

法政大学二連望遠鏡HOTATEによる突発天体検出システムの構築

KARASAWA, Azumi / 唐澤, 安曇

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

61

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2020-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022922>

法政大学二連望遠鏡 HOTATE による 突発天体検出システムの構築

CONSTRUCTION OF A TRANSIENT SOURCE DETECTION SYSTEM
FOR HOSEI TWIN ASTRONOMICAL TELESCOPE

唐澤安曇

Azumi KARASAWA

指導教員 田中幹人, 八木雅文

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻創生科学系修士課程

I constructed a transient source detection system for HOsei Twin Astronomical Telescope (HOTATE). The system consists of three steps: data reduction of an observed image, search for a past image at the same region as the observed image and subtraction of the past image from the observed image. Transient sources are searched in the difference image. In subtraction, I processed alignment and point spread function matching. Then, the system was tested with simulated stars. As a result, alignment accuracy is 0.41 ± 0.25 pixel, limiting magnitude of detected simulated stars is 16.8 mag in V-band and the success rate of detection is 93%. In addition, I assessed the performance of HOTATE for the photometry of transient sources. Although 108 galaxies were observed over four months, no transient source was detected.

Key Words: *Transient sources*

1 研究の背景と目的

法政大学小金井キャンパス西館屋上には、30cm 反射望遠鏡と 13cm 屈折望遠鏡を一つの赤道儀に同架した二連望遠鏡(HOSEI Twin Astronomical Telescope : HOTATE)が設置されている。HOTATE は既存の天体現象の確認や観望会で用いられているが、新たな知見が得られるような研究は行われていない。HOTATE のような小口径望遠鏡は、すばる望遠鏡をはじめとする大口径望遠鏡と比べた場合に観測可能な等級、観測精度で大きく劣る。一方で自由に天体を観測できるという強みを持つ。そのフットワークの軽さを活かすことができる研究が超新星などの突発天体の検出である。

本研究では、突発天体、その中でも超新星の検出を目的としたシステムを構築する。HOTATE で観測できる超新星は近傍のものに限られるが、今まで観測されていなかった事例が近傍の超新星で発見されることがある。そのような超新星を HOTATE を用いて発見し、詳細な研究が可能な望遠鏡に追観測を行ってもらい流れの第一段階として本研究を位置付ける。

2 検出システム

本研究では観測画像の処理に Python を使い、プログラムの実行に Shell Script を用いた。

HOTATE で観測された画像は研究室のサーバー内に保

存され、翌日に天候の情報と WCS (World Coordinate System) の情報が付与される[1]。ここまでの 2016 年度卒の大橋氏が開発したシステムであり、私の突発天体検出システムは大橋システムによって出力された画像 (以下 *observed image* と呼称) を利用する。私の構築したシステムは、*observed image* の画像整約・*observed image* と同様の領域を観測した以前の画像 (以下 *past image* と呼称) の検索と *past image* の画像整約・画像整約済み *observed image* と画像整約済み *past image* の差分画像出力の 3 段階で構成される。*observed image* に突発天体が存在していた場合、突発天体のみが差分画像上に残る。

(1) 画像整約

画像整約では、バイアス引き、フラット補正、スカイ引きを行う。画像整約済みのデータは、天体の光度曲線を求める際や天体画像の三色合成を行う際などにも利用することができる。

(2) アーカイブシステムによる *past image* 検索

past image の検索には、望月氏が開発を行ったアーカイブシステムを利用した。アーカイブシステムでは、観測日時・天体名・赤経赤緯等の様々な条件で検索ができる。*observed image* の中心の赤経赤緯で検索を行うことで、その座標を含む画像の保存場所が出力される。*past image* が存在する場合には、*past image* の画像整約を行う。

(3) 差分画像出力

星を観測した際に得られる像の形状を PSF(Point Spread Function)と呼ぶ。PSF の画像上の広がり (星像サイズ) の理想的な大きさは回折限界 (観測に用いた光の波長を λ , 望遠鏡の口径を D とした時, 回折限界は約 $1.22\frac{\lambda}{D}$ [rad]) であるが, 地上観測では大気の揺らぎがあるため星像サイズは回折限界よりも広がる。大気の揺らぎによる星像サイズをシーイングと呼ぶ。

