

流星自動検出パイプラインの構築

岡山大学 理学部 地球科学科

05429517 原口 美悠

2021/02/12

要旨

防犯カメラで撮影した夜空の画像から、流星を自動検出するアルゴリズムを構築し、実装した。

今回構築した流星検出アルゴリズムは、2段階の方法で流星を抽出する。1段階目は短時間発光の抽出、2段階目は発光継続時間を用いた流星候補となる発光の抽出、である。この2段階の選別によって、流星による発光を他の発光(恒星、惑星、飛行機、人工衛星、雲、etc)と区別して抽出する。

ペルセウス座流星群の極大で、岡山大学に設置した防犯カメラが18個の流星を記録した2019年8月12日夜のデータに対して自動検出を行ったところ、的中率10.8%、感度77.8%で流星を自動検出することができた。

目次

第1章 序論	4
1.1 流星の自動検出	4
第2章 データ取得	5
2.1 撮影システム	5
2.2 録画システム	8
第3章 流星検出アルゴリズム	9
3.1 流星検出アルゴリズムの概要	9
3.2 段階1	10
3.3 段階2	13
3.4 パラメタ	16
3.5 性能評価	17
3.5.1 2019年8月12日夜の自動検出	18
3.5.2 2019年8月の自動検出	22
3.5.3 2019年9月と10月の自動検出	24
第4章 まとめ	26

第1章 序論

1.1 流星の自動検出

流星群の時期に限らず，流星は流れている (図 1.1)．流星を探す場合，夜空を長時間眺めるのが普通だろう．しかし，毎日 12 時間ほど夜空を眺めていては日常生活に支障をきたす．労力をかけずに流星を探すには，夜空を撮影し，得たデータから流星を検出するプログラムを作ればよい．本研究では，岡山大学天文台で自動撮影している画像から流星を自動で検出するアルゴリズムを構築した．



図 1.1: 流星画像.
2019-08-13 03:03:59

第2章 データ取得

2.1 撮影システム

FS コース・先取りプロジェクト研究の予算を使用して、自然科学研究科棟の屋上に市販の防犯カメラ (型番：SJC21B, 図 2.1) を設置した。天頂に向けて設置したカメラ (図 2.2) は、2019 年の 7 月から毎晩夜空を撮影している。カメラは屋外用の防水・防塵仕様 (IP66) であるため、そのまま屋外に設置した。カメラ、カメラを取り付ける治具、ケーブル、データを記録するコンピュータなど、撮影システムを構築するのにかった予算はおおよそ 4 万円程度である (表 2.1)。撮影された画像に写った恒星の位置を用いてカメラの画角を調べたところ、水平約 115 度と、かなり広範囲を撮影していることが確認された。



図 2.1: 撮影に使用している防犯カメラ.



図 2.2: 撮影システム.
旗竿を立てる台に取り付けたカメラ. 後ろに写っている銀色のドームは
岡山大学天文台.

品名	金額(円)
広角屋外用防犯カメラ	20000
変換コネクタ	450
露出ボックス2個	490
旗立ベース	1600
継手	50
USBコンポジット オーディオ/ ビデオキャプチャーアダプタ	4500
ケーブル(長さ: 10m)	3400
Raspberry Pi 4 Model B (4GB)	6000
microSDカード(32GB)	1000
合計	37490

表 2.1: 撮影システム材料リスト. 金額はおおよそである.

2.2 録画システム

撮影した画像はコンポジットビデオで出力させ、それを USB キャプチャを使って UVC 規格に変換し、パソコンに入力して記録する (図 2.3).



図 2.3: データの流れ.

USB ビデオキャプチャの画像は、<https://www.andoer.com/p-v554.html> からの引用.

初期には右の写真にあるようなノートパソコンを使用していたが、現在は Raspberry Pi 4 を使用している.

1 秒間に出力する画像の枚数をフレームレートという。カメラは、周りの明るさに合わせてフレームレートを自動で調整する。夜間は 2~4fps で撮影する。USB キャプチャとパソコンのフレームレートはカメラより大きくすることで、撮影した画像の取りこぼしを防ぐようにした。

解像度は縦と横の画素の数のことで、データ量を小さくするため、解像度を下げて録画している。

	カメラ	キャプチャ	パソコン
フレームレート	2~4fps (夜間)	25fps	30fps
解像度	1920×1080	640×480	640×480

図 2.4: フレームレートと解像度.

第3章 流星検出アルゴリズム

3.1 流星検出アルゴリズムの概要

撮影したデータから流星を探すには、明るく写ったものに反応するプログラムを作ればよい。しかしこのカメラには流星以外にも明るく写るものがある。星、月、雲、飛行機、人工衛星などである。これらによる発光と流星による発光を区別する必要がある。本研究では、2段階の方法で流星を検出するアルゴリズムを作成した(図3.1)。まずは、各画素ごとに輝度の時間変化を見ることで星、月、雲などを除外する。輝度とは画素の明るさを数値で表したものである。次に、発光の継続時間を見ることで流星のみを抽出する。

