCS の決定に失敗している。

以上の結果から、画像の中心座標の赤経赤緯のずれに対して、ステップ1の $n_{extract}$ の最適値は見いだせない。ただし、 $n_{extract} = 10, 18$ は情報量が少なくなるので問題がある。許容誤差 t に関しては、f_pointing-098R.fit、f_pointing-123R.fit、f_pointing-129R.fit の3つの結果を見れば、許容誤差 $t = 10$ の場合が最も良いことがわかる。

2.4 未同定天体を検出する方法の開発のための実験

未同定天体の検出方法について考える。

未同定天体の検出の方法の大まかな流れは次のようになる。

1. SExtractor を利用して画像ファイルにあるすべての天体を検出し、画像ファイルに書き込まれている WCS をもとに、検出した全天体の赤経赤緯、等級をリストとして書き出す。
2. SExtractor によって書き出されたリストを scat を利用してカタログ USNO-A 2.0 と比較し、カタログに掲載されていない天体を抽出する。

未同定天体を検出するパイプラインの開発としては、

- 画像に写っている天体をより多く検出できること
- ゴミ、宇宙線、空気の乱れになど、天体によるものではないピークを誤って未同定天体として検出しないこと

が重要であると考えられる。

1 回目の $n_{extract}$	許容誤差 t	赤経のずれ arcmin											
		0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	
10	5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	15	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	20	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	25	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	▲
	30	○	×	×	×	×	×	×	×	×	▲		
18	5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	10	○	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	15	○	×	×	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	20	○	×	×	○	○	○	▲					
	25	○	×	×	○	○	▲	▲	▲	▲			
	30	○	▲										
27	5	○	×	×	○	○	○	○	▲	○	▲		
	10	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	▲		
	15	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	▲		
	20	○	○	○	○	○	○	○	○	▲			
	25	○	○	○	○	○	○	○	○	▲			
	30	○	○	○	○	○	○	○	○	▲			
36	5	○	×	×	○	○	○	○	○	○	▲		
	10	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	▲		
	15	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	▲		
	20	○	▲	▲	○	○	○	○	○	▲			
	25	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	▲
	30	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	○
50	5	○	▲	▲	○	○	○	○	▲				
	10	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	▲
	15	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	▲		
	20	○	▲	▲	○	○	○	○	○	▲			
	25	○	▲	▲	○	○	○	○	○	▲			
	30	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	▲		

表 2.5: 赤経方向のずれに対する WCS の決定の成功と失敗 ○: WCS の決定に成功した場合 ($n_{match}/n_{star} = 0.92$) ▲: WCS の決定に失敗した場合 ×: 情報が少なく WCS を決定できなかった場合

ファイル名	$n_{extract}$	許容誤差 t	最大の赤経のずれ arcmin
f_pointing-123R.fit	27	10	16.0
	36	10	16.0
f_pointing-129R.fit	36	5,10,25	20.0
	50	5,10,15,20,25,30	20.0

表 2.6: 最大の赤経のずれに対し WCS の決定に成功した場合の参照する天体の数 $n_{extract}$ と許容誤差 t の組み合わせ

未同定天体の検出の方法は上記の検出の流れで示した通りであり、以下では、天体でないもののピークを天体として誤認しなようにしながら、より多くの天体を正確に検出できるよう開発していくことがポイントであると考えられる。

ここで以下で用いる用語を次のように定義する。

- ・ 像：画像ファイルから SExtractor によって「天体」として抽出されたすべてのもの。
- ・ 天体：像のうち実際の天体によるもの。すなわち、カタログ USNO-A 2.0 と比較して天体であると確認できる像。
- ・ 誤認点：像のうち天体によらないもの。すなわち、宇宙線など、誤って天体として抽出された像をいう。

2.4.1 誤認点の座標に関する依存性

画像ファイルから像を検出し、誤認点が画像のどこに分布するか、その xy 座標を調べる。これを調べる目的であるが、座標に依存する誤認点は座標を指定して除去できるため、容易に誤認点を減らすことができる。したがって、誤認点の除去の効率的な方法が考案できるためである。

SExtractor を利用して像を検出した結果は図 2.3 の通りである。赤丸が像を表し緑丸が天体を表している。したがって、緑丸がなく赤丸が単独である位置が誤認点となる。これからわかるように、画像の左端一列が誤認点として検出されていることがわかる。

次に、複数枚の画像に関して、誤認点として検出される座標について調べる。

実験方法は、複数の画像ファイルで SExtractor を利用して像を検出し、それを USNO-A 2.0 と比較し一致しなかった像すなわち誤認点の xy 座標をリストアップするというものである。今回は、画像ファイル f_pointing-001R.fit、f_pointing-023R.fit、f_pointing-044R.fit、f_pointing-053R.fit について調べている。

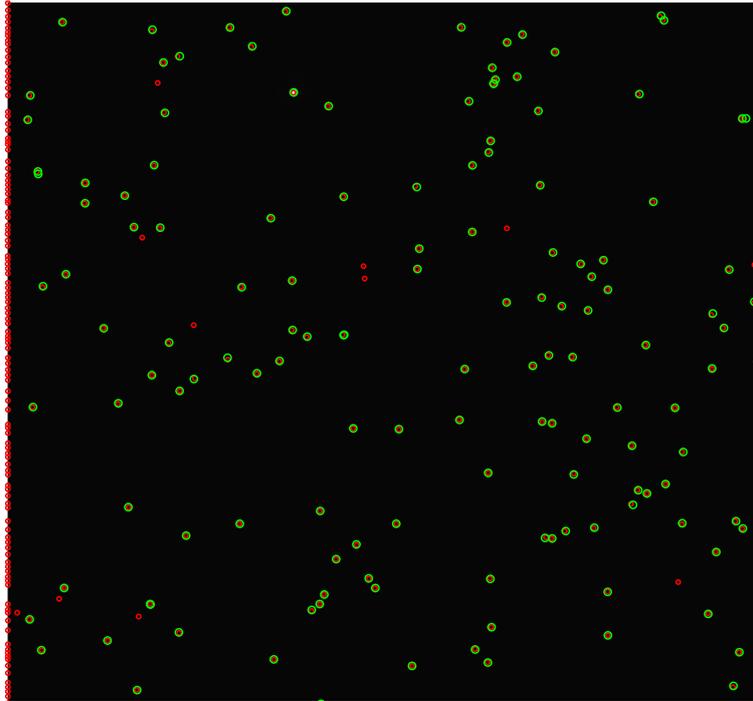


図 2.3: 検出された像の座標に対する依存性 赤丸：像 緑丸：天体

リストアップした誤認点の座標を図示したものが図 2.4 である。

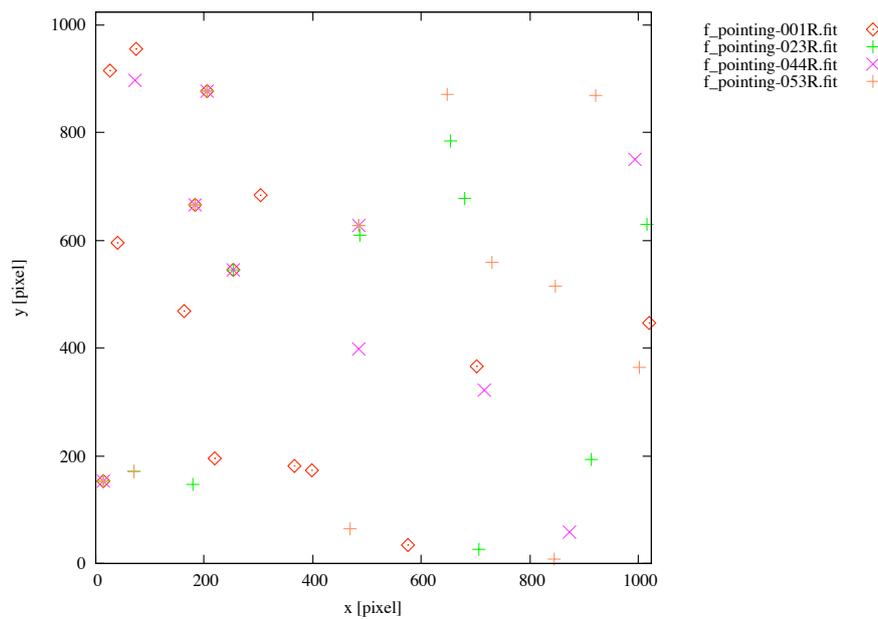


図 2.4: 複数の画像に共通した誤認点の座標

誤認点は、各画像ファイルで異なる座標のものもある一方で、各画像ファイルで共通す

る座標のものがあることもわかる。

2.4.2 恒星のみの検出

今回開発するパイプラインは、カタログとの比較によってガンマ線バーストの座標を特定するものであるため、単独の恒星のみを検出できればよい。ガンマ線バーストが銀河内で起こる可能性もあるが、これは一枚の画像とカタログとの比較からでは検出は難しい。検出するためには、異なった時期に撮影した複数の画像を比較する必要があり、今回開発するパイプラインでは発見できない。

したがって、ここでは恒星のみを検出するようにするため、SExtractorによって検出された各像に対して評価される以下のパラメータに対して制限をかける。

- *flag* : 検出した像がどのような特徴を持っているかを示す値。値の持つ特徴については表2.7の通り。*flag*の値は当てはまる特徴の*flag*の合計値として与えられる。例えば、 $flag = 8$ と $flag = 16$ に該当する像の場合、その像の*flag*は $flag = 8 + 16 = 24$ となる。
- FWHM : 検出した像をPSF(Point Spread Function)で表したときのFWHM

<i>flag</i>	特徴
1	The object has neighbors, bright and close enough to significantly bias the photometry, or bad pixels (more than 10% of the integrated area affected).
2	The object was originally blended with another one.
4	At least one pixel of the object is saturated (or very close to).
8	The object is truncated (too close to an image boundary).
16	Object's aperture data are incomplete or corrupted.
32	Object's isophotal data are incomplete or corrupted.
64	A memory overflow occurred during deblending.
128	A memory overflow occurred during extraction.

