

ハフ変換を用いた直線発光現象の 自動検出手法の検討

大井 渚 (北海道情報大学)

片川颯大

流星とデブリ

- 流星：

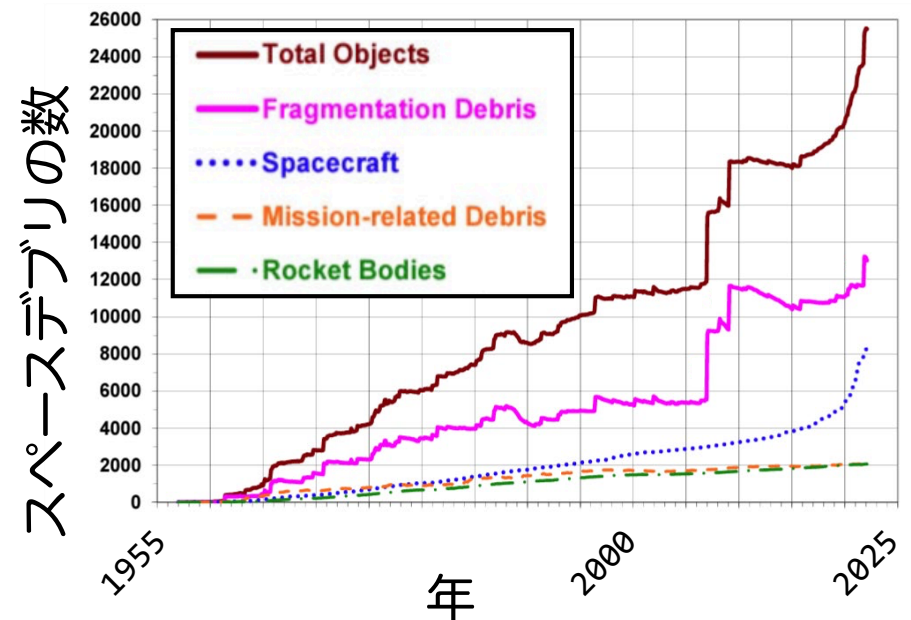
- ・ 宇宙空間に存在する微小天体が大気圏に突入し発光する現象

➡ 物質組成や起源を探る重要な手段

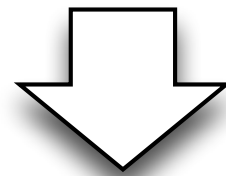
- スペースデブリ：

- ・ 地球周回人工物
- ・ 人類活動により増加

➡ 再突入により、流星に類似した発光現象を示す可能性



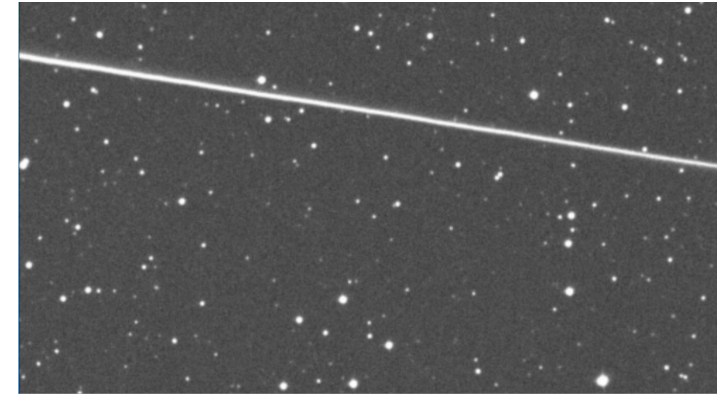
デブリ発光の混入により、流星観測データの汚染が懸念



流星とデブリ由来発光の識別が必要

トモエゴゼン観測

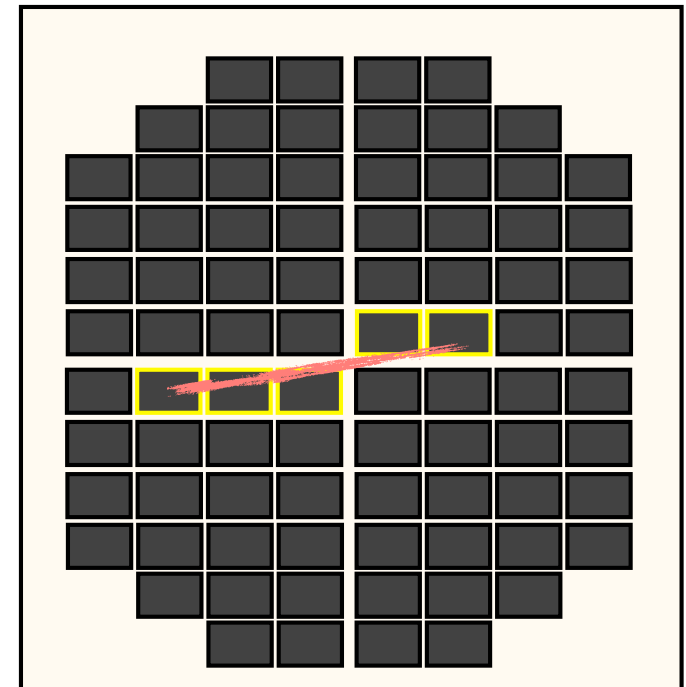
- Video monitoring survey (地球影モード)
 - 84枚の**CMOS**センサによる広視野観測(20平方度)
 - ➡ 希少な流星現象の検出に有利
 - 動画観測
 - ➡ 発光軌跡や移動速度の解析が期待
 - 1.189 arcsec/pixel の高い空間分解能
 - ➡ 流星・デブリ由来発光の形状識別への応用が期待
 - 地球の影領域を観測
 - ➡ 人工衛星の影響を低減可能



データ

- 観測日：2025年4月26日
- 観測時間：1 hour
- 1動画 (FITS cube)：120 frames (1fps x 2minutes)