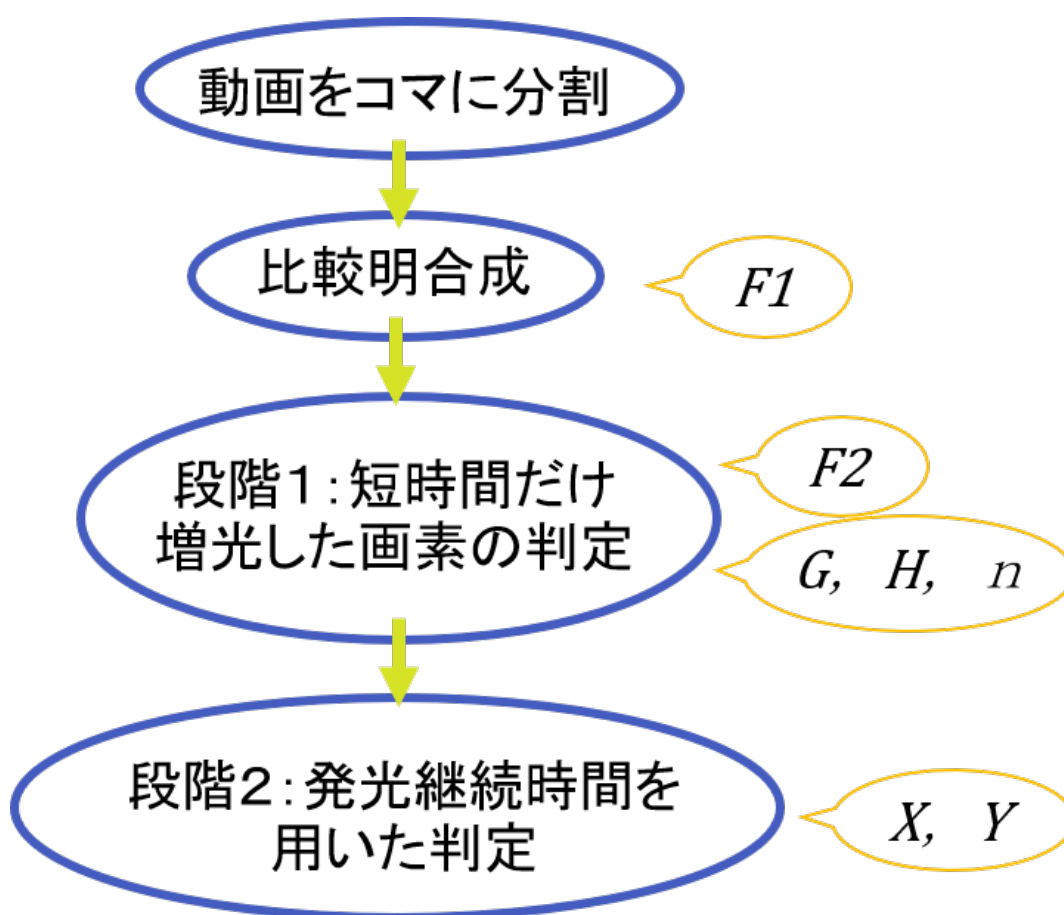


図 3.1: 流星検出アルゴリズムの流れとそのパラメタ。

3.2 段階 1

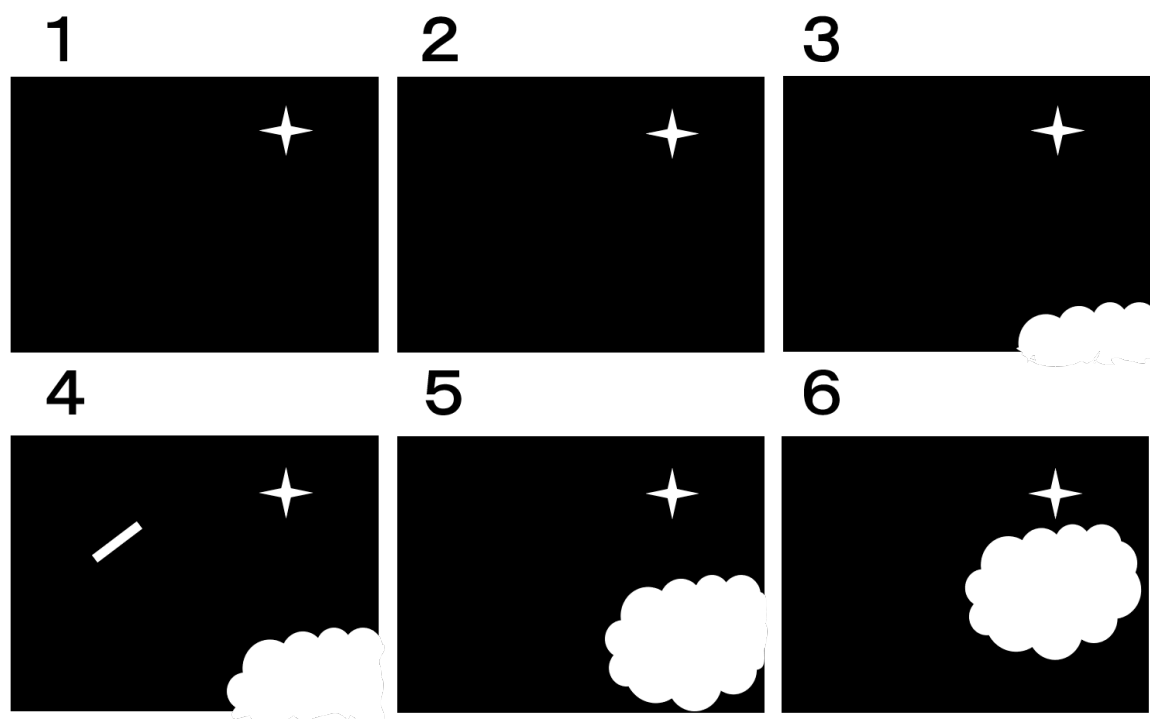


図 3.2: 夜空画像の時間変化イメージ図.

図 3.2 は、1 分程度の時間間隔で撮影した夜空の画像を時系列に沿って並べたイメージ図である。白黒は輝度を表しており、黒は暗く、白は明るい。各フレームの右上には星が写っている。星が日周運動によって動く速度は遅いので、星はここに並べた画像においてほぼ同じ場所に写り、動かない。3 枚目以降の右下にある白いもこもこしたものは雲で、雲は数分間の間に移動するため、少しずつ違った場所に現れる。4 枚目の左上に写っているのは流星である。流星は数秒以下の短時間の発光現象のため、写るのは通常 1 枚だけである (ただし、フレームが切り替わる時刻をまたいで流星が流れると、2 つのフレームに流星が写るので、2 枚に渡って写らないとは言い切れない)。

