

セッション1：データ解析の新展開

東京大学木曾観測所
Tomo-e Gozen のデータ解析

大澤亮*

Tomo-e Gozen プロジェクト

*東京大学大学院理学系研究科
天文学教育研究センター

Outline

1. Brief Introduction to Tomo-e Gozen

Tomo-e Gozen Transient survey

Components of the Tomo-e Gozen system

2. Data reduction in the Tomo-e Gozen system

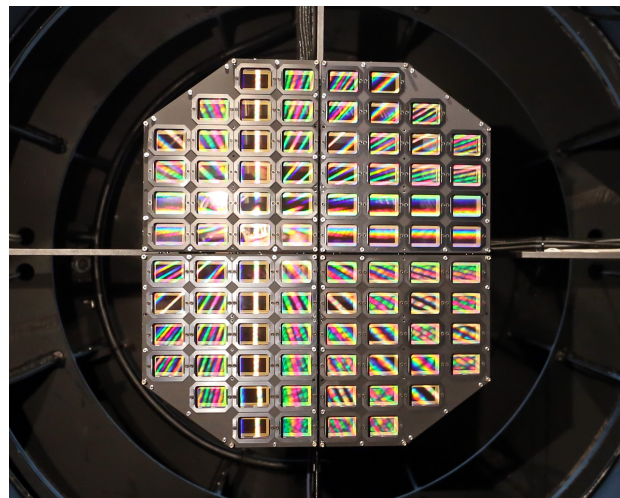
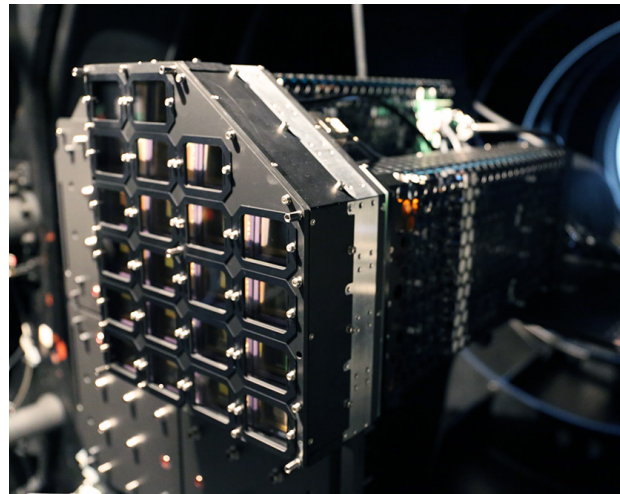
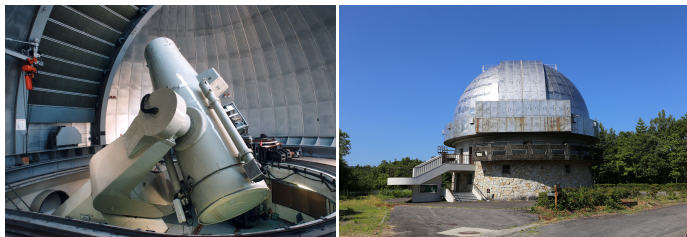
Overview of the Tomo-e Gozen pipeline