差分画像出力では, observed image と past image の差分を取ることで 2 枚の画像に共通する星が消え, 突発天体が画像に残ることを目指す。しかし, それぞれの画像は, 画像中心の赤経赤緯・露出時間・シーイング等が異なっていることがほとんどである。それらの条件が異なっていると, そのまま差分を取っても共通する星が消えずに残ってしまう。そのため, 位置合わせと PSF (Point Spread Function) 補正を行うことで, 差分を取った際に共通する星が消えるようにする。

a) 位置合わせ

本研究では, 画像を Python の Numpy モジュールを用いて array 形式でピクセルのカウント値を読み込んでいる。そのため, 行と列の追加, 削除では小数点以下の平行移動はできない。小数点以下の値で平行移動させるために sinc 関数の畳み込みを用いた。また, observed image と past image で CCD カメラが回転している場合には, 画像の平行移動だけでは位置が合わないため, 回転の修正を行う必要がある。位置合わせのための平行移動量と回転角は, observed image と past image 上の天体の座標から求めた。

平行移動について, 各ピクセルでのカウント値 $f(x_i)$ を Δx だけ移動させたカウント値 $g(x_i)$ は,

$$g(x_i) = \sum_j f(x_j) \frac{\sin(\pi(x_i - x_j + \Delta x))}{\pi(x_i - x_j + \Delta x)} \quad (1)$$

で与えられる。この sinc 関数のカーネルを作成し, 画像のピクセル値を畳み込むことで小数点以下の位置合わせを行った。回転については, Python の Scipy モジュールを用いて修正を行った。

2020 年 1 月 20 日に観測した 25 個の銀河について, 位置合わせの精度を調べた結果,

$$0.41 \pm 0.25 \text{ [pixel]} \quad (2)$$

であった。25 個の画像の内, 24 個の画像において 1pixel 未満, 16 個の画像について 0.5pixel の精度で位置合わせができていたことが確認できた。

b) PSF 補正

PSF は望遠鏡や観測装置の収差, 回折の影響を受ける。地上の望遠鏡の場合には大気の揺らぎや大気分散により

PSF が広がる。PSF が合致しない星同士では星が消えずに誤検出されてしまうため, observed image と past image で PSF を合わせる必要がある。PSF の横方向の広がりであるシーイングは一般に PSF の Full-Width Half Maximum (FWHM) で表される。PSF はガウシアンで近似できるため, 異なるガウシアンを畳み込むことで, FWHM を合わせ, シーイングの補正を行った。ガウシアンの標準偏差 σ と FWHM の間には,

$$\text{FWHM} = 2\sigma\sqrt{2\log_e 2} \quad (3)$$

の関係がある。これを利用して, FWHM を σ に変換した。画像のカウント値は露出時間や雲の有無によって変化する。2 枚の画像で共通の星のカウント値が一致するように定数倍することでカウント値の補正を行った。