表 2.7: *flag* の値とそれが示す像の特徴

これらのパラメータに対して、次のように制限をかける。

- SExtractor によって検出された各像に対して与えられる $flag$ の値が $flag = 0$ の像のみを選択
- SExtractor によって検出された各像の FWHM の大きさが $1.3\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 4.3\text{pixel}$ を満たす像のみを選択

今回開発しているパイプラインは、恒星のみを検出するよう $flag = 0$ のみを選択する。また、FWHM に関しては、恒星を検出する場合、その大きさは $1.5\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 4.0\text{pixel}$ 程度に多く分布する。これは、図 2.5 からわかる。この図は、画像ファイル `f_pointing-090R.fit` に対して SExtractor を用いて像を抽出し、 $flag = 0$ であり、ピクセルの xy 座標が $2 < x < 1024$, $2 < y < 1024$ であるものから作成した。したがって、 $1.5\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 4.0\text{pixel}$ を満たす FWHM の値の像のみを選択すればよいこととなり、上記のように制限した。なお、像を検出する際にフィルターには `default.conv` を使用している。フィルターについては 2.4.3 を参照のこと。

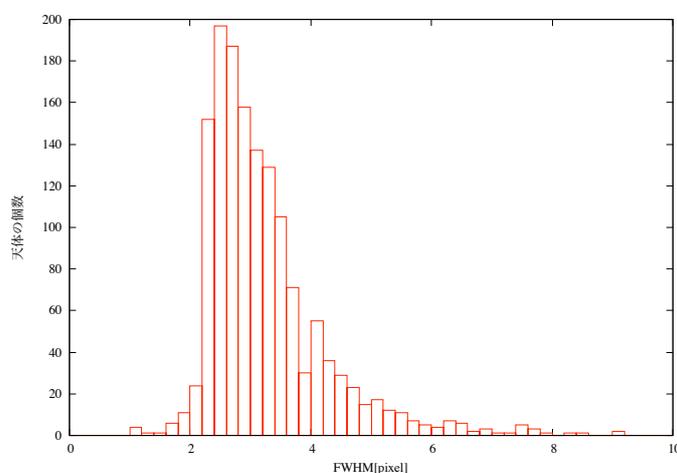


図 2.5: FWHM と天体の個数分布の関係

2.4.3 スムージングに用いるフィルターと天体の検出数の差異

SExtractor によって像を検出する際、SExtractor はフィルターと呼ばれる関数を用いて画像全域に対してスムージングを行い、その後、天体の検出を行っている。すなわちフィルターは PSF の形状を決めるものである。これらのフィルターは規格化されており、それぞれのピークに合わせてそのサイズを変更し適用される。ここでは、SExtractor で利

用するフィルターを換えて、検出する像の特性について調べ、パイプラインでどのフィルターを用い天体を検出するか検討する。

測定方法

フィルターを換えて SExtractor によって像を検出し、天体の検出数および誤認点の検出数とその誤認点の FWHM を調べる。使用するフィルターは表 2.8 の通りである。検出する像は、 $flag = 0$ 、 $1.3\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 4.5\text{pixel}$ 、ピクセルの xy 座標が $2 < x < 1024$, $2 < y < 1024$ の制限をかけ、選択している。画像ファイルは f_pointing-023R.fit を使用する。

フィルター	フィルターの FWHM[pixel]	フィルターのサイズ [pixel × pixel]
default.conv		
gauss_2.0_3x3.conv	2.0	3.0 × 3.0
gauss_2.0_5x5.conv	2.0	5.0 × 5.0
gauss_2.5_5x5.conv	2.5	5.0 × 5.0
gauss_3.0_5x5.conv	3.0	5.0 × 5.0
gauss_3.0_7x7.conv	3.0	7.0 × 7.0
gauss_4.0_7x7.conv	4.0	7.0 × 7.0
mexhat_2.0_7x7.conv	2.0	7.0 × 7.0
mexhat_2.5_7x7.conv	2.5	7.0 × 7.0
mexhat_3.0_9x9.conv	3.0	9.0 × 9.0
mexhat_4.0_9x9.conv	4.0	9.0 × 9.0
mexhat_5.0_11x11.conv	5.0	11.0 × 11.0

表 2.8: 実験に使用するフィルターの FWHM とそのサイズ

フィルターの形状の例は図 2.6、図 2.7 の通りである。

実験結果

各フィルターによる天体の検出数、誤認点の検出数およびその FWHM は表 2.9 の通りである。

この結果からわかるように、gauss フィルターは、mexhat フィルターに比べて多くの天

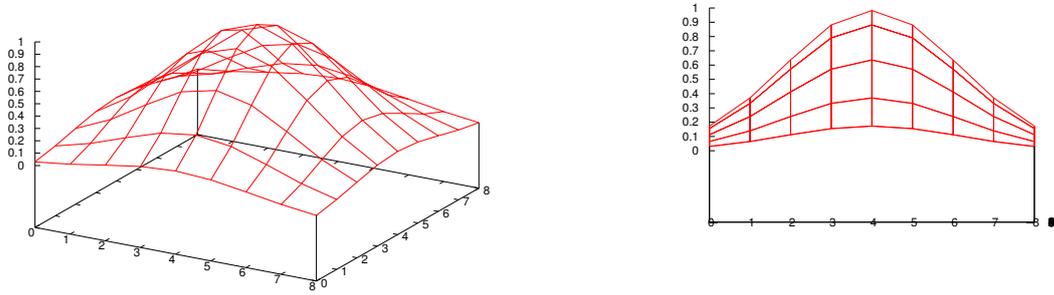


図 2.6: gauss フィルターの例 (ガウス関数の形状をしている)

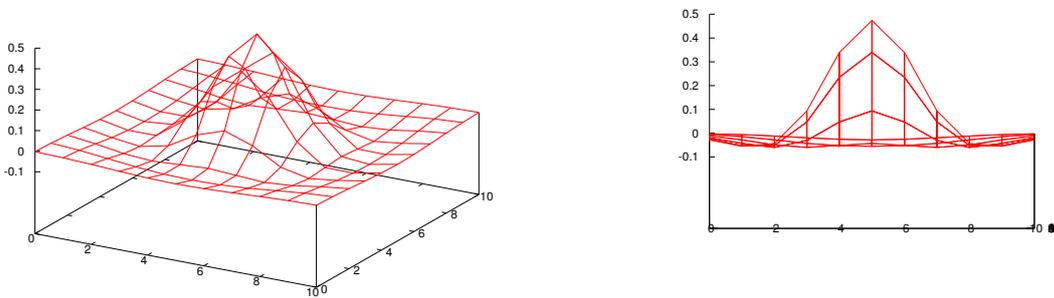


図 2.7: mexhat フィルターの例 (メキシカンハットの形状をしている)

フィルター	天体の検出数	誤認点の検出数	誤認点の FWHM[pixel]		
default.conv	115	7	1.39	3.27	3.39
			4.08	4.14	4.24
			4.46		
gauss_2.0_3x3.conv	118	7	3.21	3.63	4.08
			4.19	4.26	4.27
			4.31		
gauss_2.0_5x5.conv	106	5	3.20	4.09	4.20
			4.26	4.30	
gauss_2.5_5x5.conv	105	3	1.52	4.34	4.47
gauss_3.0_5x5.conv	101	1	1.56		
gauss_3.0_7x7.conv	97	2	1.60	3.83	
gauss_4.0_7x7.conv	87	1	4.45		
mexhat_2.0_7x7.conv	61	0			
mexhat_2.5_7x7.conv	73	4	1.37	2.87	2.88
			2.89		
mexhat_3.0_9x9.conv	75	2	3.22	3.24	
mexhat_4.0_9x9.conv	80	2	1.45	3.50	
mexhat_5.0_11x11.conv	79	2	1.43	3.81	

表 2.9: 各フィルターによる天体の検出数、誤認点の検出数およびその FWHM

体を検出できることがわかる。しかし、その一方で天体の検出数は多いものの誤認点の検出数もそれに伴い増加していることがわかる。default.conv は比較的多くの天体を検出しているものの誤認点の検出数も多く、その誤認点の FWHM は広く分布している。

以上の結果を受け、今回のパイプラインでは今回は、gauss_2.0_3x3.conv を用い $1.30\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 2.50\text{pixel}$ の範囲を検出し、gauss_2.5_5x5.conv を用い $2.50\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 4.30\text{pixel}$ の範囲を検出することにする。詳しくは考察で述べる。

2.4.4 2.4.1-2.4.3 までの結果と課題

ここまでの手法で多くの画像に対して検出の誤認を防ぎ、天体を検出することができる。図 2.3 で示した f_pointing-023R.fit はここまでの手法によって図 2.8 のように改善される。これをみると分かるように、この画像に関しては、誤認点はないことがわかる。