Products of the pipeline

Data handling and traceability

Tomo-e Gozen

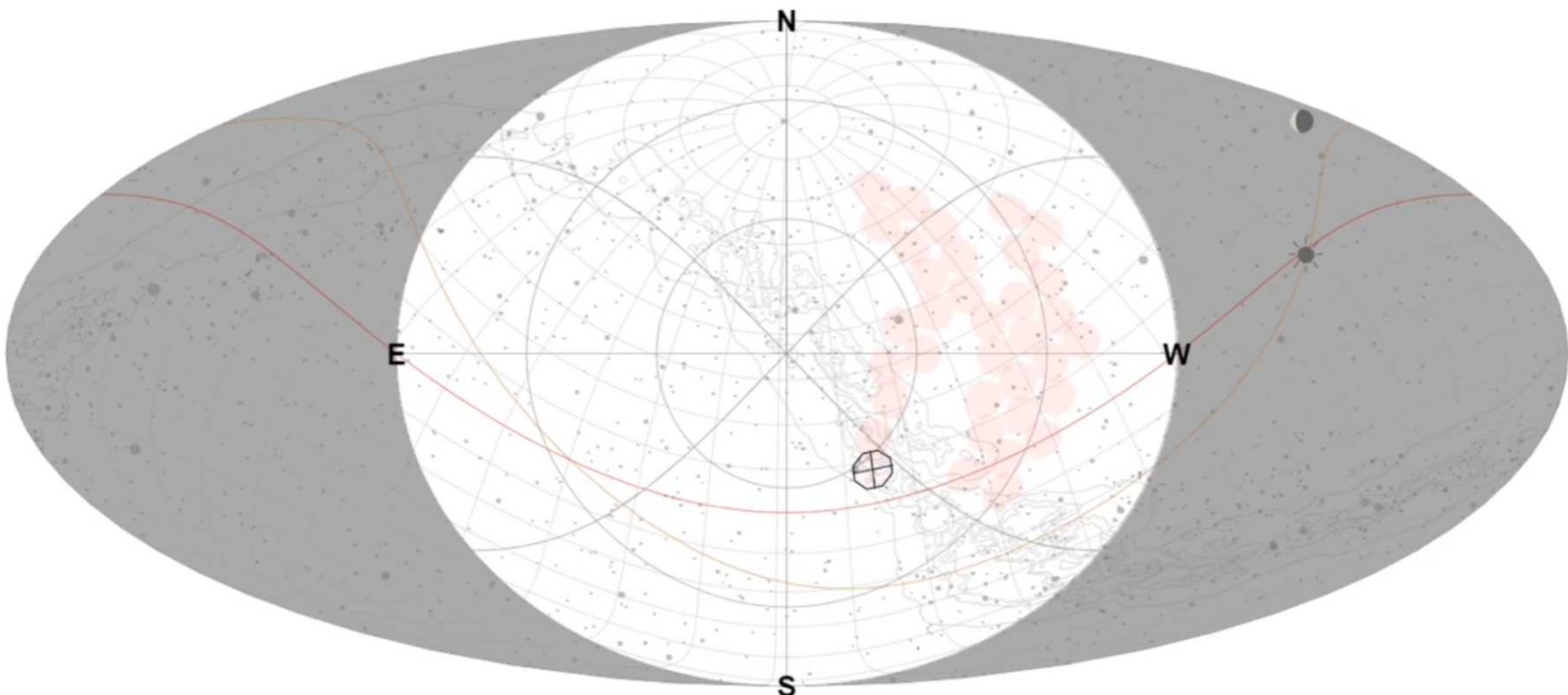
An overview of the camera modules



Specifications (Sako et al. Proc. SPIE, 2018)

Telescope	1.0-m f/3.1
Sensor format	2160×1200pix chip ⁻¹
Field of view	39'.7×22'.4 × 84 (~20 deg²)
Pixel scale	19μm, 1".189pix ⁻¹
Wavelength	350–700nm
Filters	optical broadband
Frame rate	2Hz (max, continuous)
Read noise	~1.9e ⁻ at 2Hz
Dark current	~0.1 e ⁻ sec ⁻¹ pix ⁻¹ at 277K
Well depth	~6,400e ⁻
5σ lim. mag.	~18.5 mag. in 0.5 sec

※プロジェクトしてサーベイを実施・他の観測は共同研究として実施



Kiso Observatory, the University of Tokyo, Nagano, Japan
 Latitude 35° 47' 50.0" N, Longitude 137° 37' 31.5" E, Elevation 1132m (WGS84)

e (JST)