ここで，図 3.3 に描き込んだ A から D の場所の画素について，それぞれの輝度の時間変化を考えることにする．

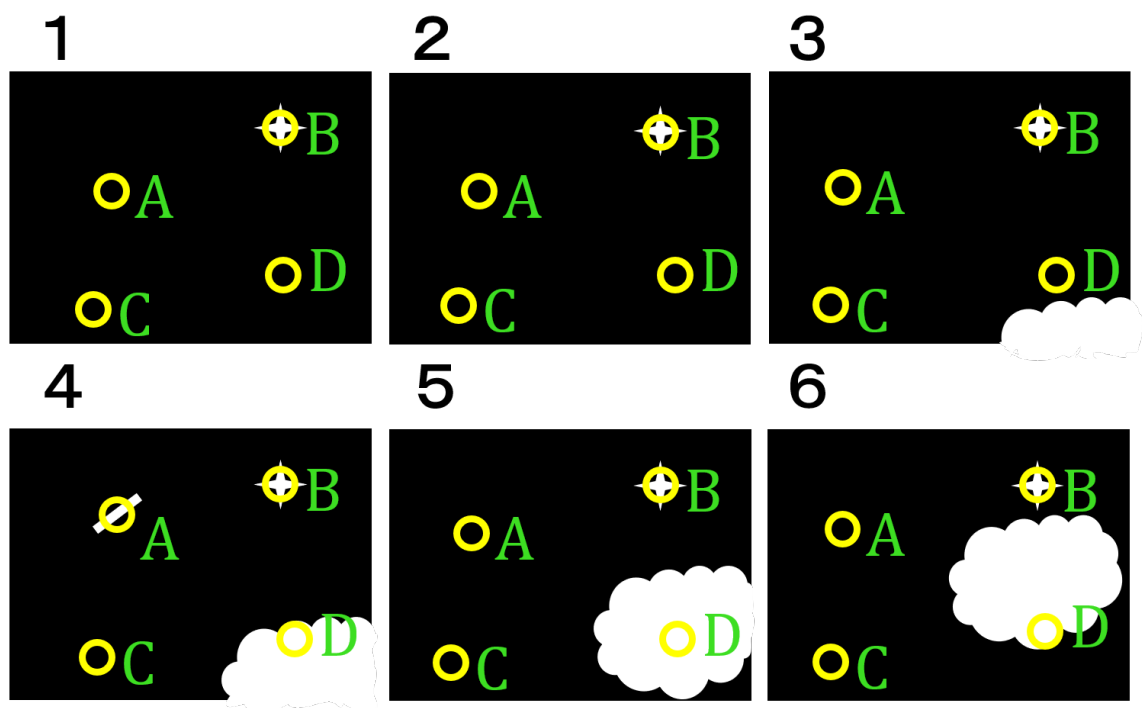


図 3.3: 夜空画像の時間変化イメージ図．

A は流星が横切った画素，B は星と重なった画素，C は普通の夜空が写った画素，D は途中から雲が写り込むようになった画素．

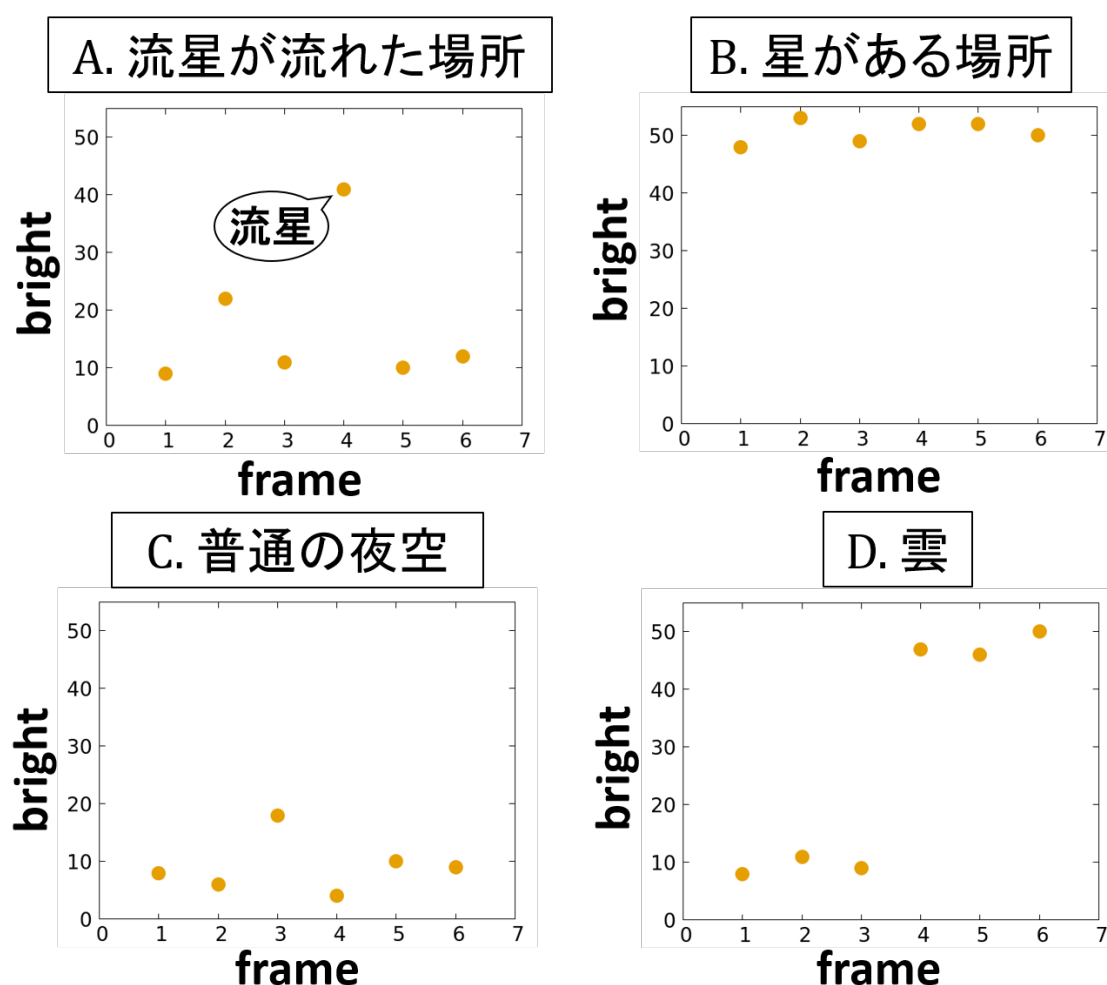


図 3.4: 画素 A～D の明るさの時間変化。
横軸は時間、縦軸は各画素の明るさ。

図 3.4 は、A から D の各画素で記録された輝度の時間変化を模式的に表したものである。短時間の発光現象である流星は大抵の場合、1 フレームだけ増光する (図 3.4 左上)。星の光が落ちる画素は、星のまたたきによって輝度に変動はあるものの、終始明るい状態を維持する (図 3.4 右上)。一方で、星の光が入らない画素は終始暗いままであるが、それでも完全に漆黑というわけではなく、またその明るさには変動が見られる (図 3.4 左下)。夜間に出る雲は空よりも明るく写る (図 3.4 右下)。ある程度の大きさの雲が出た場合には、いったん雲がかかると、しばらく雲がかかったままの状態が続く。以上を踏まえて、本研究では流星検出のため、まず最初に F2 枚の時間的に連続するフレームの中から、短時間だけ増光した画素を抽出することで、星や雲を除外した。増光の判定は、明るさにゆらぎがあること