- データ総量：30 FITS cubes x 84 CMOS sensors
= 2520 FITS cubes
= 302,400 frames

➡ 直線状発光現象を自動抽出する手法が必要



研究目的・目標

トモエゴゼンによる地球の影領域の動画(連続観測画像)を対象として、直線状発光現象の自動抽出手法を検討する

解析手順

1. 直線状発光現象を含む画像の選定

- ・ 目視で抜き出す

2. エッジ検出

- ・ Gaussian平滑化後, Canny法でエッジ画素を抽出

3. 直線検出

- ・ エッジ画素に対してハフ変換を適用
- ・ 投票数に基づき直線を検出

1. 直線状発光現象を含む画像の選定

	This work	Ohsawa+16
観測日	2026/04/26	2016/04/11 2016/04/14
観測時間	1時間	10.6時間
センサー数	84	8
観測モード	1s積分 × 120 frames	0.5s積分 × 360 frames
データ総量	302,400 frames	607,680 frames
総積分時間	302,400 s	303,840 s
流星検出数	870イベント(含重複)	2928イベント(含重複)
等級	-	4.5-12.5mag(11日) 5.5-11.0mag(14日)

検出率の差の要因

1. 観測モード(fps)の違い

- 1.0s(this work) $\approx$ 0.5s(Ohsawa+16)
- ・ 積分時間が長いほど、背景光は pixel ごとに増加
- ・ 一方で直線状発光は、積分時間が長くなっても1 pixel あたりの輝度は増えにくい（軌跡長が伸びる）。