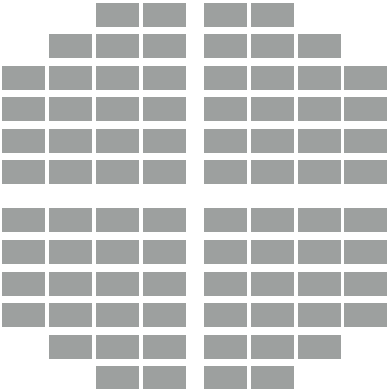
JST: 2019/9/25 20:25:18
 UTC: 2019/9/25 11:25:18
 LST: 20:51:47 (20.86 hrs)
 MJD: 58751.48



0:03 / 0:18

Components of Tomo-e Gozen system

Camera Modules



830 MB/s (max)

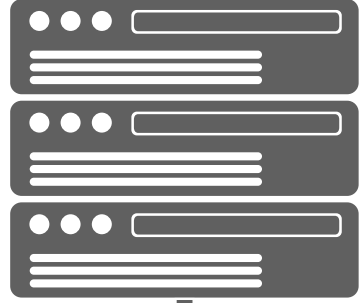


Interim Storage (volatile)



TTL = 9.5 days

Reduction System

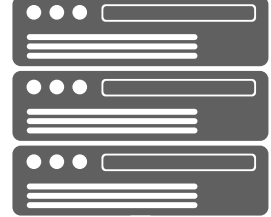


- Observation Info.
- Calibration frame
- Stacked Image
- Moving Object
- Photometry
- Light Curve
- etc...