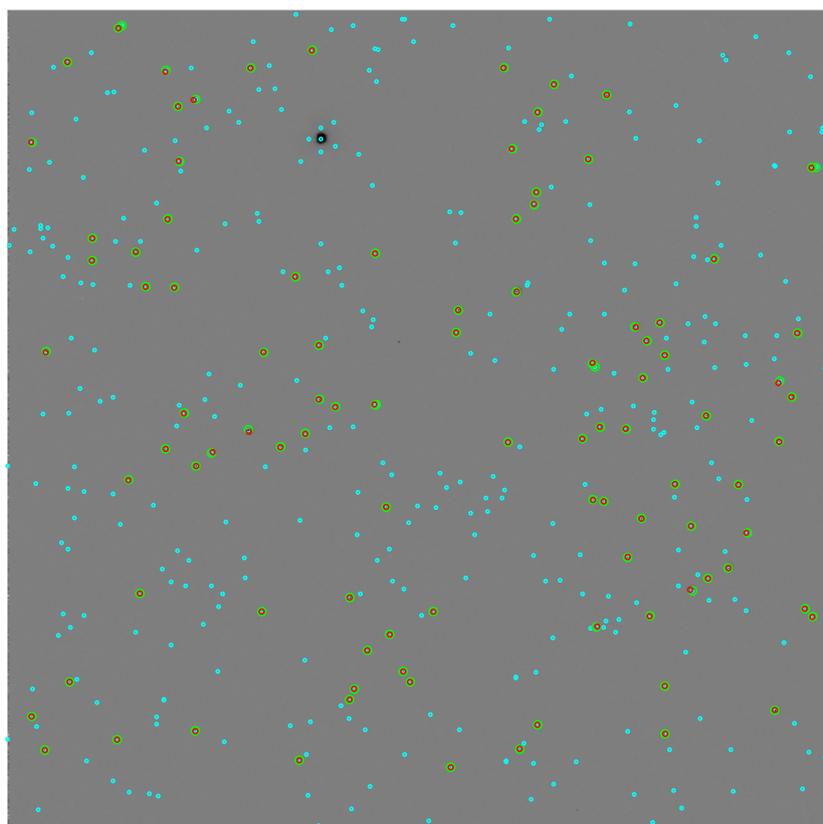


図 2.8: 天体の検出の例 赤丸：星 緑丸：天体 水色丸：この画像の領域で USNO-A 2.0 に掲載されている全天体

ここまでに述べてきた手法を利用しても誤認点がすべて除去されるわけではない。ここ

までの方法では、次の様なある一点でピークが立っているような像を誤認点として検出している。図 2.9 は、前述までの手法によって SExtractor によって検出された天体のフラックスの形状と誤認点のフラックスの形状を比較したものである。これらは、画像ファイル f_poitnig-044.fit のものである。このような中心一点でピークが立っている誤認点を除去する方法を考えればよいこととなる。

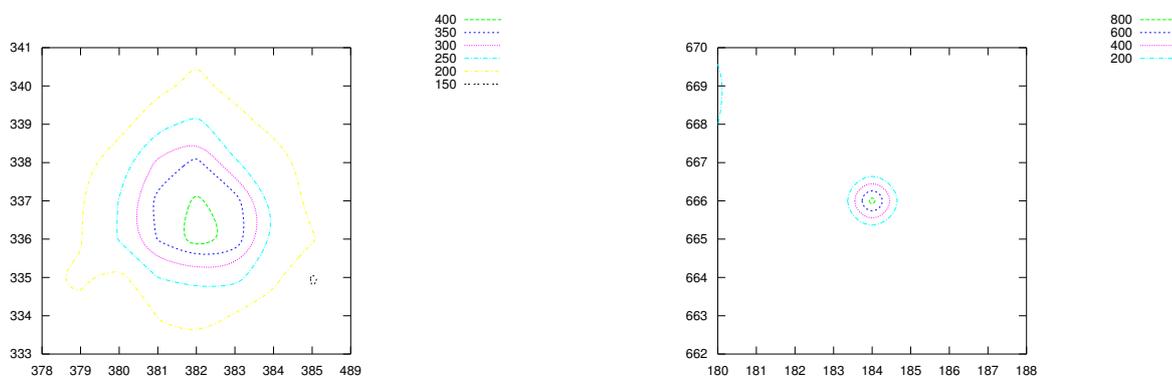


図 2.9: 左図：天体のフラックスの形状 右図：誤認点のフラックスの形状（等高線は同じフラックスを表す）

2.4.5 誤認点の検出

図 2.9 から分かるように、天体のフラックスの形状が円ではないのに対して、誤認点のフラックスの形状は真円に近いとってよい。つまり、誤認点はその中心一点に大きなピークをもつという特徴がある。

以下では、このような中心一点に大きなピークをもつ像を誤認点として検出しない方法を検討する。

誤認点を検出するフィルターの作成

天体のピークがある程度の広がりを持っているのに対して、誤認点は中心一点にのみ大きなピークをもっていることがわかっている。よって、逆に中心一点に大きなピークをもつ像を検出し、その像の座標と前述までの手法で検出した像の座標で一致するものがあれば、その座標をもつ像を天体として検出しないという方法をとることにする。

中心一点に大きなピークをもつ像を検出するため、そのような像をスムージングによっ

て取り出すフィルターを作成する。作成するフィルターは抽出する像の形状をしているものにすればよいので、簡単に次の図 2.10 のようなものとなる。フィルターは規格化されて使用されるので中心座標の値は問題にはならない。

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

表 2.10: 中心一点にピークをもつ点を検出するためのフィルター (誤認点検出用フィルター)

ただし、ピークのフラックスの値が小さい場合、天体でも表 2.10 の形状をした像であることがあると考えられる。ここでは中心一点に大きなピークを持つ誤認点のみを検出したいので、ピークのフラックスが 100 以上のものを誤認点として検出することにした。

フィルターを使用した結果

このフィルターを用いた結果は図 2.10 の通りである。画像ファイルは、f_pointing-071R.fit を使用している。左上図が 2.4.1-2.4.3 までの方法で像を検出したものであり、右上図は表 2.10 のフィルターを使用して誤認点を検出したものであり、下図が像から誤認点を差し引いたものである。これらの図を比較すると、このフィルターを用いることによって、ほぼ誤認点を除去できることがわかる。ただし、未だにいくつかの像に関してはカタログと一致せず誤認点であることがわかる。これについては考察で原因を考える。