を考慮して，式 (3.1) を閾値とした．

$$C_1 > C_n + (G\sqrt{C_n} + H) \quad (3.1)$$

ここで C_1 は F2 枚の中で画素がもっとも高い輝度を示したときの輝度値， C_n は F2 枚の中で n 番目に輝度が高かったときの輝度値， G と H は定数である．恒星や雲の場合，数フレームに渡って高い輝度が記録されるため， n に適切な数値を設定することで恒星や雲を除外することができる．パラメタ G と H はゆらぎの大きさを表すもので，これらに大きな値を設定すれば，ゆらぎを流星による増光と誤って判定する確率は低くなるが，一方で，暗い流星がゆらぎと判定されて見逃される確率は高くなる．誤検出と見逃しのバランスがとれたパラメタ値の設定については，3.5 節で議論する．

3.3 段階 2

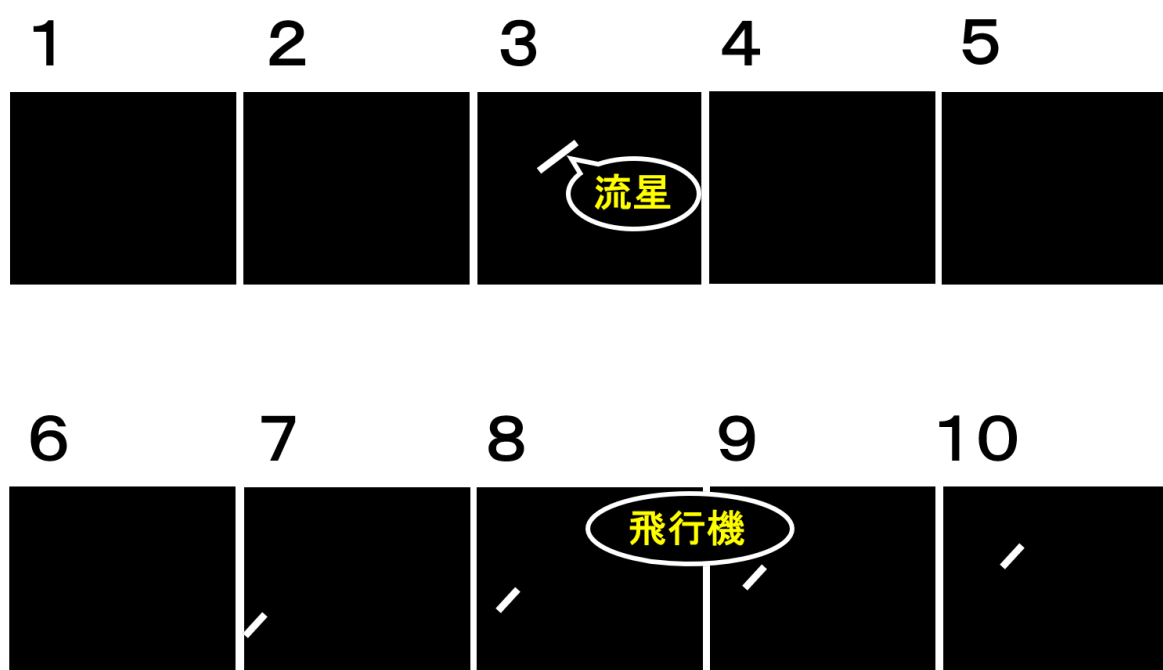


図 3.5: 夜空画像の時間変化イメージ図．

図 3.5 は，図 3.2 と同様に，一定の時間間隔で撮影した画像を時系列で並べたイメージ図である．ただし，前節で説明した手順によって，各フレームについて短時間だけ増光したと判定された画素を白で塗り，それ以外の画素は黒とした．3 枚目で白く見えているものは，前後のフレームに接続するものがないため，流星に

よる発光と推定される．7から10枚目に白く見えているものは，前後のフレームに写っているものとの関係から，飛行機または人工衛星の発光を捉えたものと推察される．

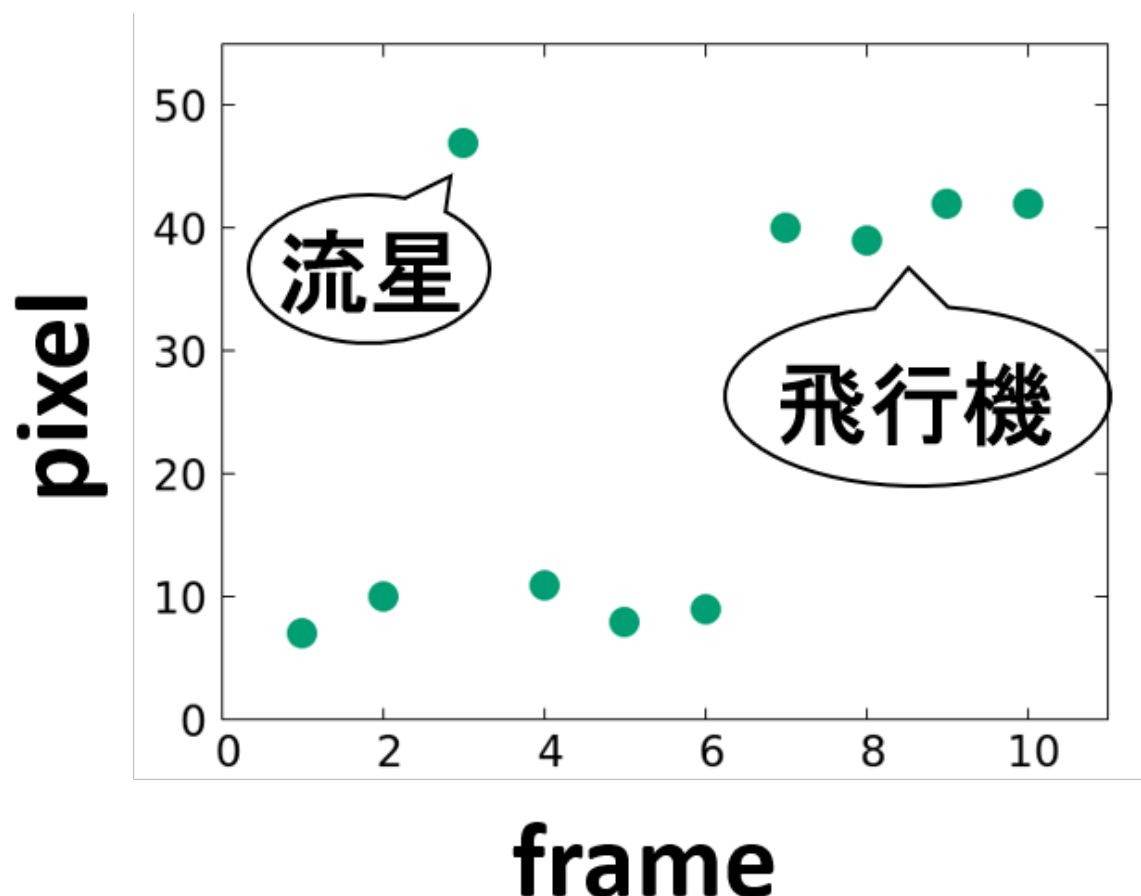


図 3.6: 短時間だけ増光したと判定された画素数の時間変化．横軸は時系列に沿ってフレームに番号を振ったときのフレーム番号，縦軸は各フレームに含まれる短時間だけ増光したと判定された画素の数．