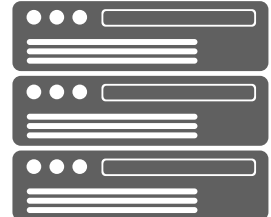


Tomo-e Gozen Archive

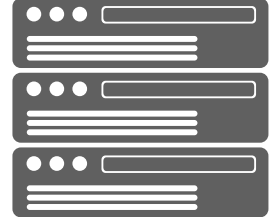
Transients



Asteroids

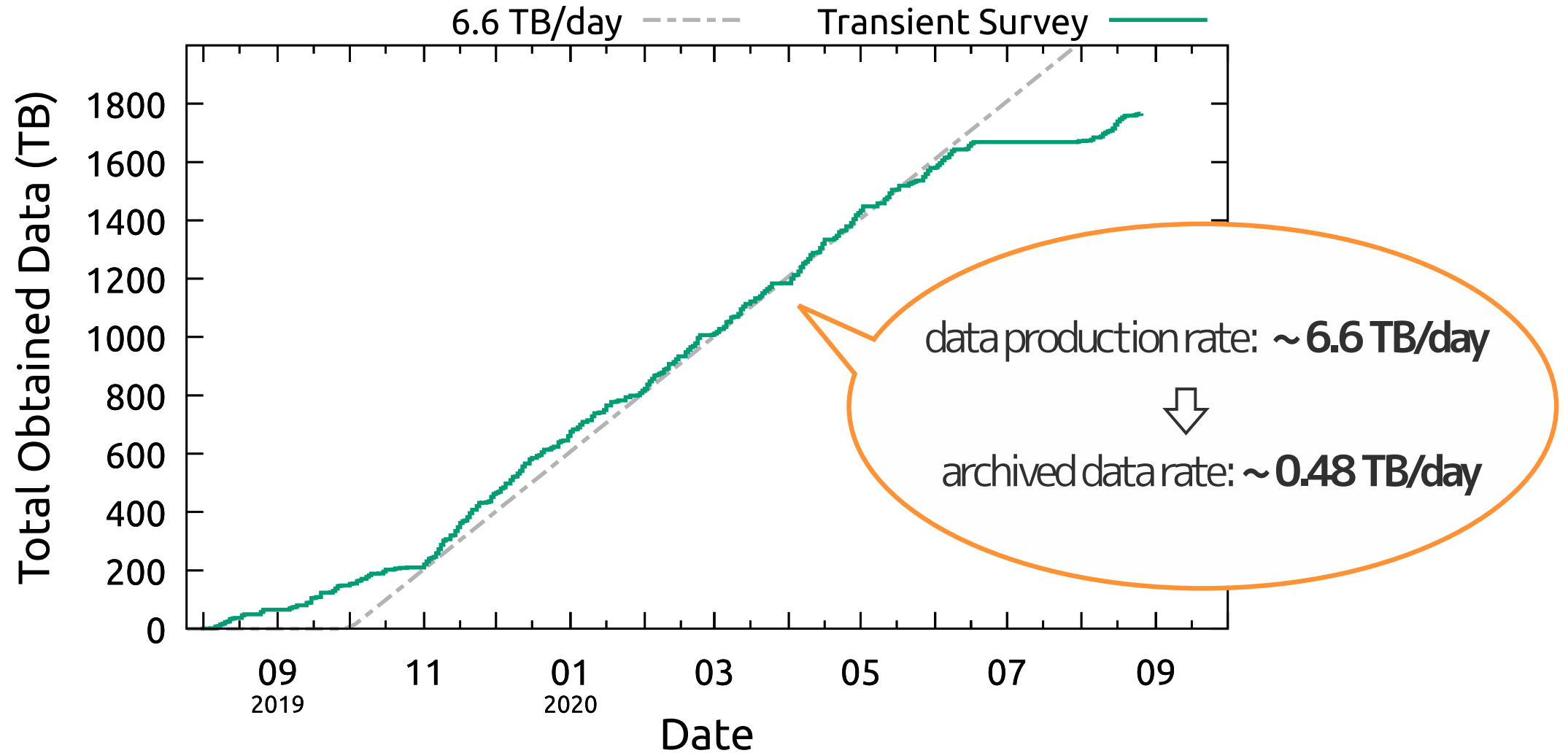


HeSO



Observation Statistics

Tomo-e Gozen によって生成された総データ量 (2019–2020)



Overview of Tomo-e Gozen

モチベーション

木曾シュミット望遠鏡の視野を埋め尽くすデジタルカメラ

タイムスケールの短い時間軸天文学を攻める (動画による天文学)

データレート = $6^\circ \times 6^\circ$ field-of-view (= a few 100M pixels) \times フレームレート

Tomo-e Gozen ~ 830 MB/s in 2Hz monitoring (cf. VRO LSST camera ~400 MB/s?)