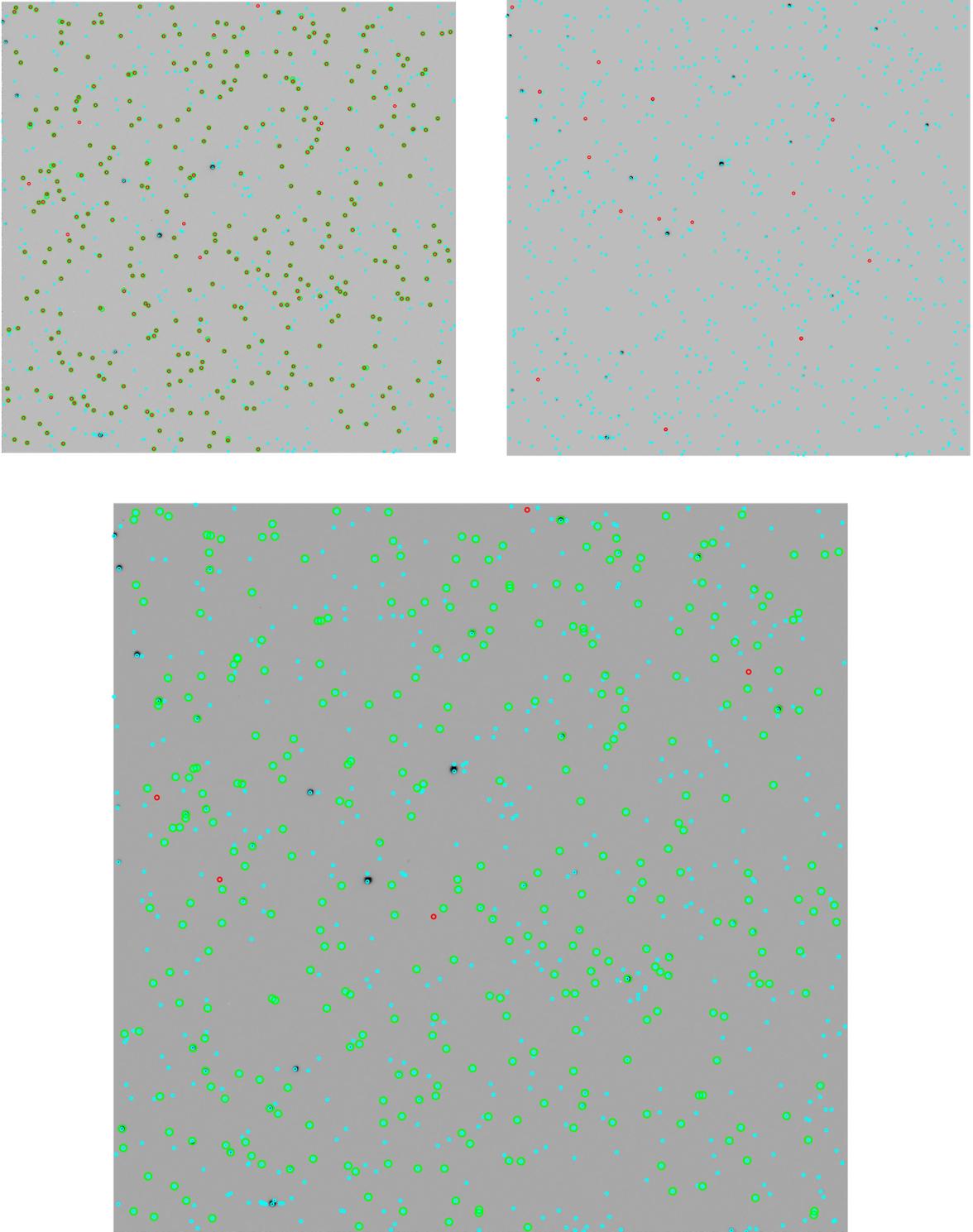


図 2.10: 左上図：2.4.1-2.4.3 までの手法で像を検出した結果 右上図：表 2.10 のフィルターを用いて誤認点を検出した結果 下図：2.4.1-2.4.3 の手法で検出した像から表 2.10 を用いて検出した誤認点を差し引いた結果 赤丸：像（ただし下図では像でなく誤認点のみ） 緑丸：天体 水色丸：USNO-A 2.0 に掲載されている全天体

第3章 実験結果の議論および開発方針

3.1 WCSの書き込みに関する実験に関する考察

3.1.1 WCSの決定精度 $n_{\text{match}}/n_{\text{star}}$ と 2.3.1 の考察

$n_{\text{match}}/n_{\text{star}}$ の値について考える。

表 2.3 には、 $n_{\text{match}}/n_{\text{star}} \leq 0.30$ と精度が悪い場合があるが、これは精度が悪いのではなく、完全に WCS の決定に失敗していると考えられる。WCS の決定に失敗した場合、 $n_{\text{match}}/n_{\text{star}} = 0$ となると思われるが画像の中心として与えられた赤経赤緯の誤差が大きく他の領域とマッチングを行った場合でも、カタログ上の天体数が多いためいくつかの天体で同一でない天体と偶然一致するものと考えられる。したがって、 $n_{\text{match}}/n_{\text{star}} \leq 0.30$ の画像は WCS の決定に失敗していると考えてよい。実際に $n_{\text{match}}/n_{\text{star}} \leq 0.30$ の場合、画像ファイルに書き込まれた WCS は本来その画像が示すべき WCS とは異なっている。

表 2.3 で、精度の良い場合も、 $n_{\text{match}}/n_{\text{star}} \leq 1$ となっているが、これは、カタログに掲載されている天体の方が画像から抽出された天体よりも多いためと考えられ、 $n_{\text{match}}/n_{\text{star}} \sim 0.7$ 程度なら精度は悪いものの WCS の決定に成功したと考えて問題ない。

2.3.1 の結果について考察する。

f_pointing-001.fit の結果からわかるように、 n_{extract} の値、高精度の書き込み処理の有無に関わらず、この画像に対して WCS の決定に失敗している。これは、この画像が極付近を撮像したものであり、与えられた画像の中心の赤経のずれに対して敏感であり、WCS が決定できなかったと考えられる。このことから、画像の中心として与えられる赤経赤緯のずれに対し、柔軟に対応し WCS を決定できるシステムが必要であると考えられる。

f_pointing-123R.fit は表 2.2 の (1) の組み合わせ、f_pointing-116R.fit は (3) の組み合わせで WCS の決定に失敗しているが、これについては原因がわからない。

3.1.2 カタログで参照する等級範囲の決定

上限の等級の決定

上限の等級の決定であるが、CCDカメラの飽和レベルに対応する等級は、Rバンドフィルターでは10.5等級、Bバンドフィルターでは11.5等級であるので、照合する際に使用するカタログの天体の等級の上限を少なくとも10.5等級とすればよいことがわかる。これを行うことによってWCSの精度がよりあがるものと考えられる。ここで10.5等級としたのは、カタログ参照を行う `imwcs` がどちらのバンドを利用してマッチングを行っているか調査できていないためであり、参照する天体の個数が少なくなりすぎないように上限の等級を10.5等級とした。

上限の等級は、CCDカメラの飽和レベルに依存するものであるため、WCSを書き込むすべてのステップでこの上限の等級を設けた方がよい結果になると考えられる。

下限の等級の決定

下限の等級については、2.3.2の結果を考えれば、15等級、あるいは16等級がよいことがわかる。`f_pointing-098R.fit` および `f_pointing-123R.fit` が写す領域でUSNO-A 2.0に掲載された全天体に対し、明るい順に数えた天体の個数とその等級の関係を示したものが図3.1である。ここで差が生じたのは、図3.1から天体の個数が同一となる等級が `f_pointing-098R.fit` が暗いものに対して、`f_pointing-123R.fit` が明るいためと考えられる。このことから、下限の等級は画像ごと個別に定義するのがよいことになる。しかし、ここで気になるのは、表2.4からわかるように下限の等級を暗くしていくほど、一致する天体の個数 $nmatch$ の数は増加するということである。今回は、 $nmatch/nstar$ をWCSの決定精度と定義しているため、下限の等級は15等級、あるいは16等級とするほうがよいこととなるが、 $nmatch$ の値についても考慮したほうがよいのかもしれない。今回は、下限の等級が明るすぎてWCSの決定精度が落ちることを防ぎたいため、下限の等級はカタログで参照する範囲が広がる16等級とする。この値は、表2.1からわかるように平均的な天体の個数をもつ `f_pointing-098R.fit` をもとに決定した値であるので妥当であるといえる。

3.1.3 高精度の書き込み処理の有無の決定

WCSを精度よく決定するためには、高精度の書き込み処理を行うべきかどうかについてであるが、2.3.1からわかるように、高精度の書き込み処理を行った方がよいことがわ

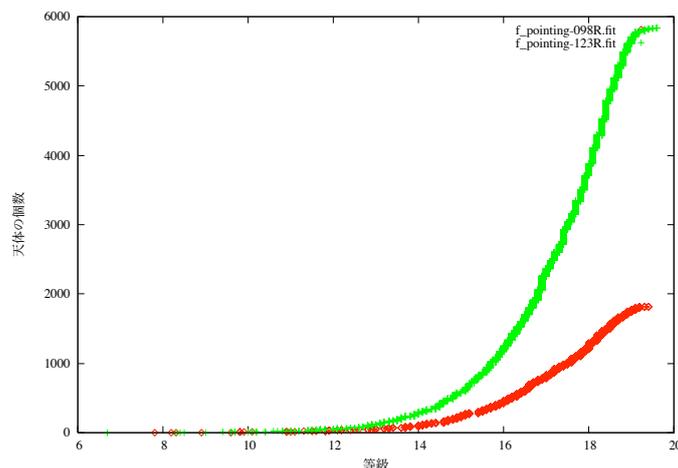


図 3.1: 明るい順に数えた天体の個数と等級の関係

かる。WCS の決定に成功する場合、高精度の書き込み処理に要する時間は後で出てくる表 3.2 からわかるように 5 秒程度であるので、時間的にも高精度の書き込み処理を自動解析で行って問題とはならない。

3.1.4 望遠鏡の導入精度への対応

望遠鏡の導入精度に対し WCS を決定させる方法を考える。

2.3.3 の `f_pointing-098R.fit` や 2.3.1 の `f_pointing-001R.fit` の結果からわかるように、画像の中心の赤経赤緯として真の値に近い赤経赤緯を与えた場合でも WCS の書き込みに成功しないことがあることがわかる。これは、天体の配置によっては画像中心の赤経赤緯として真の値に近い赤経赤緯が与えられた場合の方が WCS を決定する際に他の天体と誤ってマッチングしてしまうものと考えられる。したがって、望遠鏡からの目標視野の中心の赤経赤緯をそのまま画像の中心の赤経赤緯として用いてしまうと WCS の決定に失敗する可能性があることになる。

ここで注目したいのが、ステップ 1 の WCS の書き込み精度と最終的なステップ 5 の WCS の決定精度の関係である。

表 3.1 は、2.3.3 の実験の `f_pointing-098R.fit` において、それぞれの $n_{extract}$ 、許容誤差 t に対するステップ 1 の WCS の書き込みにおけるマッチングした天体の個数を表す n_{match} の値である。 $n_{extract} = 27, 36, 50$ の結果のみ取り出してある。ここで注目したいのが表 2.5 で最終的に WCS の決定に成功している場合と失敗している場合でステップ 1 の n_{match} の値が大きく異なる点である。表 2.5 と表 3.1 とを比較するとわかるように、

2.00arcmin、4.00arcminがWCSの書き込みに失敗している場合であり、このときはステップ1の $nmatch$ が $nmatch \sim 2$ と他の赤経のずれの場合に比べ小さいことがわかる。