c) 差分画像の天体検出

observed image (図 1) と past image (図 2) について, 位置合わせと PSF 補正を行った様子を図 3~図 5 に示す。

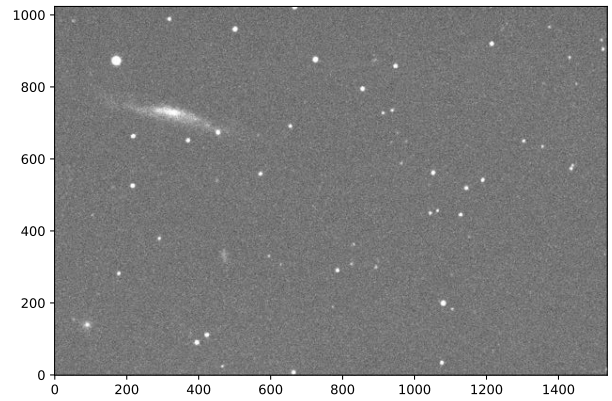


図 1 observed image

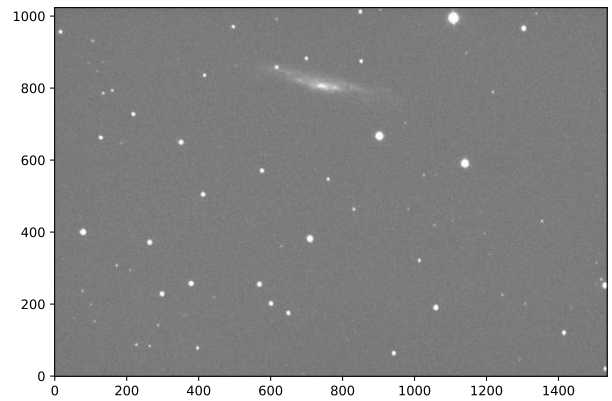


図 2 past image

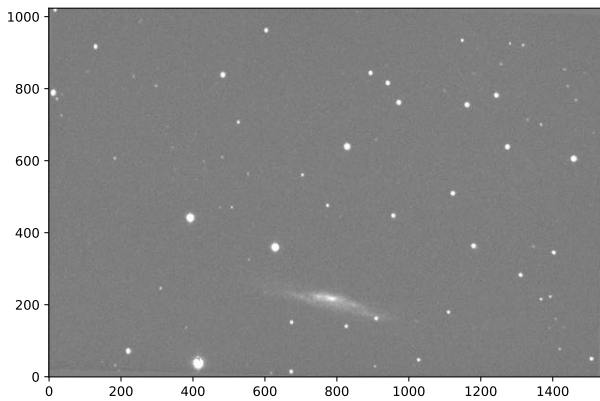


図 3 past image を時計回りに 178.6° 回転させた画像

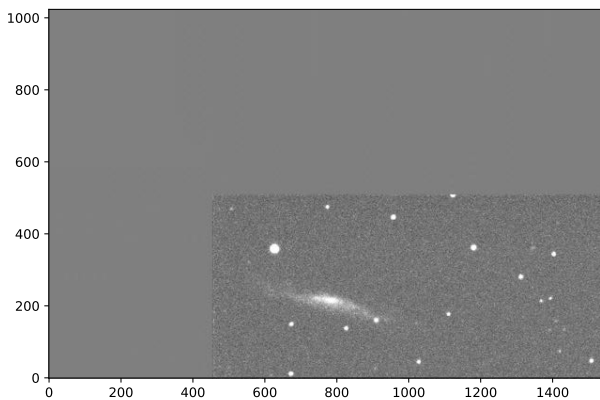


図 4 observed image を右に 455.7, 下に 512.7 移動させた画像

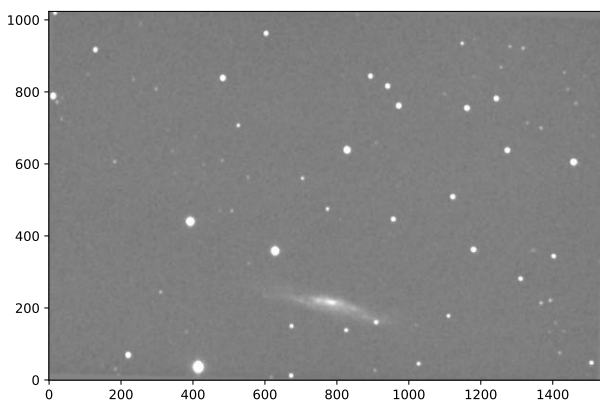


図 5 図 3 に対して PSF 補正を行った画像

図 1 と図 2 では銀河の位置がずれており、上下が反転していたが、図 3 と図 4 では位置合わせと回転によって、銀河の位置が横軸 800, 縦軸 200 付近で揃っていることが確認できる。図 5 にて PSF 補正も終了したため、図 4 と図 5 の差分画像を図 6 に示し、差分画像に対して天体検出ソフトウェアを使用し天体を検出した図 7 を示す。