図 3.6 は，図 3.5 の各フレームで短時間の増光と判定された画素の数を数えて，それを時間順に並べたものである．増光した画素数の時間変化は，流星の場合には1フレーム(か2フレーム)だけのスパイク状の増大となるのに対し，飛行機や人工衛星の場合には視野に入ってから出ていくまでの数フレームに渡る台地状の増大となる．

本研究では，I 番目のフレームが以下の2つの条件を満たすとき，I 番目のフレー

ムでスパイク状の増大があったと判定した.

$$P_I > P_{I-X} + Y \quad (3.2)$$

$$P_I > P_{I+X} + Y \quad (3.3)$$

ここで, P_I は I 番目のフレームに含まれる短時間の増光と判定された画素の数, X と Y はパラメタである.

3.4 パラメタ

本研究の流星検出アルゴリズム (図 3.6) には, 表 3.1 のパラメタが使用されている.

記号	意味	試した数値
F1	比較明合成するフレーム数	30, 60, 90
F2	増光画素抽出に使用するフレーム数	10, 20, 30
G	増光画素判定のパラメタ	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
H	増光画素判定のパラメタ	0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
n	増光画素判定のパラメタ	3, 4, 5
X	流星存在判定のパラメタ	2, 3, 4
Y	流星存在判定のパラメタ	30, 40, 50, 60

表 3.1: 流星検出アルゴリズムに含まれるパラメタ.

撮影システムで得たデータは, 動画の形式で保存されている. 最初に, 動画をコマに分割し, 連続する F1 コマを比較明合成することによって画像のノイズを軽減する. 30fps で記録しているため, 30 枚比較明合成をすると 1 秒間に撮影された画像が 1 枚の画像に, 60 枚比較明合成をすると 2 秒間に撮影された画像が 1 枚の画像になる. 比較明合成する枚数が少ないと, 流星の発光継続時間内に複数の画像が生成することになり, 流星は数枚に渡って写ることになる. 流星の発光が 2 秒程度継続する場合, 30 枚比較明合成の場合 3 枚に, 60 枚, 90 枚比較明合成の場合 2 枚に渡って流星が写る可能性がある. 時間的に連続する F2 枚のフレームについて, 3.2 節の方法によって短時間だけ増光した画素の判定をした. 30 枚比較明合成なら 3 枚, 60 枚, 90 枚比較明合成なら 2 枚の連続するフレームに存在する短時間だけ増光したと判定された画素数を合計する. そして, 短時間の増光と判定された画素の数がスパイク状に増大したフレームを抽出することで, 飛行機と人工衛星を除外し, 流星のみを抽出した.

3.5 性能評価

検出結果は、流星を正しく検出する真陽性 (True Positive)、流星がないときに検出をしない真陰性 (True Negative)、流星がないのに誤って検出する偽陽性 (False Positive)、流星があるのに検出しない偽陰性 (False Negative) の4つに分類される (表 3.2)。真がついた2つが正解で、偽がついた2つは不正解である。偽陽性 (FP) は誤検出、偽陰性 (FN) は見逃し、と言い換えた方がわかりやすいかもしれない。見逃し (FN) を減らそうとして、増光の判定を甘く (弱い増光や増光した画素数が小さいものを検出するように) すると、流星の見逃し (FN) は減るが、誤検出 (FP) が増える。逆に誤検出 (FP) を減らそうとして、増光の判定を厳しく (弱い増光や増光した画素数が小さいものを検出しないように) すると、見逃し (FN) が増える。誤りのない検出は不可能であるとしたら、見逃しをどこまで許容できるか (あるいは、誤検出をどこまで許容できるか) に対応して、検出アルゴリズムの最適なパラメタは決まることになる。

本研究では、まず 2019 年 8 月 12 日夜に岡山大学天文台で取得した画像について自動検出を行って、その結果から成績のよい 18 通りのパラメタの組み合わせを選定した。次いで、2019 年 8 月の 1 ヶ月分について自動検出を行い、4 通りのパラメタの組み合わせを選定した。さらに、4 通りのパラメタの組み合わせについて、2019 年 9 月と 10 月の 2 ヶ月について自動検出を行って、自動検出の成績の普遍性について調査した。

		流星	
		あり	なし
検出	あり	真陽性 (TP)	偽陽性 (FP)
	なし	偽陰性 (FN)	真陰性 (TN)

表 3.2: 検出結果.

3.5.1 2019年8月12日夜の自動検出

2019年8月12日はペルセウス座流星群の極大日で、天候が良好であった岡山でもいくつかの流星が観測された。2019年8月12日夜に撮影された画像を目で見て、18個の流星が記録されていることを確認した(表3.3)。

流星	流星があった時刻
1	2019-08-12 20:12:14
2	2019-08-12 21:38:53
3	2019-08-13 00:04:42
4	2019-08-13 00:13:41
5	2019-08-13 00:14:38
6	2019-08-13 01:05:37
7	2019-08-13 01:14:11
8	2019-08-13 01:23:31
9	2019-08-13 02:06:03
10	2019-08-13 02:06:36
11	2019-08-13 02:17:07
12	2019-08-13 02:24:10
13	2019-08-13 02:44:46
14	2019-08-13 03:03:59
15	2019-08-13 03:32:10
16	2019-08-13 03:38:48
17	2019-08-13 04:05:28
18	2019-08-13 04:07:20

表 3.3: 2019/08/12 夜に流星が撮影された時刻.