1回目の $n_{extract}$	許容誤差 t	赤経のずれ arcmin										
		0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00
27	5	16			12	10	9	7	3	4		
	10	16	2	2	12	10	9	7	6	5	3	
	15	16	2	1	12	10	9	7	6	5	3	
	20	16	3	3	12	10	9	7	6			
	25	16	3	3	12	10	9	5	6	5		
	30	16	3	3	12	10	9	5	5			
36	5	22			16	14	13	9	8	7		
	10	23	2	1	16	15	13	9	8	7	1	
	15	23	1	1	16	15	13	9	8	7	1	
	20	23	1	1	16	15	13	9	8	5		
	25	26	2	1	16	15	13	6	6	6	5	5
	30	23	1	1	15	15	13	7	7	7	7	7
50	5	24	2	1	19	17	15	12				
	10	25	2	1	19	18	16	13	11	9	9	1
	15	26	1	1	19	19	17	14	12	10		
	20	26	1	1	19	19	17	14	12	8		
	25	26	2	1	19	19	17	14	12	12		
	30	26	1	1	19	19	17	14	14	14	11	

表 3.1: 赤経方向のずれに対するステップ1のWCSの書き込みにおける $nmatch$ の値

以上から、ステップ1の $nmatch/nstar$ の値からステップ2以降の処理を行うかどうかを判断することが可能であることがわかる。

このことから、次のような手法が考えられる。ひとまず望遠鏡の目標視野中心の赤経赤緯を画像の中心の赤経赤緯とし、ステップ1のWCSの書き込みを試行として行う。その書き込み精度を表す $nmatch/nstar$ の値がよい場合は、その赤経赤緯でステップ2以降のWCSの書き込みのための計算を行う。精度が悪い場合は、望遠鏡から与えられた中心の赤経赤緯から周辺の赤経赤緯の値にシフトさせ、そのシフトさせた赤経赤緯を新たな画像中心の赤経赤緯としてステップ1のWCSの書き込みを試行として行う。この試行の結果、精度が良い場合は、その赤経赤緯でステップ2以降を行い、精度が悪い場合はさらに別の赤経赤緯にシフトさせ、試行を繰り返す。以上のようにグリッドサーチを行い、望遠鏡の導入精度に対応する。

ここで、問題となるのが、ステップ1までの WCS の書き込みにかかる時間である。表 3.2 は f_pointing-129R.fit に対して画像の中心の赤経赤緯を正確に与え WCS の決定に成功させる場合と意図的に異なる値を与え WCS の決定に失敗させる場合の各ステップまでの計算時間を比較したものである。測定精度は秒単位である。この表 3.2 からわかるように、ステップ1までの所要時間は WCS の決定に成功する場合も失敗する場合も数秒程度であるのでステップ1を数回行っても所要時間としては問題ないことがわかる。

	WCS の決定に成功する場合 [sec]	WCS の決定に失敗する場合 [sec]
ステップ1まで	0	2
ステップ2まで	1	3
ステップ3まで	1	14
ステップ4まで	2	1501
ステップ5まで	4	4877

表 3.2: WCS の書き込みに成功する場合と失敗する場合の時間経過

初期条件として与えられる画像中心の赤経赤緯の値は望遠鏡の目標視野の中心座標の赤経赤緯であり、これは 2arcmin 程度の誤差を含んでいる。したがって、画像中心の赤経赤緯の値が 2arcmin 程度のずれを含む場合も WCS の決定できる必要がある。このため、望遠鏡から与えられた画像中心の赤経赤緯を ± 2 arcmin 程度動かしてステップ1を試行し WCS を書き込めばよいと考えられる。ここでは、望遠鏡から与えられた画像中心の赤経赤緯のずれが 2arcmin 程度よりも大きい場合も考慮し、ステップ1で赤経赤緯を ± 2 arcmin、 ± 4 arcmin シフトさせ試行させることとした。WCS の書き込みを試行する赤経赤緯の順番は、図 3.2 のようにする。すなわち、与えられた望遠鏡からの目標視野中心の赤経赤緯 (α, δ) で試行し、次に (α, δ) から ± 2 arcsec の範囲で試行し、その次に (α, δ) から ± 4 arcsec の範囲で試行する。

次に、ステップ1の WCS の書き込みの試行を終了し、ステップ2以降の WCS の書き込みのステップに入る判断基準について考える。

表 3.1 から最終的に WCS の決定に失敗する場合、ステップ1の WCS の書き込みによる n_{match} は、 $n_{extract}$ の値に関わらず $n_{match} \sim 2$ 程度である。最終的に WCS の決定に成功する場合は、ステップ1の書き込みによる n_{match} は $n_{extract}$ の値が大きくなるにつれ増加する。よって、 $n_{extract}$ の値が大きい方がステップ1で WCS の書き込みに成功したか失敗したかの判断がしやすいことがわかる。したがって、ステップ1の $n_{extract}$

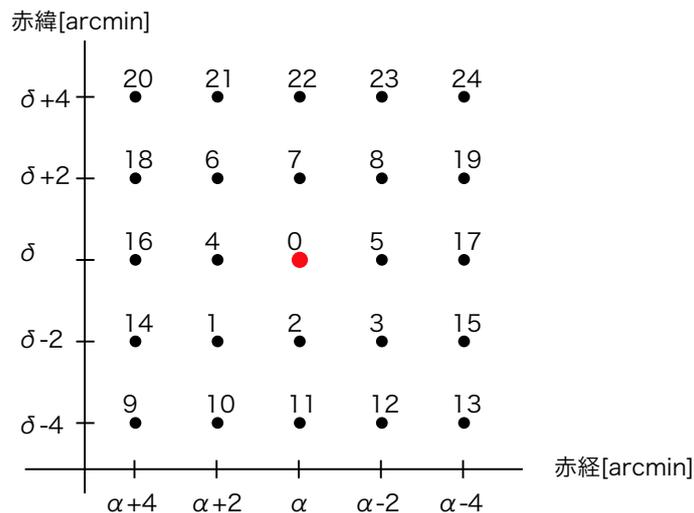


図 3.2: WCS の書き込みで試行を行う順番 赤丸: 望遠鏡から与えられた画像の中心座標の赤経赤緯

を $n_{extract} = 50$ とし、 $n_{match} \geq 12$ を与える赤経赤緯の場合、それ以降の WCS の書き込みの計算を行うこととする。ここで、 $n_{match} \geq 12$ としたのは表 3.1 からわかるように、 $n_{extract} = 50$ では $n_{match} \geq 12$ の場合、WCS の書き込みに成功しているためである。また、 n_{match}/n_{star} を判断基準に使用しなかった理由は、`imwcs` はカタログと照合しマッチングが悪い場合、カタログから参照する星の数を減らすことがあるため、 $n_{star} \leq n_{extract}$ となり、結果的に $n_{match}/n_{star} \geq n_{match}/n_{extract}$ となってしまう。 n_{match}/n_{star} を判断基準とするとこれによってステップ 1 の WCS の書き込み精度が悪いにも関わらず、 n_{match}/n_{star} の値が大きくなりステップ 2 以降の処理に入る恐れがあるためである。ここでは、あくまでいくつの天体がカタログと一致したかを判断基準にすることとした。したがって、 $n_{match}/n_{extract}$ 、すなわち $n_{extract} = 50$ と定数であるので、 n_{match} を判断基準とした。

また、 $n_{match} \geq 12$ となる赤経赤緯がなかった場合は、ステップ 1 で試行した 25 個の赤経赤緯の組み合わせの中で、 n_{match} を最大とする赤経赤緯を改めて画像中心の赤経赤緯としてステップ 2 以降の計算を行うこととした。初めからステップ 1 の n_{match} を最大とする赤経赤緯を用いステップ 2 以降を計算しないのは時間短縮のためである。

何かのトラブルによって望遠鏡の目標視野中心の赤経赤緯が大きくずれ画像の中心の赤経赤緯として与えられることがあった場合、WCS の決定を途中の段階で停止する必要がある。これは、表 3.2 からわかるように WCS の決定に失敗する場合は WCS の決定が終了するまでに長時間かかるためである。表 3.2 のステップ 2、3、4 までの所要時間が WCS

の決定に成功する場合と失敗する場合で異なるので、それぞれ次のステップに入る前に計算開始からここまでのステップの計算にある時間以上経過している場合はそれ以降の計算を停止するようにすることができる。

ここでは、ステップ2までに60秒以上、ステップ3までに300秒以上、ステップ4までに600秒以上費やした場合にその後の処理を停止することにした。表3.2と比較するとステップ2、3までの停止の時間設定が大きい値となっているが、これはWCSの決定に成功する場合と失敗する場合の時間差が10秒程度であり、PCの状況によってはこの程度のずれは生じると考えられるため、ここでの停止はあくまで予備的なものとしたためである。

3.1.5 $n_{extract}$ と許容誤差 t の決定

まず、ステップ1の $n_{extract}$ と許容誤差 t について考える。

2.3.3からわかるように、ステップ1の $n_{extract}$ は、 $n_{extract} = 10, 18$ とすると WCS を書き込むためには情報が少なくなるため問題があることがわかる。

$n_{extract} = 27, 36, 50$ に関しては、この中に最適値があるとは言えず、画像ファイルに関して異なった結果となっていることがわかる。したがって、 $n_{extract} = 27, 36, 50$ のうち最適値は決め難く、3.1.4で述べた試行時の判断基準のわかりやすさから $n_{extract} = 50$ とする。