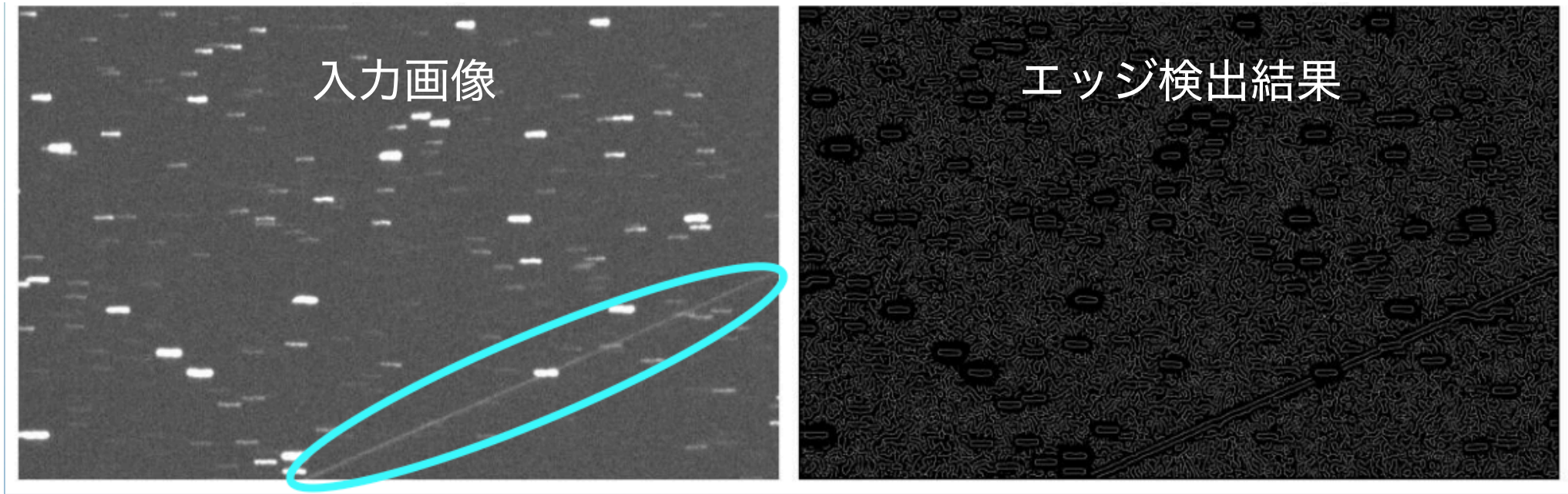
→ 長時間積分では、背景とのコントラストが低下し、検出困難になる

2. 検出等級限界の差

- ・ 見積もっていない(this work) $\approx$ 4.5–12.5mag (Ohsawa+16)
- ・ 光度関数 $N(< m) \propto r^m$ ($r \sim 3$) (Ohsawa+16)