図 3.7 は 10692 通りのパラメタの組み合わせで自動検出を行った結果である。各パラメタの組み合わせ 1 つにつき 1 つの点がプロットされるが、重なってプロットされているものもある。本研究では、結果が良好なもの (偽陽性と偽陰性の両方が少ないもの) として、橙色の丸で囲った 18 通りのパラメタの組み合わせを選定した。以下、パラメタの組み合わせに A から R の符号を振って、パラメタの組み合わせを区別する。それぞれで使用したパラメタの値は表 3.4 に示す通りである。

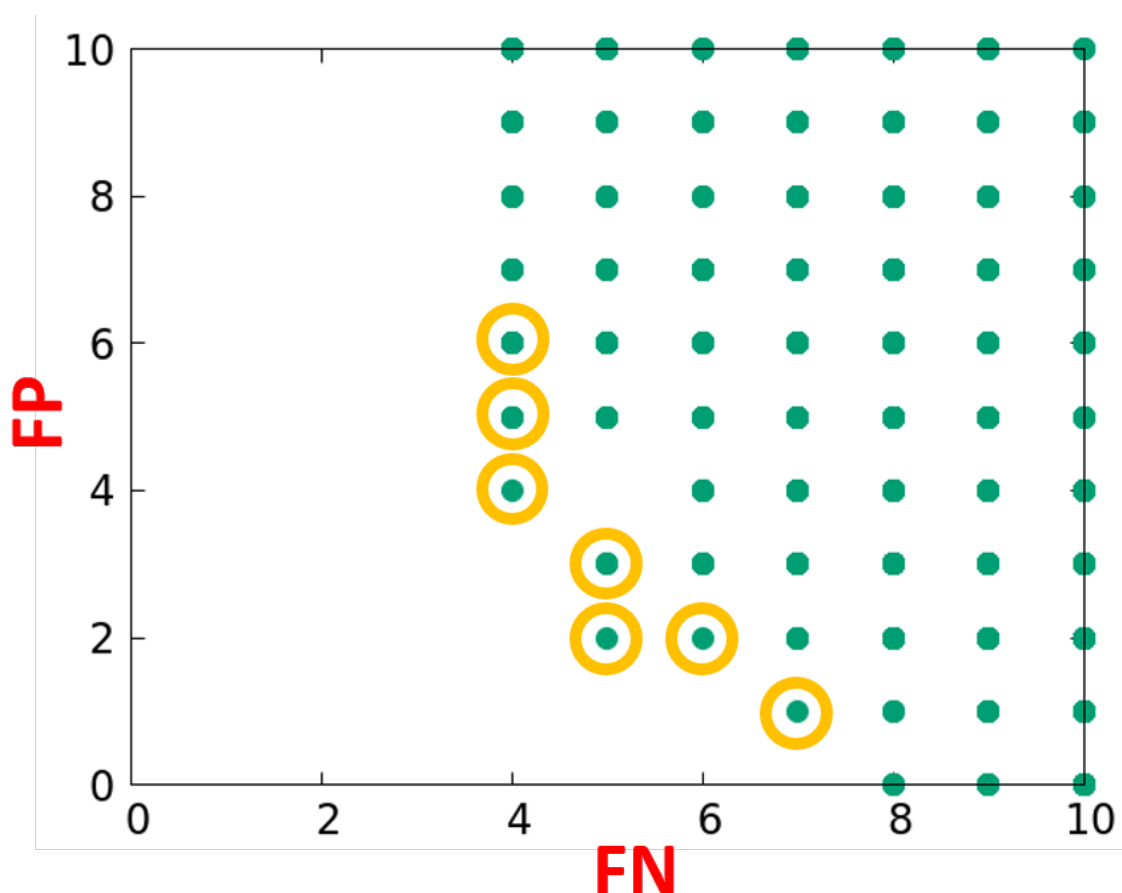


図 3.7: 2019/08/12 の自動検出結果。
横軸は偽陰性の数, 縦軸は偽陽性の数。

	$F1$	$F2$	G	H	n	X	Y
A	30	10	1.0	4	3	3	50
B	30	10	1.0	5	3	3	40
C	30	10	1.5	0	3	3	40
D	30	10	1.5	2	4	3	40
E	30	20	1.0	5	3	3	40
F	30	30	1.5	1	4	3	40
G	60	10	1.0	4	3	3	50
H	60	10	1.0	5	3	2	50
I	60	10	1.5	0	3	2	50
J	60	10	1.5	2	3	2	40
K	60	10	1.5	2	5	2	50
L	60	10	1.5	3	5	2	40
M	30	10	1.5	1	3	3	50
N	30	10	1.5	1	4	3	50
O	30	10	1.5	2	4	3	50
P	30	10	1.5	2	5	3	50
Q	30	10	2.0	0	4	3	40
R	60	10	2.0	0	5	2	50

表 3.4: 選定した 18 通りのパラメタの組み合わせ.

表 3.5 は自動検出の結果をまとめたものである. 検出した場合は○, 見逃した場

合を×として表している．4, 6, 10, 13 の4つの流星は，今回選定した18通りの全てで見逃しとなった．これらは暗い流星であり，今回試した10692通りの全てで見逃しとなった．暗い流星を検出するためには，アルゴリズムの変更が必要かもしれない．

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
B	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
C	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
D	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
E	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
F	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
G	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
H	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
I	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
J	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
K	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
L	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○
M	○	○	○	×	○	×	○	○	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○
N	○	○	○	×	○	×	○	○	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○
O	○	○	○	×	○	×	○	○	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○
P	○	○	○	×	○	×	○	○	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○
Q	○	○	○	×	○	×	○	×	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○
R	×	○	○	×	○	×	○	×	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○

表 3.5: 流星検出の結果．検出は○，見逃しは×．

3.5.2 2019年8月の自動検出

前節で選定した18通りのパラメタの組み合わせを用いて2019年8月の全データ(31夜分)で流星の自動検出を行った。図3.8は各夜の検出数(真陽性と偽陽性の和)を図に描いたものであるが、8/10、8/14、8/15、8/20、8/22、8/27、8/29はどのパラメタの組み合わせでも突出して検出数が多くなった。この7夜の検出結果を確認したところ、雲、雨、雷などを誤検出(FP)していることがわかった。そのような天候のときは、そもそも流星を観測する可能性が低いので、流星の自動検出の対象にならないと考え、7夜を除いた24夜分の結果を用いてパラメタの性能評価を行うことにした。