ステップ1の許容誤差 t に関しては、2.3.3より許容誤差 $t = 10$ の場合が最も良いわけだが、これは天体のFWHMが4pixel程度であるため、ちょうど1つの天体を囲む大きさであり、よい結果が得られていると考えられる。ただし、`f_pointing-098R.fit` においては表2.5からわかるように許容誤差 $t = 10$ が最適値とは言えない。しかし、表3.1において $n_{extract} = 27$ で許容誤差 $t = 20, 25, 30$ の場合も赤経のずれが2.00arcmin、4.00arcminであるとき、最終的にはWCSは決定できているものの $n_{match} \sim 2$ であることから、許容誤差 $t = 20, 25, 30$ がWCSの決定に最適であるとは言いがたい。したがって、ここでは、ステップ1の許容誤差は $t = 10$ とする。

ステップ2以降の $n_{extract}$ については、高精度の書き込み処理を利用する場合、表2.2の(2)が最も精度よくWCSを決定できることがわかる。これは、カタログと参照を行う天体数が表2.2の(2)のときが最もよいということを意味している。このことは、カタログの天体の参照数が少ない場合は、WCSの決定が難しくなるためと考えられ、一方、参照数が多い場合は、逆に一致しない天体が増えるためと考えられる。以上から、ステップ2以降の $n_{extract}$ については表2.2の(2)でよいと考えられる。

3.1.6 座標に依存した誤認点の除去

WCS の決定において、SExtractor を使用し天体を検出する。したがって、2.4 で検討したように座標に依存した誤認点を除去する天体の検出方法を WCS の決定の手法の中にも取り入れたほうがよいと考えられる。

座標に依存した誤認点を除去するため、SExtractor で検出する際に、ピクセルの xy 座標が

$$2 < x < 1024 \quad , \quad 2 < y < 1024$$

の領域にある天体のみを選択し、その外側にあるものは除去する。

したがって、この条件を満たし、CCD の飽和レベルよりもフラックスが小さい天体の中から明るい順に天体を $n_extract$ 個選択し、カタログと照合することになる。

3.2 未同定天体の検出

3.2.1 2.4.1 の結果について

まず、画像の左端一列に検出された誤認点についてであるが、これは CCD カメラの読み出し側が画像の左側にあたり、そこからの漏れが画像にある程度の乱れを与え、SExtractor によって像として検出されているものと考えられる。

これに関しては、誤認点の座標が明確であるため、ピクセルの xy 座標が

$$2 < x < 1024 \quad , \quad 2 < y < 1024$$

の領域にある像のみを選択し、その外側にあるものは除去する。

次に、図 2.4 に見られる複数の画像ファイルで共通した誤認点の原因について考える。

これらの誤認点は、複数の画像で見られるため、その原因は、CCD カメラのホットピクセル、フラットフィールドに使用した画像の乱れが考えられる。

CCD カメラの性能実験によって調べられたホットピクセルと複数画像で共通の誤認点の座標は図 3.3 の通りである。

次にフラットフィールドとして使用した画像とその画像のフラックスの逆数をとった画像に対してそれぞれ SExtractor を利用して像の検出を行う。CCD カメラによって撮影された天体画像はリダクションの段階でフラットフィールドによって割られるので、フラットフィールドで像として検出された座標は天体画像では「谷」として現れ、フラット

フィールドのフラックスの逆数をとった画像で像として検出された座標は天体画像では「山」として現れると考えられる。これらは、天体画像を乱す原因となりうる。フラットフィールドとして使用した画像に対して SExtractor を利用して像として検出した座標と複数画像で共通の誤認点の比較は図 3.4 の通りである。

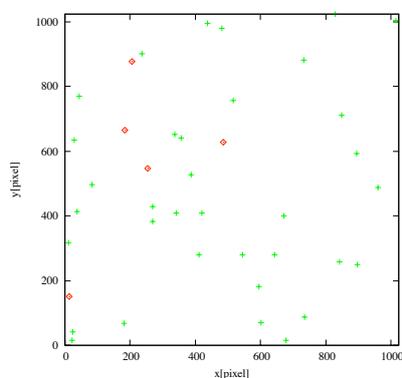


図 3.3: ホットピクセルと複数画像で共通した誤認点

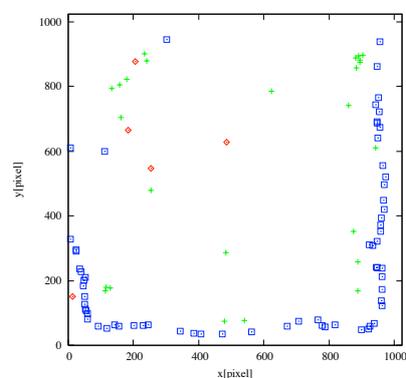


図 3.4: フラットフィールドによる「山」および「谷」と複数画像で共通した誤認点

この結果からわかるように、これらはホットピクセルともフラットフィールドの乱れとも関係していないことがわかる。したがって、これらは CCD カメラに付着した汚れなどによるものではないかと考えられる。

この誤認点はその座標が特定されているため、除去の方法はその座標から像を検出しないといった方法となる。しかし、2.4.2、2.4.3、2.4.5 の誤認点の除去の方法で、これらの複数の画像に共通な誤認点は除去されてしまうので、実際にはこれらの誤認点に対して座標を利用した除去方法はとっていない。

3.2.2 SExtractor で用いるフィルターの決定

2.4.3 の結果から SExtractor によって天体を検出するときに使用するフィルターについて考える。

前述したように、ガンマ線バーストを検出するという目的においてはより多くの天体を検出できることが望ましいので、mexhat フィルターではなく gauss フィルターを利用した方がよいことがわかる。しかし、このまま gauss フィルターを使用すると誤認点の数が多いため問題である。ここで、注目したいのが、それぞれのフィルターには誤認点の FWHM にある程度の偏りが存在しているということである。

表 2.9 をもとに、gauss フィルターについて誤認点を含まない FWHM の範囲をまとめると次の通りである。

- gauss_2.0_3x3.conv は、 $\text{FWHM} \leq 3.2\text{pixel}$
- gauss_2.0_5x5.conv は、 $\text{FWHM} \leq 3.1\text{pixel}$
- gauss_2.5_5x5.conv は、 $1.6\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 4.3\text{pixel}$
- gauss_3.0_5x5.conv は、 $1.6\text{pixel} \leq \text{FWHM}$
- gauss_3.0_7x7.conv は、 $1.7\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 3.8\text{pixel}$
- gauss_4.0_3x3.conv は、 $\text{FWHM} \leq 4.4\text{pixel}$

したがって、誤認点を含まない FWHM の範囲のフィルターを組み合わせ像の検出を行えば、天体の検出数を増やし、誤認点の数を減らすことができると考えられる。

なお、default.conv は誤認点の FWHM が広く分布するためこのように組み合わせで使用することには向いていない。

以上から、今回は、gauss_2.0_3x3.conv を用い $1.30\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 2.50\text{pixel}$ の範囲を検出し、gauss_2.5_5x5.conv を用い $2.50\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 4.30\text{pixel}$ の範囲を検出することにする。この組み合わせが最も天体の検出数をあげられる組み合わせのためである。

gauss_2.0_3x3.conv フィルターと gauss_2.5_5x5.conv フィルターの整合性について

gauss_2.0_3x3.conv フィルターと gauss_2.5_5x5.conv フィルターの整合性について考える。

これは、SExtractor はフィルターを用いてスムージングを行った後に像の検出を行うため、検出された像の座標、FWHM はそれぞれのフィルターに依存したものとなる。ただし、像のピークのフラックスの値はフィルターに依存しない。これは、画像において絶対的な測定値であるためである。座標、FWHM はこのピークのフラックスからフィルターでスムージングされ計算されているため、フィルターに依存したものとなっている。

画像ファイル f_pointing-061R.fit を用いて、検出した像の座標と FWHM の整合性について検証する。ここで画像ファイル f_pointing-061R.fit を用いた理由は、画像に写っている天体が多いためである。

結果は図 3.5 および表 3.3 の通りである。片方のフィルターによってしか検出されない像は除外してある。表 3.3 は FWHM $\sim 2.5\text{pixel}$ 付近を取り出したものであり、天体のみを選択してある。

図 3.5 から、FWHM に関する整合性は、全体的にとれているといえる。gauss_2.0_3x3.conv を用い $1.30\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 2.50\text{pixel}$ の範囲を、gauss_2.5_5x5.conv を用い $2.50\text{pixel} \leq \text{FWHM} \leq 4.30\text{pixel}$ の範囲を検出するため、図 3.5 の青線の左側または緑線の上側にある