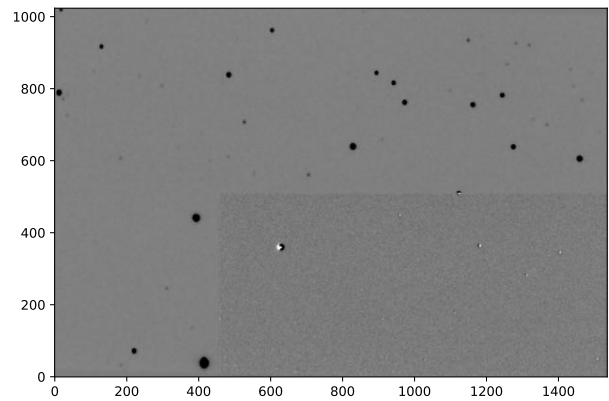


図 6 observed image(図 3)と past image(図 5) の差分画像

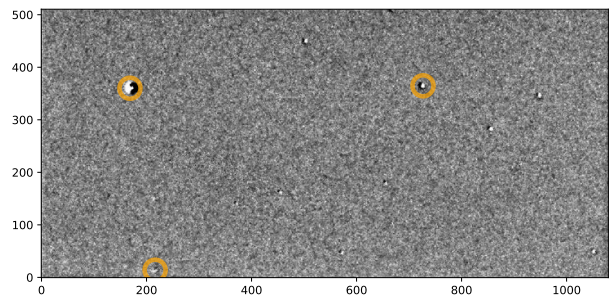


図 7 observed image(図 3)と past image(図 5)の共通領域の差分画像. 天体検出ソフトウェアで検出された突発天体候補をオレンジで示す.

図 7 では天体検出ソフトウェア (Source Extractor : SExtractor[2]) を用いた結果, 検出された突発天体候補をオレンジで示している. 図 7 の突発天体候補は observed image と past image の両方に存在している天体である. 2 枚の画像で共通しているにも関わらず, うまく消えずに検出されてしまった天体であるため, 突発天体ではない. 本研究では, 突発天体ではないにも関わらず検出されることを誤検出と呼ぶ. 画像内のシーイングのばらつき・位置合わせ精度・画像に張られている赤経赤緯の精度等によって消えない天体が幾つか出てきてしまうため, 誤検出を完全に無くすことは難しい. そのため, 現状では最後に人が目で見て突発天体か誤検出かを判断している.

(4) 性能評価

observed image に 13~17 等相当の擬似天体を 60 個追加し, 検出性能の評価を行った. その結果,

- 検出率: 93% (56/60 個)
 - 検出限界等級: 16.8 等 (V バンド)
 - 人の目で判断した誤検出数: 4 個
- という結果が得られた.

3 測光校正

測光校正では、observed image 内の測光標準星の等級を調べることで、突発天体の等級の決定に必要な色補正係数・等級原点・大気減光係数を決定する。測光標準星とは天体カタログで等級が既知である星を指す。

(1) 等級原点

等級原点とは、画像のカウント値と見かけの等級を紐付ける値のことである。測光標準星のカウント値を f 、測光標準星の見かけの等級 m (カタログにより既知) とすると、等級原点 m_0 は以下の式で与えられる。

$$m_0 = m + 2.5 \log_{10} f \quad (4)$$

等級原点 m_0 が求まると、等級を調べたい天体のカウント値を式(4)の f に代入することで、見かけの等級 m を求めることができる。

(2) 大気減光

地上から天体を観測する場合には、大気による光の吸収・散乱は避けられず、これを大気減光と呼ぶ。減光の等級変化は大気の厚さ(エアマス)に比例し、エアマスは天頂角 z によって変化する。

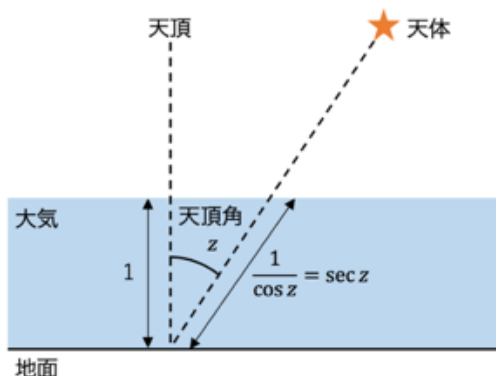


図8 平行平板であると仮定した大気の厚さ

天体の天頂角が 60 度未満であれば、大気は平行平板であると近似でき、エアマス $F(z)$ は、

$$F(z) = \sec(z) \quad (5)$$

で表される。

(3) APASS カタログによる色補正

観測は観測者それぞれが固有のシステムを利用している。そのため、同じ天体を同じバンドで観測した場合でも、観測者毎に異なる等級が得られる。このままでは他の研究との比較ができないため、観測者のシステムの等級を、基準となるシステムの等級に変換する。本研究では、The AAVSO Photometric All-Sky Survey (APASS)[3] の測光標準星を利用した。HOTATE の広帯域フィルターシステムは Johnson/Bessell の B, V, R, I であり、APASS のフィルターシステムは Johnson の B, V と SDSS の r', i' である。 B, V については HOTATE と APASS で似たシステムであるため、APASS の色指数 $(B - V)$ に対して HOTATE