→ 検出限界が 1mag 浅いだけで、検出数は 約1/3 に減少

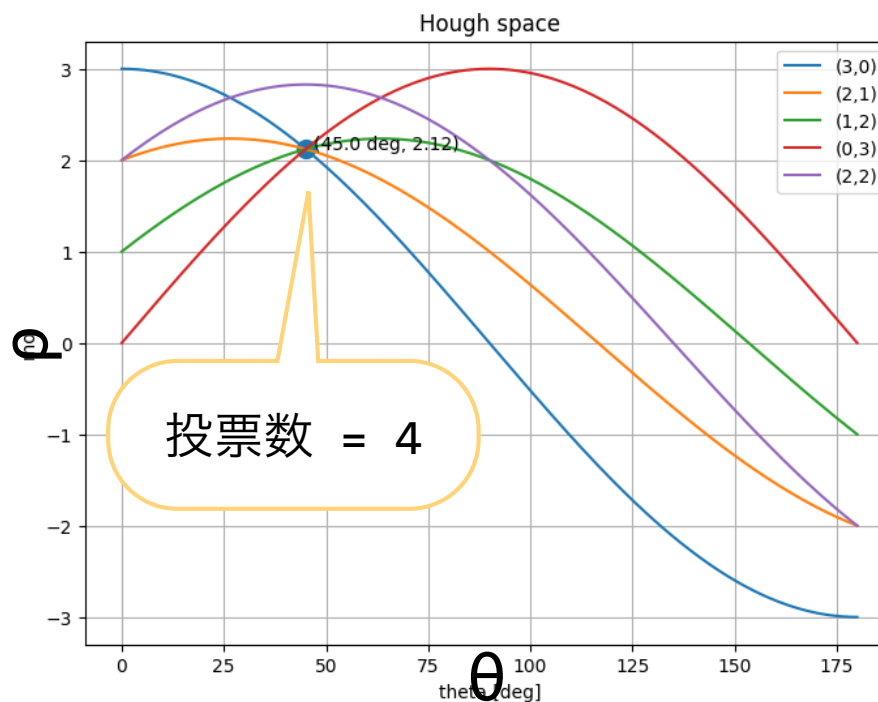
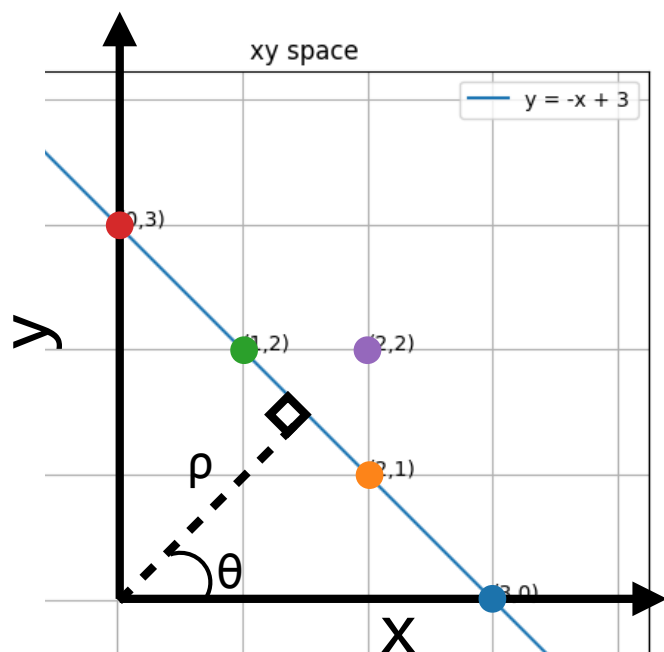
2. エッジ検出 (Canny法)



- 直線検出(ハフ変換)の前処理として、Canny法により輪郭成分を抽出
 - **Canny法**：画像の微分に基づき、輝度変化の大きい画素をエッジとして抽出
 - ノイズ低減のため、Gaussianで平滑化
 - σ が大きいほどノイズを抑制できるが、空間的に細い線は消えやすい