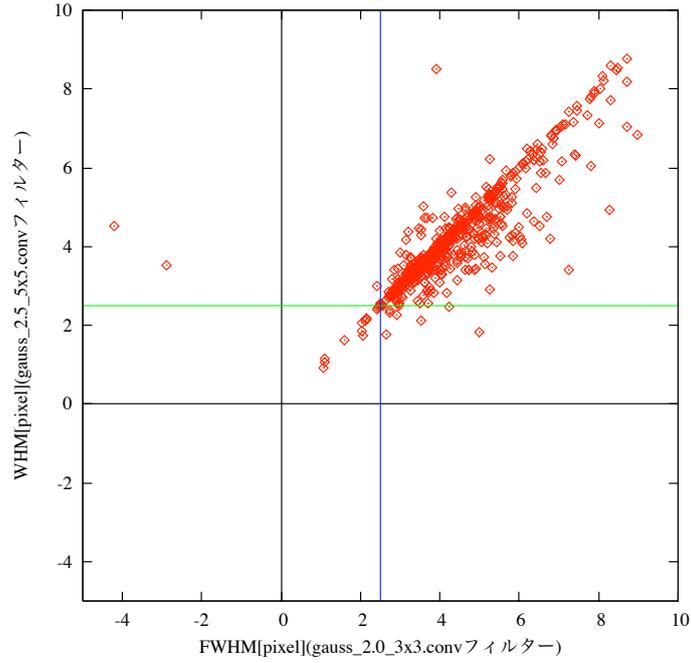


図 3.5: 各像に対する gauss_2.0_3x3.conv フィルターと gauss_2.5_5x5.conv による FWHM の比較

gauss_2.0_3x3.conv			gauss_2.5_5x5.conv		
FWHM[pixel]	x 座標 [pixel]	y 座標 [pixel]	FWHM[pixel]	x 座標 [pixel]	y 座標 [pixel]
2.47	48.138	865.939	2.46	48.155	865.925
2.47	128.108	856.462	2.51	128.024	856.475
2.49	133.852	989.152	2.49	133.855	989.153
2.50	731.524	888.133	2.57	731.514	888.228
2.52	141.160	596.128	2.49	141.187	596.173
2.53	602.642	915.384	2.53	602.644	915.385

表 3.3: gauss_2.0_3x3.conv フィルターと gauss_2.5_5x5.conv フィルターによる検出天体の FWHM および座標の整合性

像が検出されることがわかる。検出されない像は図 3.5 の青線の右側かつ緑線の下側にある像となる。このことから、フィルターを2つ用いることで検出されない像があることがわかるが、誤認点を減らし結果的に検出される天体数が多くなることが目標であるので、数個の像がもれてしまうのはやむを得ないと考えられる。また、2つのフィルター両方が検出する像（青線の左側かつ緑線の上側）があるが、この数は少ないことがわかる。ただ、2つにのフィルターによって検出されることに問題はない。

以上のように、2つのフィルターを分割し天体を検出しても多くの天体は検出されると考えられる。したがって、上記の2つのフィルターの連結を $\text{FWHM} = 2.50$ という同じ値にしてよいと考えられる。ここで連結部分の FWHM に幅を持たせないのは、誤認点を検出する確率を減らすためである。

また、ここで図 3.5 からわかるように `gauss_2.0_3x3.conv` では $\text{FWHM} \leq 0$ 、すなわち誤認点として検出されたにも関わらず、`gauss_2.5_5x5.conv` で $\text{FWHM} \geq 0$ と天体として検出される像が存在していることがわかる。このことから、`gauss_2.0_3x3.conv` で $\text{FWHM} \leq 1.30\text{pixel}$ である像は誤認点であるとし、その座標の像は除去したほうがよいと考えられる。

次に2つのフィルターで検出される像の座標について考える。

表 3.3 からフィルターが異なることによる検出される天体の座標のずれの平均を求めると、

$$\delta r = 0.0434 \pm 0.0166\text{pixel} = 0.0707 \pm 0.0271\text{arcsec}$$

であることが分かる。ここで、 $1\text{pixel} = 1.63\text{arcsec}$ である。これに対して参照を行うカタログである USNO-A 2.0 に掲載されている天体の位置精度は 0.3arcsec 程度であるので、カタログと参照する上で全く問題がないことがわかる。

3.2.3 2.4.1-2.4.5 の結果について

2.4.1-2.4.5 までの方法で、除去しきれなかった誤認点について考察する。

USNO-A 2.0 に掲載されていない天体による誤認

図 3.6 は、図 2.10 の座標 $(x, y) = (450, 450)$ 付近を拡大したものである。図において、USNO-B 1.0 に掲載されている全天体を表す青丸と USNO-A 2.0 との比較による誤認点を示す赤丸がよく一致していることがわかる。すなわち、この「誤認点」は誤認ではなく、

参照したカタログ USNO-A 2.0 に掲載されていない天体であることがわかる。今回ここで比較した USNO-B 1.0 は約 10 億個の天体が掲載されているカタログであり、約 5 億個の天体が掲載された USNO-A 2.0 よりも詳しいカタログとなっている。

したがって、この誤認点に関しては USNO-B 1.0 を比較するカタログとして用いることで問題は解決することがわかる。

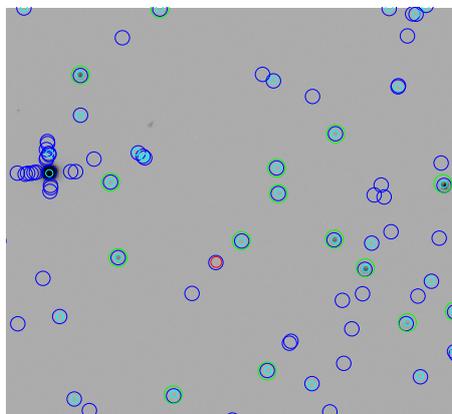


図 3.6: USNO-A 2.0 に掲載されていない天体による誤認の例 赤丸：USNO-A 2.0 との比較による誤認点 緑丸：検出された像のうち USNO-A 2.0 に掲載されている天体 水色丸：USNO-A 2.0 に掲載されている全天体 青丸：USNO-B 1.0 に掲載されている全天体

天体の固有運動による誤認

図 3.7 は、画像ファイル f_pointing-044R.fit に見られた天体が固有運動したことにより、検出に失敗した例である。すなわち、USNO-A 2.0 に掲載されている座標と現在の天体の座標が異なっているということである。

この解決方法としては、USNO-B 1.0 では天体の固有運動が掲載されており、これを考慮することによって現在の天体の座標を求め、参照することが可能である。図 3.7 から USNO-B 1.0 をカタログとして用いることは有効であることがわかる。



図 3.7: 天体の固有運動による誤認の例 左図: f_pointing-044R.fit 中図: 1953 年 DSS(Digitized Sky Survey) 画像 右図: 1997 年 DSS 画像 (赤丸: 像 緑丸: 検出した像のうち USNO-A 2.0 掲載天体 水色丸: USNO-A 2.0 全掲載天体 青丸: USNO-B 1.0 全掲載天体 [2005 年の座標] 黄色四角: 一辺が 1 分角)

第4章 まとめと今後の課題

4.1 WCSの書き込みについて

まとめ

今回開発した WCS の書き込みの流れをまとめると、図 4.1 となる。

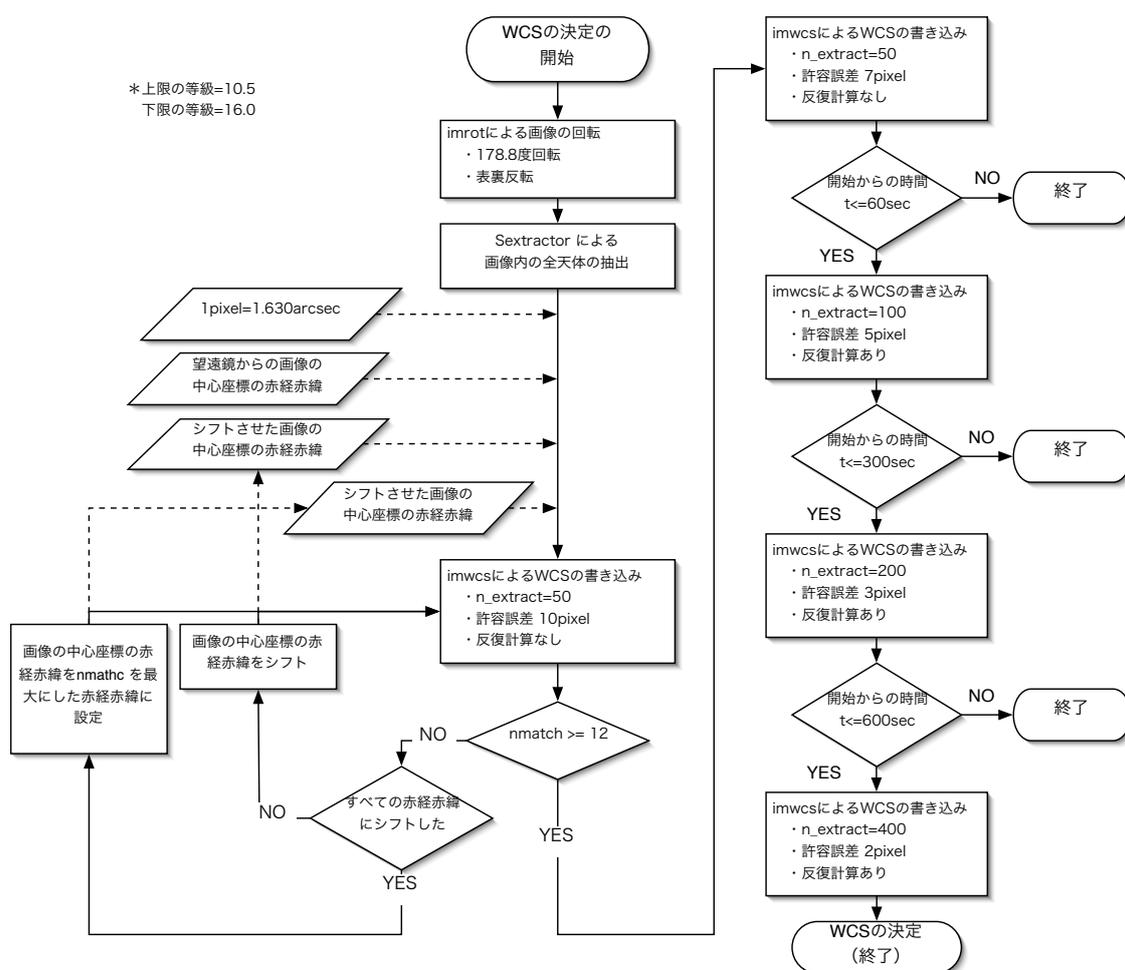


図 4.1: WCS 書き込みの流れ 画像の中心座標の赤経赤緯のシフトの方法は、図 3.2 参照
SExtractor で天体を検出するとき、誤認点を除くための座標の制限と CCD カメラの飽和レベルの制限を行う