で観測した等級に傾向があるか確認した。 R, I については Lupton(2005)[4] の関係式(6),(7)が適用できるか確認した。

$$R = r - 0.2936(r' - i') - 0.1439 \quad (6)$$

$$I = r - 1.2444(r' - i') - 0.3820 \quad (7)$$

HOTATE 等級と APASS 等級の差、APASS の色指数として、 B, V, R, I について調べた結果、

$$B_{HOTATE} - B_{APASS} = -0.069(B - V)_{APASS} - 18.437 \quad (8)$$

$$V_{HOTATE} - V_{APASS} = -0.079(B - V)_{APASS} - 19.863 \quad (9)$$

$$R_{HOTATE} - r'_{APASS} = -0.194(r' - i')_{APASS} - 19.833 \quad (10)$$

$$I_{HOTATE} - i'_{APASS} = -1.083(r' - i')_{APASS} - 18.94 \quad (11)$$

であった。 B, V については式(8),(9)より、傾きがそれぞれ $-0.069, -0.079$ である。そのため、補正を行わない場合、HOTATE における等級が同じでも、 $B - V = 0$ の星と $B - V = 2$ の星では約 0.015 等のずれが生じてしまう。 R, I については式(10),(11)より、傾きがそれぞれ $-0.194, -1.083$ であった。式(6),(7)より、Lupton(2005)における傾きが $-0.2936, -1.2444$ であるため、HOTATE における等級が同じでも $r' - i' = 0$ の星と $r' - i' = 2$ の星では約 0.2 等のずれが生じる。本研究の目的である突発天体の検出においては 0.2 等の精度は必要ではないが、今後 HOTATE を用いて測光を行う状況を考えて、補正をして等級原点と大気減光係数を調べた。

(4) HOTATE の等級原点と大気減光係数

HOTATE の等級原点と大気減光係数を求めるために、天体検出ソフトウェアを用いて画像上の星を検出し、その中の APASS 標準星を同定する。同定した星を測光し、式(8)~(11)で求めた補正係数を用いて等級に変換し、APASS の等級と比較することで等級原点を算出した。 B, V, R, I について 2016 年 2 月から 2020 年 1 月までに観測した画像毎に等級原点を求め、横軸を $\sec(z)$ 、縦軸を等級原点としてプロットした(図 9~図 12)。プロットした中で雲の影響を受けていると考えられる点を除き、robust 回帰を用いて等級原点と $\sec(z)$ との関係式(図中の青線)を求めた。減光による等級変化はエアマスに比例するため、関係式は一次関数で表され、その傾きが大気減光係数である。