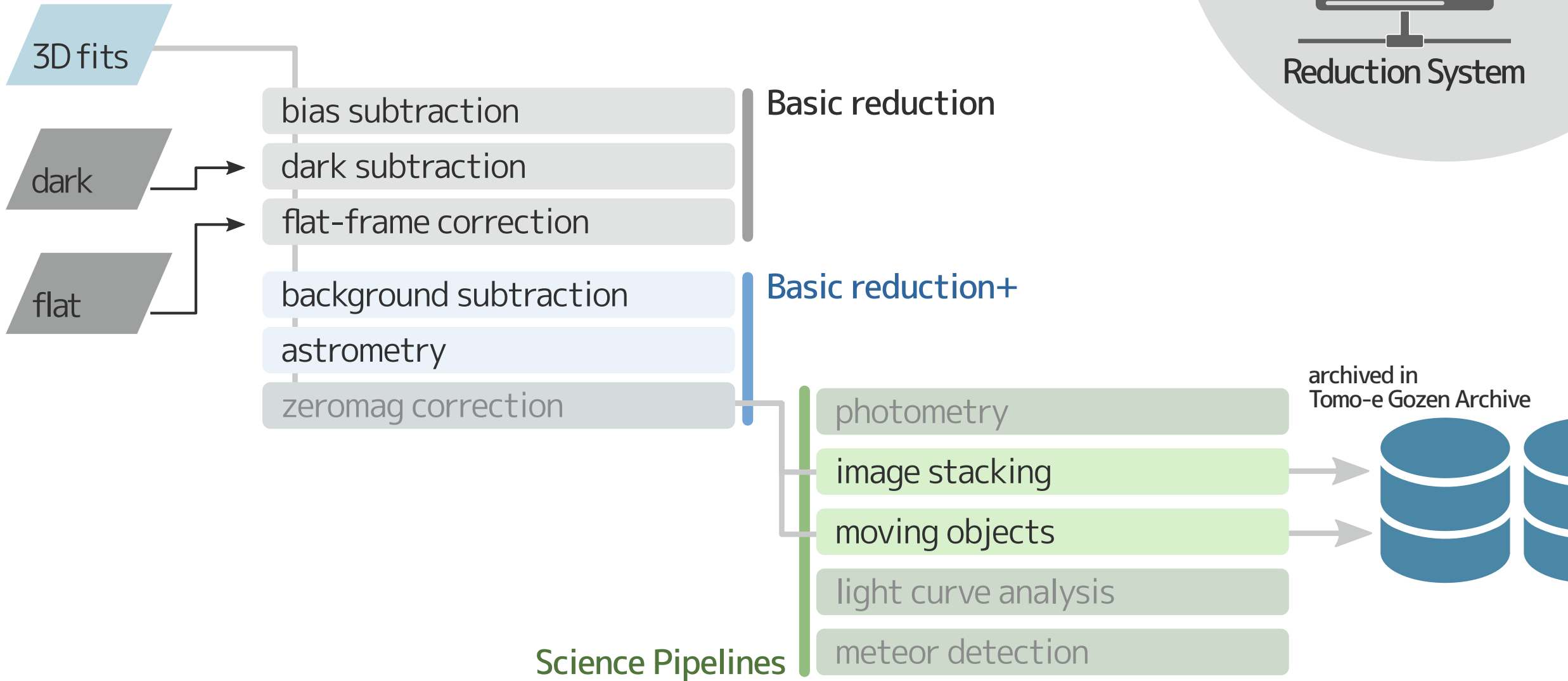
広視野高頻度サーベイ観測

⇒ 観測・解析の完全自動化は必須 (cf. 「突発天体広視野サーベイ解析システム」by 冨永さん)

データレート \gg 諸々のリソース

⇒ 「リソースを強化する」以外の選択肢も積極的に検討

Tomo-e Gozen Pipeline



Data Products of Tomo-e Gozen



Tomo-e Gozen Archive

Tomo-e Gozen Archive に保存されるデータ

Photometry Table

2 Hz 測光カタログ (座標, 明るさ, 時刻など)

Stacked Image

時間方向に足し合わせた画像 (現在は average except for maximum)
等級原点も自動で補正済み (予定)

Moving Objects

9 秒の動画内で動いた天体の座標, 速度, 明るさ, トリミングした画像

Light Curves

特定の天体周辺を測光した光度曲線, 周波数解析の結果, トリミングした動画 (検討中)

Meteor streaks

動画中で高速で動いた天体, 低軌道衛星や流れ星など

Web Interface

最低限の検索機能を実装

Tomo-e Gozen Archive / 2020-08-14 / 357754

Date	Exp ID	Object	Observer	Project	(RA, Dec)
2020-08-14 19:00	357754	J0400+0000_dith1	Morokuma	Supernova Survey	(60.037, +0.000)

Stack (84)

[download file list](#)