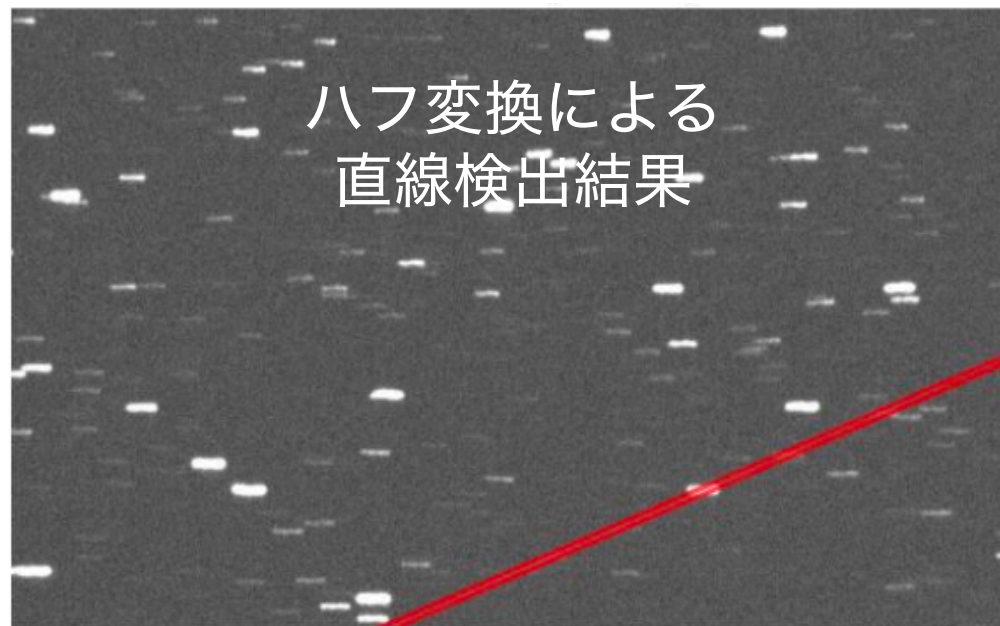
3. 直線検出（ハフ変換）

- Canny法で抽出したエッジ画像に対し、ハフ変換を用いて直線検出
 - ・ ハフ変換：画像中の直線検出に用いられる代表的な手法
 - 各エッジ点 (x, y) に対し、 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ を用いて、通過可能な直線を (θ, ρ) 空間上の曲線として表現
 - 同一直線上の点では、曲線が同じ (θ, ρ) に集中する
 - threshold を超える集中が見られた (θ, ρ) を直線として検出



3. 直線検出（ハフ変換）

- Canny法で抽出したエッジ画像に対し、ハフ変換を用いて直線検出
 - ・ハフ変換：画像中の直線検出に用いられる代表的な手法
 - 各エッジ点 (x, y) に対し、 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ を用いて、通過可能な直線を (θ, ρ) 空間上の曲線として表現
 - 同一直線上の点では、曲線が同じ (θ, ρ) に集中する
 - threshold を超える集中が見られた (θ, ρ) を直線として検出



threshold が大きいほど誤検出は減るが、短い線は検出されにくい

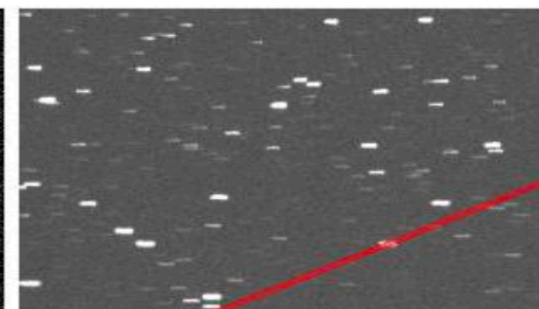
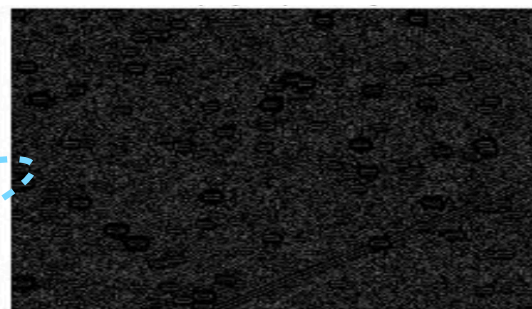
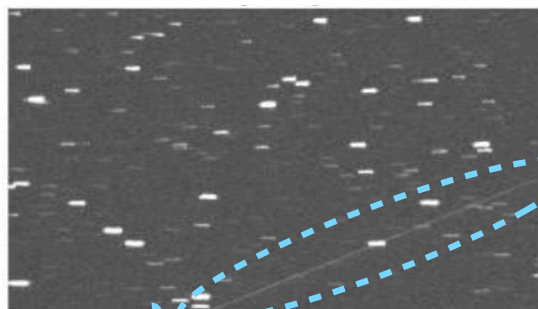
直線検出結果