結果

今回の開発による WCS の決定精度は表 4.1 の通りである。

画像ファイル	WCS の決定精度 $nmatch/nstar$
f_pointing-001R.fit	0.84
f_pointing-023R.fit	0.86
f_pointing-044R.fit	0.93
f_pointing-053R.fit	0.97
f_pointing-057R.fit	0.96
f_pointing-061R.fit	0.82
f_pointing-063R.fit	0.88
f_pointing-071R.fit	0.93
f_pointing-077R.fit	0.96
f_pointing-083R.fit	0.78
f_pointing-087R.fit	0.99
f_pointing-090R.fit	0.91
f_pointing-091R.fit	0.78
f_pointing-098R.fit	0.92
f_pointing-108R.fit	0.95
f_pointing-114R.fit	0.93
f_pointing-116R.fit	0.94
f_pointing-123R.fit	0.76
f_pointing-129R.fit	0.90

表 4.1: 開発した WCS の決定方法による WCS の決定精度

- 開発前に WCS 決定に失敗していた f_pointing-001R.fit の決定精度が $nmatch/nstar = 0.84$ となったのを始め、今回使用した全画像ファイルに対して、WCS の決定精度 $nmatch/nstar$ は同じままか向上している。
- WCS の書き込み精度は、0.6arcsec 程度となっている。
- 望遠鏡の導入精度は 4 分角まで対応することができた。

今後の課題

- ・ 極付近では画像が回転する恐れがあるため、回転した極付近の画像に対応させる必要がある。
- ・ 参照に利用するカタログを USNO-B 1.0 とすることで、より精度を向上できるのではないかと考えられる。
- ・ 下限の等級を今回は定数としてしまったが、これらを画像に依存させたほうがより精度が向上すると考えられる。
- ・ 今回は WCS の決定精度を $nmatch/nstar$ で評価したが、次は個々の天体の座標のずれをより詳細に調べることで、さらなる精度を求めることができると考えられる。

4.2 未同定天体の検出について

まとめ

今回開発した未同定天体の検出の流れをまとめると、図 4.2 となる。

結果

今回の開発による未同定天体の検出の結果は表 4.2 の通りである。

- ・ 表 4.2 から、14 枚の画像で誤認なし。
- ・ 天体の検出数は、表 2.9 で用いた画像ファイル `f_pointing-023R.fit` の場合、2 つのフィルターを用いても 102 天体を検出。

今後の課題

- ・ 未だに誤認する点の除去方法を考案する。
- ・ USNO-B 1.0 を使用しないと天体の検出に限界がある。これに対応させることで、より多くの天体、固有運動する天体に対応させる。

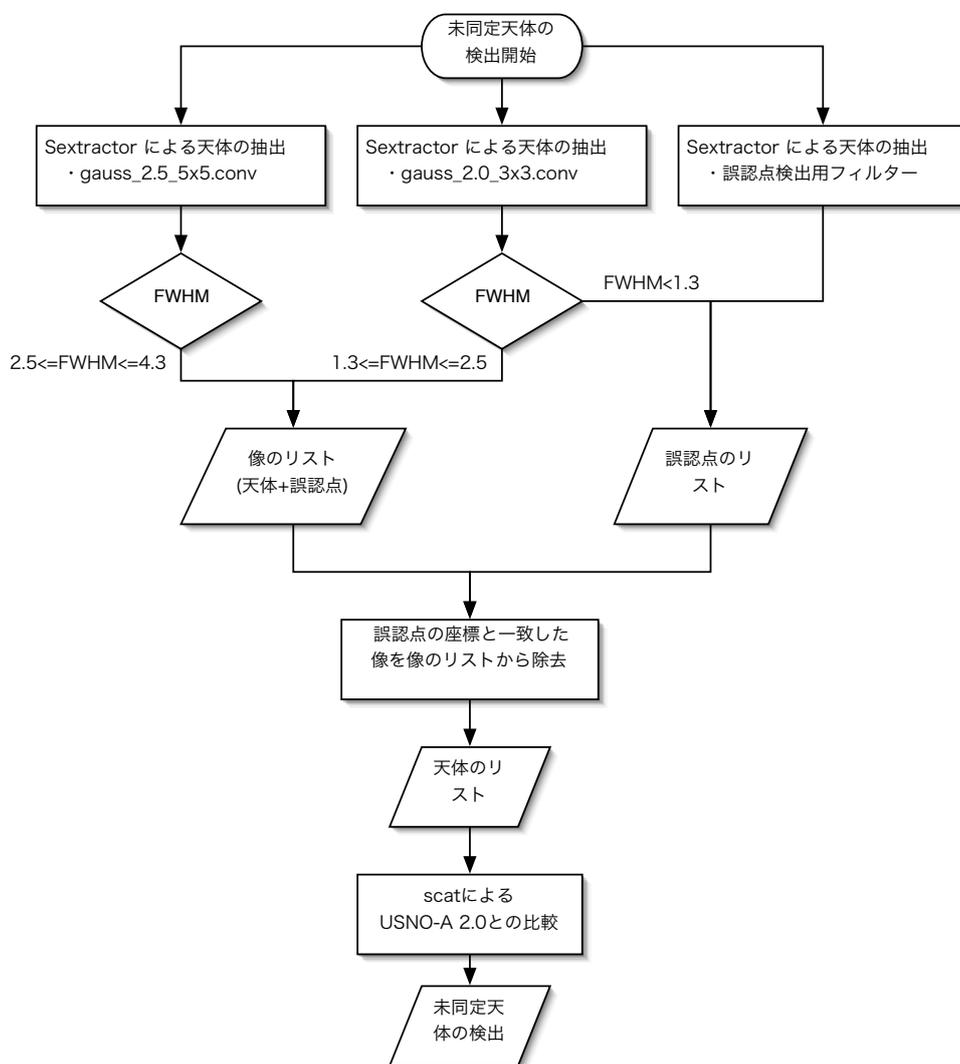


図 4.2: 未同定天体の検出方法の流れ SExtractor で天体を検出するとき、誤認点を除くための座標の制限、 $flag = 0$ の天体の選択を行う

画像ファイル	(1)UANO-A 2.0 との比較 による誤認点のうち UANO-B 1.0 に掲載 されている天体の数	(2)USNO-A 2.0、 USNO-B 1.0 両方 との比較による 誤認点の数	(3) USNO-A 2.0 との比較 による誤認点の数
f_pointing-001R.fit	0	1	1
f_pointing-023R.fit	0	0	0
f_pointing-044R.fit	1	0	1
f_pointing-053R.fit	0	0	0
f_pointing-057R.fit	0	0	0
f_pointing-061R.fit	0	1	1
f_pointing-063R.fit	1	0	1
f_pointing-071R.fit	5	0	5
f_pointing-077R.fit	0	0	0
f_pointing-083R.fit	0	0	0
f_pointing-087R.fit	0	0	0
f_pointing-090R.fit	47	1	48
f_pointing-091R.fit	7	0	7
f_pointing-098R.fit	2	1	3
f_pointing-108R.fit	3	0	3
f_pointing-114R.fit	11	1	12
f_pointing-116R.fit	1	0	1
f_pointing-123R.fit	0	0	0
f_pointing-129R.fit	0	0	0

表 4.2: USNO-A 2.0 との比較による誤認点の個数 (1)+(2)=(3) である

付録A SExtractorの使い方

\$HOME/sex/以下にパラメータの設定ファイルである daofind.sex、カタログに出力するパラメータを決定する daofind7.param、スムージングのためのフィルター default.conv をおき、

```
sex -c $HOME/sex/daofind.sex -PARAMETERS_NAME $HOME/sex/daofind7.param  
-FILTER_NAME $HOME/sex/default.conv -CATALOG_NAME sex.cat
```

を実行する。抽出した天体のリストが sex.cat として出力される。

関連図書

- [1] 佐藤理江 修士論文 2004
- [2] 谷津陽一 修士論文 2005
- [3] 横尾武夫 “新・宇宙を解く”
- [4] 天体情報処理研究会 “FITSの手引き 第4.1版”
- [5] Larry Wall and Randal L. Schwartz ”Perl プログラミング”
- [6] Klebesadel, Strong & Olson 1973
- [7] Meegan et al. 1992
- [8] Groot et al. 1997
- [9] van Paradijs et al. 1997
- [10] E. BERTIN ”SExtractor v2.3 User’s manual”

謝辞

卒業論文を書くにあたって、始終ご指導してくださいました指導教官である河合誠之教授に深く感謝いたします。

また、望遠鏡に関して全くの素人である私にアドバイスをしてくださった谷津さん、佐藤さんありがとうございます。

最後に、渡辺・河合研究室において様々な面でお世話になりました研究室のみなさまありがとうございます。