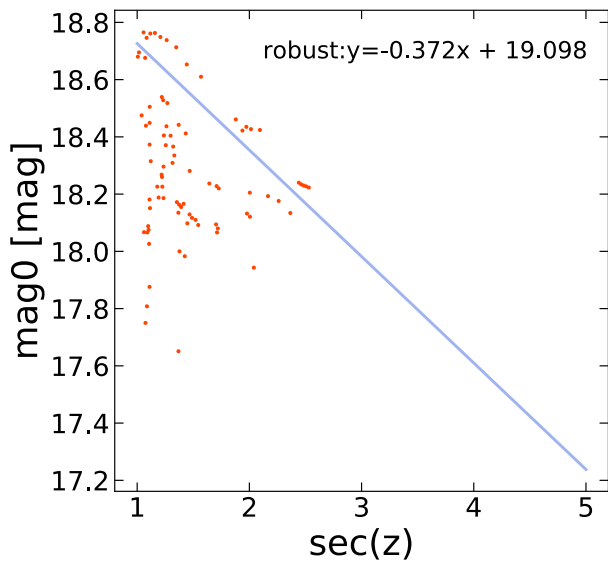


図9 Bバンドのsec(z)と等級原点の関係

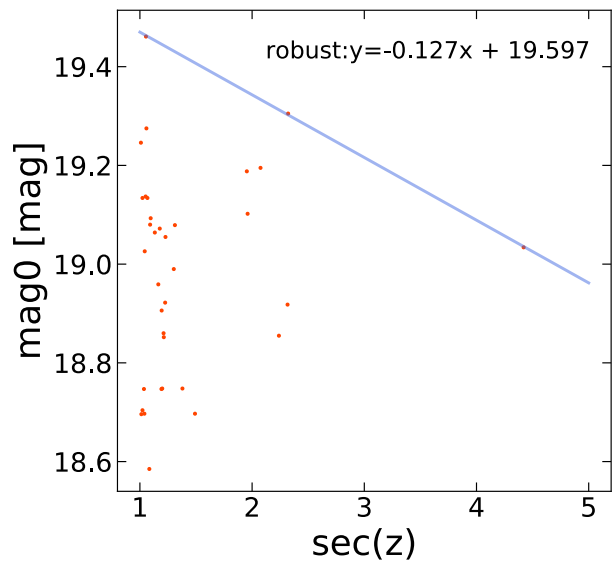


図12 Iバンドのsec(z)と等級原点の関係

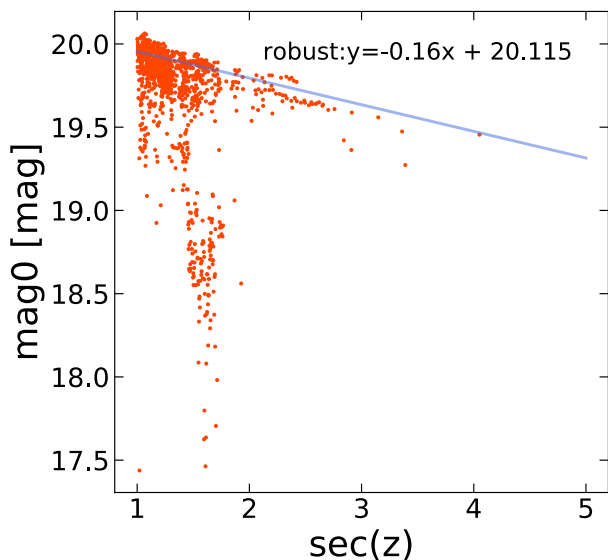


図10 Vバンドのsec(z)と等級原点の関係

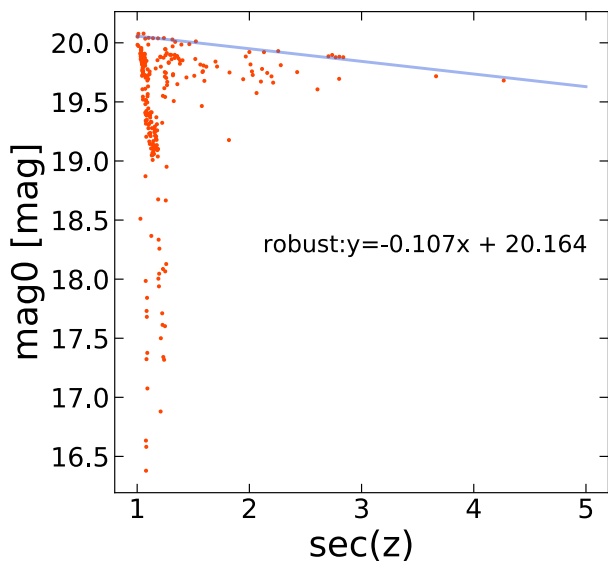


図11 Rバンドのsec(z)と等級原点の関係

図9～図12の関係式の傾きが大気減光係数，切片が等級原点である．バンド毎に等級原点と大気減光係数をまとめ，表1に示す．

表1 HOTATE の等級原点と大気減光係数

バンド	等級原点 [mag]	大気減光係数 [mag/sec(z)]
<i>B</i>	19.1	0.37
<i>V</i>	20.1	0.16
<i>R</i>	20.2	0.11
<i>I</i>	19.6	0.13

4 観測

Caswell[5]や Tammann[6]の研究から，一つの銀河における超新星の発生頻度を約50年に一度と仮定する．超新星の極大期間を10日間と考えた場合，ある一つの銀河を1回観測した際に超新星を検出する確率は，

$$\frac{10}{50 \times 365.24} \approx 0.055 [\%]$$

である．また，ある一つの銀河について10日毎の観測を12回(120日間，約4カ月)続けた場合に超新星を検出する確率は，

$$1 - \left(1 - \frac{10}{50 \times 365.24}\right)^{12} \approx 0.66 [\%]$$

である．そのため，超新星を検出するためには一つの銀河を長期間観測するだけではなく，多くの銀河を長期間観測する必要がある．冬至の東京の日の入り時刻16時半，日の出時刻6時50分であり，空が暗くなるまでの時間を