入力画像

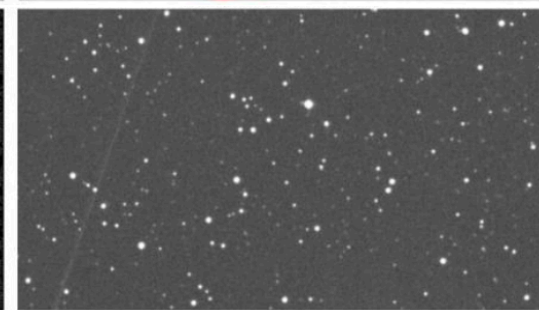
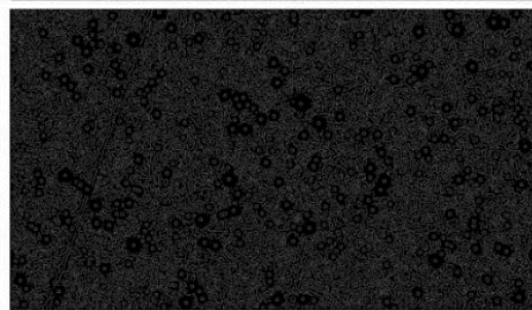
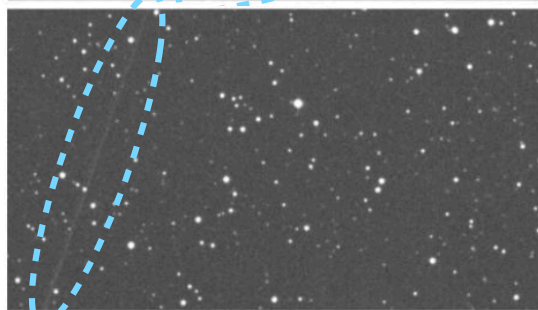
エッジ検出結果

直線検出結果

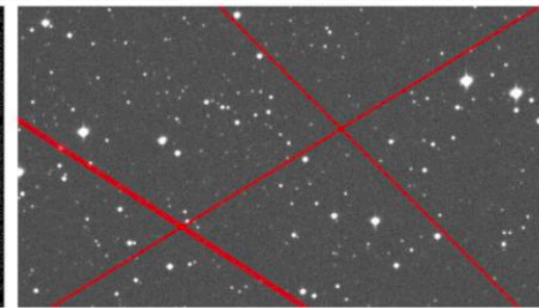
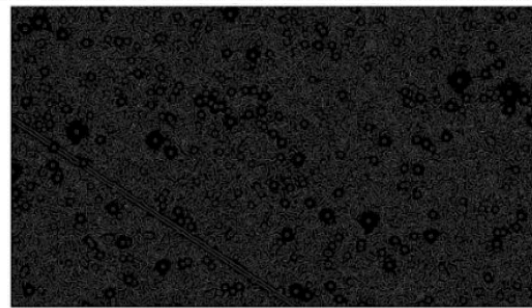
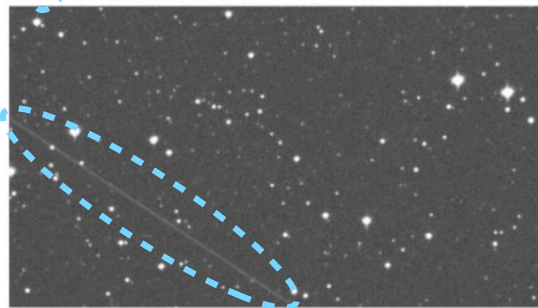
検出