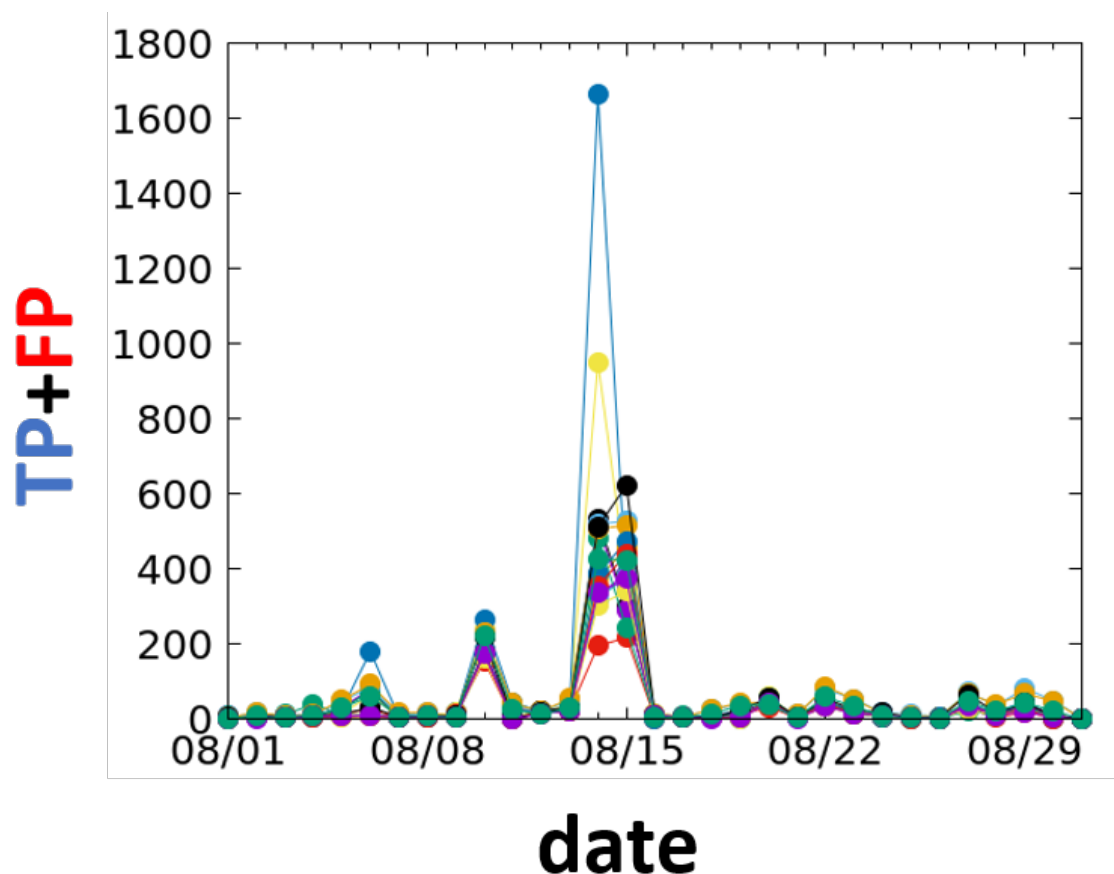


図 3.8: 2019/08 の自動検出結果.
横軸は日付, 縦軸は検出数 (真陽性と偽陽性の和).

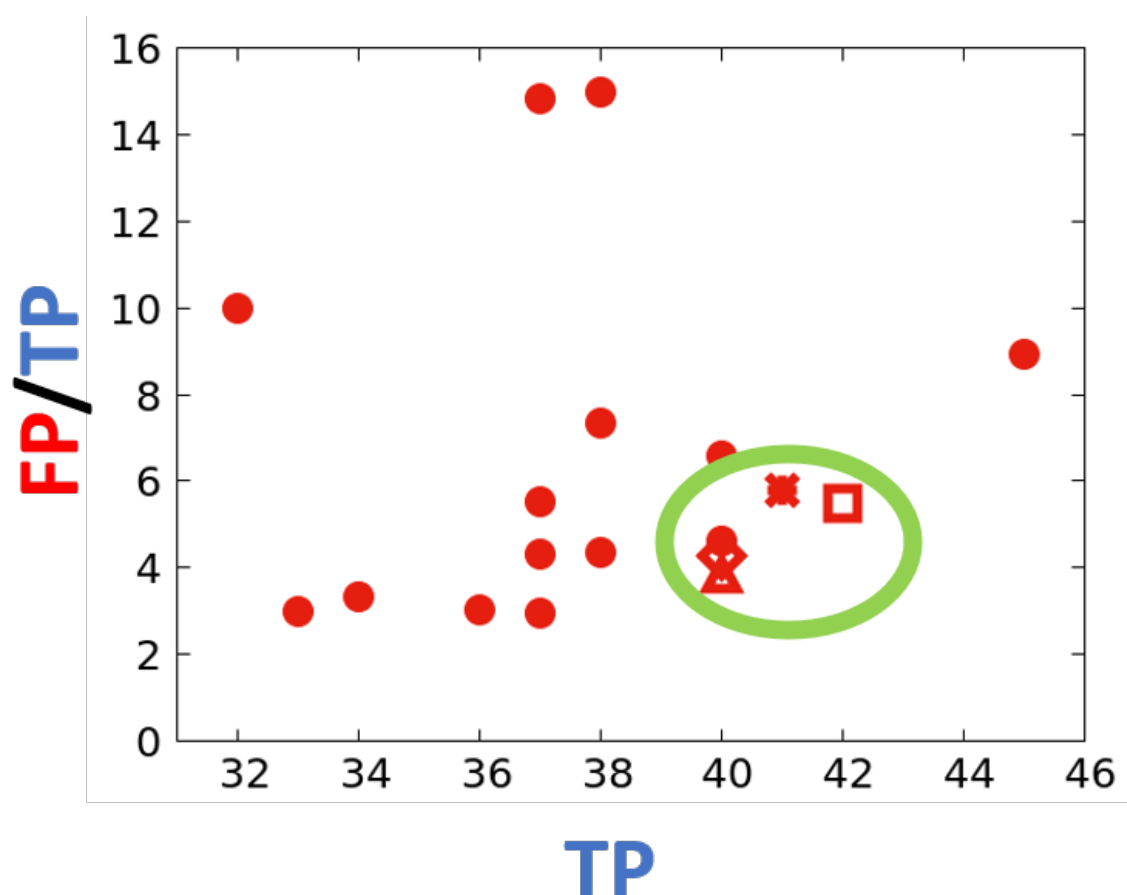


図 3.9: 2019//08 の自動検出結果 (悪天候日を除く).
横軸は真陽性, 縦軸は偽陽性/真陽性.