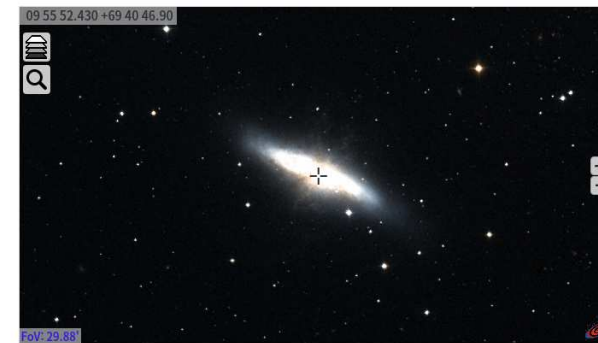
sTMQ1202008140035775411.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ1202008140035775412.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ1202008140035775413.fits (2020-08-14 20:12)
sTMQ1202008140035775414.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ1202008140035775415.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ1202008140035775416.fits (2020-08-14 20:13)
sTMQ1202008140035775421.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ1202008140035775422.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ1202008140035775423.fits (2020-08-14 20:51)
sTMQ1202008140035775424.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ1202008140035775425.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ1202008140035775426.fits (2020-08-14 20:51)
sTMQ1202008140035775431.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ1202008140035775432.fits (2020-08-14 20:12)	sTMQ1202008140035775433.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ1202008140035775434.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ1202008140035775435.fits (2020-08-14 20:12)	sTMQ1202008140035775441.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ1202008140035775442.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ1202008140035775443.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ1202008140035775444.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ2202008140035775411.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ2202008140035775412.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ2202008140035775413.fits (2020-08-14 20:51)
sTMQ2202008140035775414.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ2202008140035775415.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ2202008140035775416.fits (2020-08-14 20:51)
sTMQ2202008140035775421.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ2202008140035775422.fits (2020-08-14 20:12)	sTMQ2202008140035775423.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ2202008140035775424.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ2202008140035775425.fits (2020-08-14 20:12)	sTMQ2202008140035775426.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ2202008140035775431.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ2202008140035775432.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ2202008140035775433.fits (2020-08-14 20:12)
sTMQ2202008140035775434.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ2202008140035775435.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ2202008140035775441.fits (2020-08-14 20:12)
sTMQ2202008140035775442.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ2202008140035775443.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ2202008140035775444.fits (2020-08-14 20:12)
sTMQ3202008140035775411.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ3202008140035775412.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ3202008140035775413.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ3202008140035775414.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ3202008140035775415.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ3202008140035775416.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ3202008140035775421.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ3202008140035775422.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ3202008140035775423.fits (2020-08-14 20:12)
sTMQ3202008140035775424.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ3202008140035775425.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ3202008140035775426.fits (2020-08-14 20:13)
sTMQ3202008140035775431.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ3202008140035775432.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ3202008140035775433.fits (2020-08-14 20:51)
sTMQ3202008140035775434.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ3202008140035775435.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ3202008140035775441.fits (2020-08-14 20:51)
sTMQ4202008140035775411.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ4202008140035775412.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ4202008140035775413.fits (2020-08-14 20:12)
sTMQ4202008140035775414.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ4202008140035775415.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ4202008140035775416.fits (2020-08-14 20:12)
sTMQ4202008140035775421.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ4202008140035775422.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ4202008140035775423.fits (2020-08-14 20:51)
sTMQ4202008140035775424.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ4202008140035775425.fits (2020-08-14 20:45)	sTMQ4202008140035775426.fits (2020-08-14 20:51)
sTMQ4202008140035775431.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ4202008140035775432.fits (2020-08-14 20:13)	sTMQ4202008140035775433.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ4202008140035775434.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ4202008140035775435.fits (2020-08-14 20:12)	sTMQ4202008140035775441.fits (2020-08-14 20:45)
sTMQ4202008140035775442.fits (2020-08-14 20:51)	sTMQ4202008140035775443.fits (2020-08-14 20:12)	sTMQ4202008140035775444.fits (2020-08-14 20:45)

Neo (6)

[download file list](#)

nTMQ1202008140035775443.fits (2020-08-14 20:13)	nTMQ2202008140035775425.fits (2020-08-14 20:12)	nTMQ2202008140035775435.fits (2020-08-14 20:51)
nTMQ3202008140035775415.fits (2020-08-14 20:13)	nTMQ3202008140035775433.fits (2020-08-14 20:51)	nTMQ4202008140035775426.fits (2020-08-14 20:51)

Tomo-e Gozen Archive Query



Target:

Radius: 15

Date: to

[download file list](#)