考えると、観測可能時間は最大 13 時間である。一つの銀河の観測には 10～20 分かかるため、一晩に観測できる銀河は 40～80 個である。本研究では堀川氏の研究と観測時間を分け合ったため、一晩で観測した銀河数は約 30 個であった。一晩 30 個の銀河の観測を 10 日毎に行い、これを 4 カ月間続けた場合、超新星を検出する確率は、

$$1 - \left\{ \left(1 - \frac{10}{50 \times 365.24} \right)^{12} \right\}^{30} \approx 18 [\%]$$

となり、現実的に超新星の観測が期待できる確率となる。本研究では、超新星検出を目的とした観測を 2019 年 10 月から 2020 年 1 月の 4 ヶ月間に渡り行い、合計 108 個の銀河について、365 回の観測を行ったが、超新星の検出には至らなかった。

5 結論

本研究では、HOTATE で観測した画像から、突発天体を検出するシステムを構築した。検出システムは 3 段階で構成されている。1 段階目は、observed image の画像整約である。2 段階目では、画像整約済み observed image の赤経赤緯を用いてアーカイブから past image を検索する。past image が存在する場合は、past image についても画像整約を行う。3 段階目では、observed image と past image の差分を取り、天体検出ソフトウェアで突発天体候補を検出する。差分を取る際には、2 枚の画像間の位置合わせと PSF 補正を行う。位置合わせでは、小数点以下の精度で合わせるために、sinc 関数の畳み込みを利用した。sinc 関数による位置合わせの精度は 0.41 ± 0.25 [pixel] であり、1pixel 未満の精度で位置合わせができていることが確認できた。PSF 補正にはガウシアン畳み込みを用いた。擬似天体を利用しシステムの性能評価を行ったところ、擬似天体の検出率が 93%、検出限界等級が 16.8 等(V バンド)であり、誤検出数は 4 個であった。

また、画像整約システムを利用し、2016 年 2 月から 2020 年 1 月の期間に観測した画像の画像整約を行い、APASS カタログを用いて等級原点、大気減光係数を求めた。

突発天体検出を目的とした観測を 2019 年 10 月から 2020 年 1 月の 4 カ月間行ったが、突発天体の検出には至らなかった。

謝辞

指導教員である田中先生には 2 年間お世話になりました。新しく赴任して来られたにも関わらず、私たちを快く受け入れてくださり、とても感謝しています。私が修士課程を無事過ごすことができたのは田中先生のおかげです。先生には、恒星の進化や銀河考古学といった分野に興味を抱くきっかけを頂きました。これからも私なりに天文に関わりたいと思います。ありがとうございました。八木先生には、検出システムのアルゴリズム設計から測光校正まで、多くの助言をいただきました。修士課程に入るまで私は本格的にプログラムを書いたことがありませんでしたが、八木先生のおかげでシステムを完成させることができました。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 大橋龍太郎, 木原直樹, 吉田尚洋, 山田龍之介, 伊藤綾香, 福島広大, 岡村定矩, 八木雅文「法政大学二連望遠鏡の遠隔操作システム構築と性能評価」2017
- 2) E.BERTIN 「SEXTRACTOR v2.13 User's manual」
<https://www.astromatic.net/pubsvn/software/sextractor/trunk/doc/sextractor.pdf>
(閲覧日: 2020 年 1 月 21 日)
- 3) Henden, Arne A., Welch, D.L., Terrell, D., Levine, S.E. :The AAVSO Photometric All-Sky Survey(APASS), American Astronomical Society, 41, 669, 2009
- 4) :Transformations between SDSS magnitudes and other systems,
<http://www.sdss3.org/dr8/algorithms/sdssUBVRITransform.php>, (閲覧日: 2019 年 6 月 24 日)
- 5) Caswell, J.L. :The Frequency of Supernovae in our Galaxy, Estimated from Supernova Remnants Detected at 178 MHz, Astronomy and Astrophysics, 7, 59, 1970
- 6) Tammann, G.A., Loeffler, W., Schroeder, A. :The Galactic Supernova Rate, Astrophysical Journal Supplement, 92, 487,1994