図 3.9 は, 2019 年 8 月の天候が良好であった 24 夜について自動検出を行った結果である. 点の一つ一つは, パラメタの組み合わせの一つ一つに対応する. 図の縦軸は偽陽性/真陽性を描いている. 真陽性 1 つに対し, 偽陽性がいくつ出たのかを表す. 自動検出の後に人の目で見えて判定を行うことを考えると, 誤検出が多いものは使い勝手が悪い. 本研究では図 3.9 の緑で囲ってある中の, 4 つのパラメタの組み合わせを選ぶことにした. 選定した 4 つのパラメタの組み合わせを表 3.6 に

示す.

パラメタ									2019/08/ 12	2019/08		
	形	$F1$	$F2$	G	H	n	X	Y	FN	FP	TP	FP/TP
C		30	10	1.5	0	3	3	40	4	6	40	4.3
D		30	10	1.5	2	4	3	40	4	5	40	3.8
E		30	20	1.0	5	3	3	40	4	6	42	5.5
J		60	10	1.5	2	3	2	40	4	5	41	5.8

表 3.6: 選定した4通りのパラメタの組み合わせとその自動検出結果.
形は, 図 3.9, 図 3.10 にプロットした点の形.

3.5.3 2019年9月と10月の自動検出

前節で選定した4つのパラメタの組み合わせを用いて, 2019年9月と10月の流星自動検出を行った. 前節と同様に, 天候が良好でなかった夜を除くと, 9月は27夜, 10月は29夜になった. 自動検出を行った結果をまとめ, 8月の結果も含めて

図 3.10 を作成した.

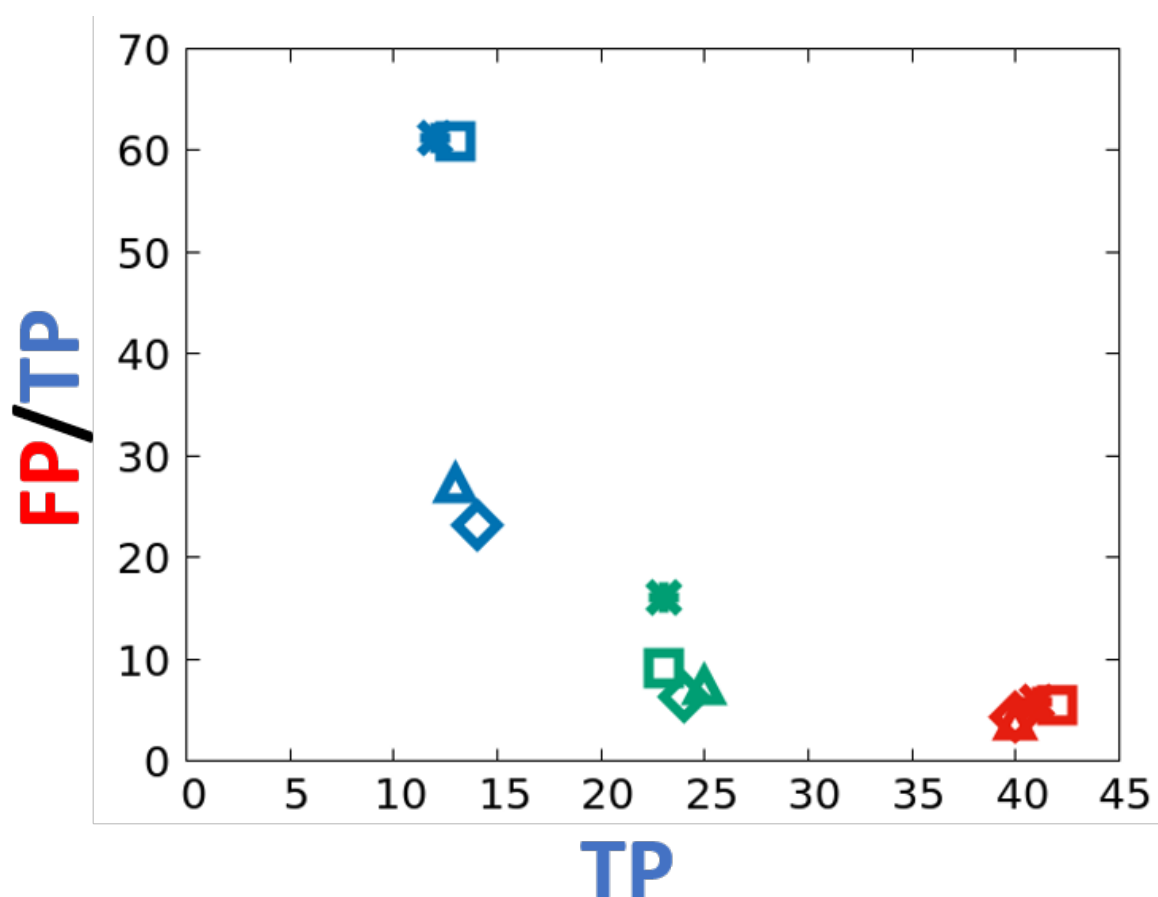


図 3.10: 2019 年 8 月, 9 月, 10 月の自動検出結果.
横軸は真陽性, 縦軸は偽陽性/真陽性. 色は月を表し, 赤は 8 月, 青は 9 月, 緑は 10 月である. 形はパラメタの組み合わせを表す (表 3.6).

8 月と 10 月については 4 つのパラメタの組み合わせについてあまり変わらない結果となったが, 9 月は結果が 2 つに分かれた. この理由は不明である. 他の月で試したらどのパラメタが良い結果になるかも不明である. 他の月でもこの 4 つのパラメタの組み合わせで自動検出を行い, 性能を評価する必要がある.

第4章 まとめ

流星検出アルゴリズムを考案し，プログラムを書いて実装した．パラメタの調整は十分とは言えないが，長時間夜空を眺めて流星を見つけるよりはずっと楽に流星を見つけることができるようになった．一番良いパラメタの組み合わせでは，偽陰性率が22.2%で，8割弱の流星を検出することができる．ただし偽陽性率は高く，9個検出したうちの8個は間違いである．

今後は，多点観測によって流星の高度を決定する予定である．流星は，高度約100～200kmで発光しているのに対し，飛行機は高度10km，人工衛星は高度400kmと，発光している高度が異なる．そのため，発光の高度を求めれば，飛行機や人工衛星を簡単に除外することができる．今回作った撮影システムは，安価でありかつ設置した後は手間がかからないので多点観測網を構築するのに向いている．

第5章 謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導いただきました指導教官である はしもとじょうじ 教授に心より感謝いたします.