Date	Filename	(RA,Dec)	Object	Observer	Project
2020-06-17 13:41	sTMQ1202006170035071314.fits	(149.435, 69.6466)	J1010+6650_dith4	Morokuma	Supernova Survey
2020-06-15 11:22	sTMQ1202006150034810614.fits	(149.383, 69.6453)	J1010+6650_dith4	Morokuma	Supernova Survey
2020-06-07 12:26	sTMQ1202006070034498014.fits	(149.405, 69.646)	J1010+6650_dith4	Morokuma	Supernova Survey
2020-06-03 13:33	sTMQ1202006030034168114.fits	(149.405, 69.6457)	J1010+6650_dith4	Morokuma	Supernova Survey
2020-05-30 12:44	sTMQ1202005300033934314.fits	(149.382, 69.6461)	J1010+6650_dith4	Morokuma	Supernova Survey
2020-05-22 11:50	sTMQ1202005220033393114.fits	(149.36, 69.6479)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-05-17 13:31	sTMQ1202005170033197814.fits	(149.38, 69.6469)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-05-14 12:50	sTMQ1202005140033037814.fits	(149.364, 69.6477)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-05-13 12:27	sTMQ1202005130032877914.fits	(149.352, 69.6463)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-05-02 12:44	sTMQ1202005020032294914.fits	(149.341, 69.6492)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-04-29 11:20	sTMQ1202004290031872814.fits	(149.336, 69.6595)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-04-28 11:01	sTMQ1202004280031713614.fits	(149.334, 69.6616)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-04-21 13:29	sTMQ1202004210031126214.fits	(149.342, 69.6502)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-04-15 11:14	sTMQ1202004150030692814.fits	(149.339, 69.667)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-04-14 12:08	sTMQ1202004140030543314.fits	(149.337, 69.5993)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-04-06 10:48	sTMQ1202004060029765314.fits	(149.314, 69.8658)	J1010+6650_dith5	Morokuma	Supernova Survey
2020-04-03 11:53	sTMQ1202004030029483914.fits	(149.331, 69.6735)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey
2020-04-03 11:53	sTMQ1202004030029483914.fits	(149.325, 69.6665)	J1010+6650_dith6	Morokuma	Supernova Survey

Volatile Data Storage



Interim Storage

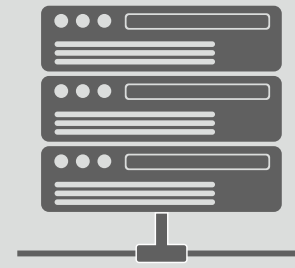
Tomo-e Gozen のデータレート >> 木曾観測所のリソース

データストレージを維持するメディア費用・電気代
外部とのネットワーク帯域 (~ 1 Gbps)
データハンドリングをする人的リソース

現在のリソースに合わせてアーカイブする情報を選択

2 Hz の動画情報は残さない
時間方向にスタックした画像はすべて残す
移動天体は座標・明るさ・トリミングした動画を残す
残すデータ量を 1/10 以下に ⇨ システムとしての寿命を 10 倍にする

Traceability of Data Products



Reduction System & Tomo-e Gozen Archive

解析プロセスを後で辿れるように徹底したい

システムのコードはすべて git で管理

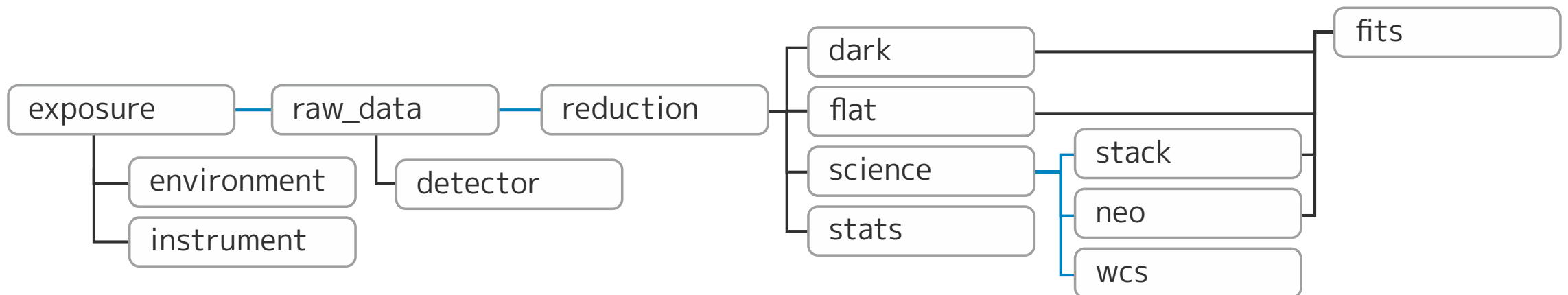
各データにユニークな ID 番号を振る

calibration で使用したデータの ID を記録

reduction ごとにユニーク ID を記録 (再解析は別レコードとして記録)

