

# かなた望遠鏡による情報理論・機械学習を用いた自動意思決定システムの構築及び性能評価

古賀柚希, 植村誠(広島大学), 池田思朗(統計数理研究所), 加藤太一, 野上大作, 磯貝桂介, 小路直冬, 田口健太(京都大学), 前原裕之(国立天文台)

## システム

### 研究背景

新星・矮新星などの突発現象を起こす天体は、その発見時には天体の型の不確実性が高く、専門家の判断に伴う適切な追跡観測の判断・実行が要される。情報理論や機械学習の枠組みを用いて、これらを自動化するシステムが構築できれば、激変星のより効率的な研究が行えることが期待できる。

→ **キーワード：情報エントロピー** 不確実性を表す量で、定義を右に示す。  
 $p(k)$  は  $k$  である確率、 $k$  は今回の場合は「天体の型」を表す。

$$S = - \sum_k p(k) \log_2 p(k)$$

### システムの全体像

1. 突発現象が報告されるASAS-SN,ZTF, TNS,TOCPの4つのデータベースを見張る。  
 ・ASAS-SN:超新星の発見を目的とした、オハイオ州立大学を中心とする研究グループのプロジェクト  
 ・ZTF:カリフォルニア工科大学などが参加するプロジェクト  
 ・TNS:ZTF,Gaia,Master等、様々なプロジェクトから報告される  
 ・TOCP:アマチュア発見の明るい天体が報告され、速報性が高い
2. カタログ(表1)から既知天体と照合する。既知天体の場合は観測対象にしない。
3. 新天体の情報(表2)をオンラインデータベース(Vizier)から収集する。
4. 事前に用意してある教師データから判別モデル(SMLR)を構築、 $p(k)$ を得る。
5.  $p(k)$ と、事前に用意した $p(x_i|k)$ から**相互情報量**を計算し、追跡観測のモード*i*を決定する。  
 →  $i = B-V$ (色)、 $\log EW$ (輝線の等価幅)、 $dm/dt$ (連続観測)
6. 時刻、天体位置、天気などのステータスを確認する。
7. 観測可能であれば望遠鏡を駆動させる。

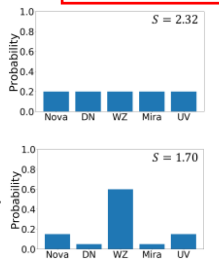


図1:情報エントロピーでの評価例

変光星カタログ	AAVSO VSX、ATLASから2秒以内
銀河カタログ	NGC、GLADE、SDSS DR8 galaxiesから5分以内
AGNカタログ	WISE AGN、FIRST-NVSS-SDSS AGN sample catalog、Blazar Radio and Optical Surveyから2秒以内

表1:照合カタログ

全てのサンプルで利用可能	銀経(l)、銀緯(b)
静穏時対応天体があれば利用可能	振幅(Amp)、色(g-r, r-i, i-z)
近赤外線対応天体があれば利用可能	色(J-H, H-L, I-K)
X線対応天体があれば利用可能	HR(HR1, HR2)、X-Opt
距離が分かれば利用可能	距離(d, kpc)、銀河面距離(gal_abs_z)、極大絶対等級(AbsMag_out)、静穏時絶対等級(AbsMag_qui)、バンド絶対等級(AbsMag_J)

表2:特徴量

### 相互情報量について

天体発見直後の情報エントロピー $S_0 = - \sum_k p(k) \log_2 p(k)$ 、追跡観測で観測量 $x_i$ が得られた場合の情報エントロピー $S_{x_i} = - \sum_k p(k|x_i) \log_2 p(k|x_i)$ 、ベイズの定理などを用いて計算された $S_{x_i}$ の平均的な情報エントロピー

$$S_i = \int p(x_i) S_{x_i} dx_i = - \int \sum_k p(k|x_i) p(x_i) \log_2 p(k|x_i) dx_i = - \int \sum_k p(x_i|k) p(k) \log_2 \frac{p(x_i|k)p(k)}{p(x_i)} dx_i$$

を用いて計算される $M_i = S_0 - S_i$ を**相互情報量**といい、これを最大化する追跡観測を行うことになる。

### 本研究の目的

現段階で、「システムの全体像」における1~5については開発済みであり、試験運用をしてシステムの型判別精度及び追跡観測判断の妥当性を調べる。

## 試験運用の結果

### 型判別精度及び追跡観測判断の妥当性

成功例→天体：AT2021jk

銀経	192.720374
銀緯	8.130248

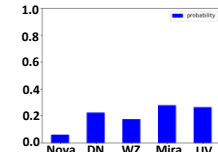


図2:確率分布p(k)

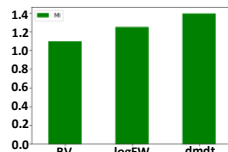


図3:相互情報量M\_i

表3:得られた特徴量

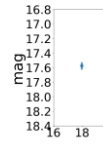


図4:明るさの時間変化

減光速度 $\sim 0.1 \text{ mag/day}$ はSU UMA型矮新星の特徴  
 ↓  
 アウトバースト初期に型特有の明るさの振動  
 ↓  
 連続観測で捉えられたか

観測！  
 ↓  
 ↓

失敗例→天体：ASASSN-21no

銀経	42.781769
銀緯	-18.591047
振幅	7.883900
色(g-r)	0.002500
色(r-i)	0.080300

表4:得られた特徴量

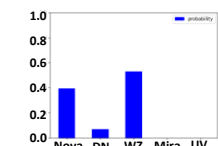


図5:確率分布p(k)

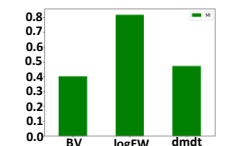


図6:相互情報量M\_i

輝線(水素)の等価幅からNovaとWZの区別は可能 → 正体はSU UMA型矮新星(VSNETより) → WZとSUを区別できる量を追加？  
 ↓  
 →判別モデルの変更？

2020年04~10月、2021年7月~

$p > 0.8$	Nova	DN	WZ	Mira	UV
Nova	2	0	0	0	0
DN	0	2	0	0	0
WZ	0	1	1	0	0
Mira	1	1	0	3	0
UV	0	0	0	0	4

表5:エラーマトリックス

### 結果のまとめ

型判別の精度：**80%**

誤判定された3サンプルの内2サンプルは本質的に判定が困難なので、十分実用的と見なせる

↓  
 但し、新天体の特徴量次第で教師データの数が減り、モデルの精度が落ちるので、機械判別に**生成モデル**を用いる予定