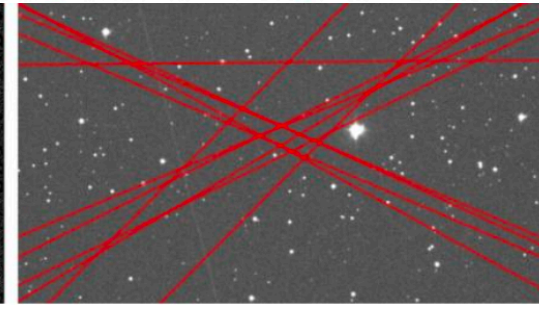
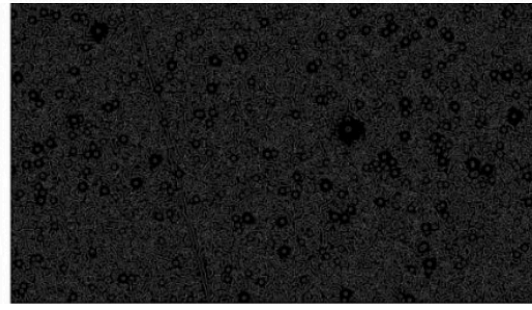
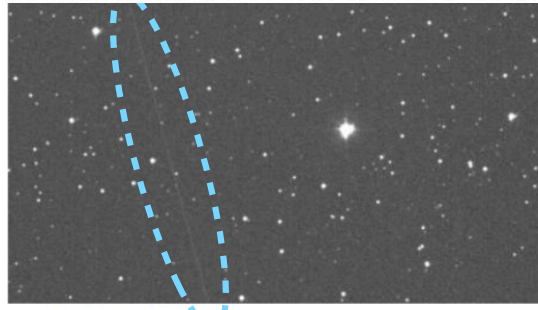
未検出



検出+
誤検出



未検出+
誤検出



結果1

- 流星が写っている 50 枚の画像に対し
 - ・ エッジ検出の平滑化パラメータ σ
 - ・ ハフ変換の検出閾値パラメータ thresholdを変化させ、検出率及び誤検出率の変化を調べた

24パターンの流星検出率 (検出率/誤検出率)		threshold							
		325		330		335		340	
sigma	4.5	50%	40%	52%	34%	52%	30%	48%	12%
	4.55	52%	40%	50%	30%	52%	14%	48%	10%
	4.6	52%	34%	48%	22%	50%	12%	48%	6%
	4.65	48%	22%	48%	22%	50%	4%	46%	4%
	4.7	50%	28%	50%	12%	50%	10%	48%	4%
	4.75	50%	14%	50%	4%	48%	2%	48%	3%
検出率 = 流星検出数/合計(50)									
誤検出率 = 誤検出数/合計(50)									

- σ と threshold を変化させても検出率に大きな変化は見られなかった (いずれの条件でも 約50% 程度)。
 - 一方、 σ 及び threshold を大きくすると、誤検出率は低下 (最小 約3%)
- ➡ 誤検出率の低い 8 パターンを、流星無し 50 枚で追加検証した

結果2

- 流星が写っていない 50 枚で直線検出

8パターンの誤検出率		threshold		
		330	335	340
sigma	4.65		26%	10%
	4.7	32%	12%	18%
	4.75	18%	14%	8%
誤検知率 = 誤検出数/合計(50)				

- 今回検証した条件では、 $\sigma=4.75$ 、 $\text{threshold}=340$ のとき、誤検出率が最小（約8%）となった。
- 全302,400枚のデータに本手法を適用することで、確認が必要な画像数を約25,000枚まで削減可能

まとめ

- トモエゴゼンによる地球の影領域の 1Hz・1時間観測 (302,400枚) から、直線状発光現象の自動抽出手法の評価
 - 目視では870枚に直線状発光現象を確認
- Canny法によるエッジ検出 + ハフ変換による自動直線検出を実施
 - σ と threshold を変化させても、**検出率は 約50% 程度**に留まった
 - 一方 σ および threshold を大きくすると、**誤検出率は低下**
 - 特に、 $\sigma=4.75$ 、threshold=340 付近で、**誤検出率が最小**
(流星あり画像：約3%、流星無し画像：約8%)
- 本手法は、高精度検出よりも、**大量画像から非流星画像を除外する前処理として有効**
- 今後は、差分画像を利用するとか、ハフ変換結果の (θ, ρ) を特徴量として機械学習に入れるなど、別のアプローチが必要。また、 σ と threshold を変えて、具体的にどんな線が検出されているのかの評価も必要