解析時に使用したコードの git commit ID を記録

Tomo-e Gozen Archive のデータベース



Automation

装置も観測モードもシンプル

通常のサーベイ観測に対する自動解析の実装はさほど難しくなかった

苦労した点: 異常状態に対する対応

曇ったデータ, システム側の問題, 観測者の設定ミスなど

ログを正しく管理する

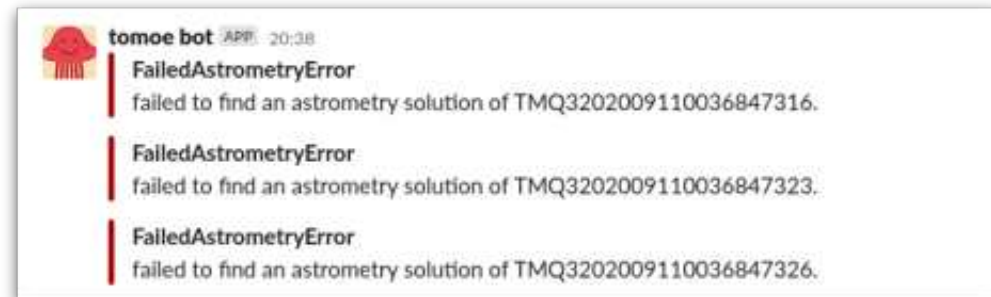
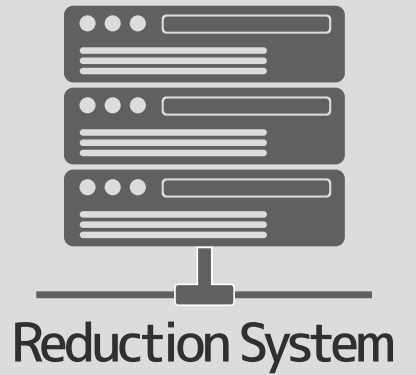
エラーの出力/パフォーマンスの簡易的な測定
常駐プロセスなら supervisor が便利だった

リソースをモニタリングする

予期せぬエラーはだいたいログに出てこない

チーム内でエラー・ログを共有する

基本的に何かエラーが起きたらすべて Slack に投稿する



Summary

1. Brief Introduction to Tomo-e Gozen
2. Data reduction in the Tomo-e Gozen system

Overview of the Tomo-e Gozen pipeline

解析は完全自動で実行される

一次解析, バックグラウンド引き, WCS 較正, 時間方向のスタック, 移動天体検出が運用中

解析に失敗したらアーカイブには残らない

Products of the pipeline

時間方向にスタックした画像, 移動天体, 観測・解析の情報などを保存

日付と座標(スタック画像)で検索できるインターフェースを実装

Data handling and traceability

観測所のリソース不足のため 2 Hz の動画データは $N (= 9.5)$ 日で削除

どのデータをどのコードで整約・解析したのか追跡できるようにする

Future Archive Design

観測所リソース (ネットワーク環境) の整備

できれば 2 Hz の動画データも捨てたくない

高速ネットワークの整備を進めている (upload ~ 4 Gbps)

サーベイ運用の平均データレート ~ 6.6 TB/day であれば十分送り出せる

送り出す先はどこか? アーカイブしたデータをどうやって活用するか

Tomo-e Gozen Archive のデータ公開

現在は木曾観測所に VPN アクセスしないとデータにはアクセスできない

一部のデータについてはよりアクセスしやすい方法を提供予定

Tomo-e Gozen Data Release (?)

数年のタイムスケールで木曾観測所内の Tomo-e Gozen Archive はパンクする (予定)

解析済みデータ木曾から公開アーカイブに移行 & リリースする計画を検討している