

流星観測システムの構築： 防犯カメラで撮影した岡山の夜空

理学部地球科学科 原口 美悠

要旨

市販されている防犯カメラを用いて夜空を動画撮影するシステムを設置し、流星候補を自動検出するパイプラインと組み合わせることで、安価な流星観測システムを構築した。流星候補自動検出パイプラインのアルゴリズムは、時間変化を見て流星候補を抽出するものである。時間間隔と変化量というパラメタによって、検出感度を調整することができる。ペルセウス座流星群の活動が極大になる時期の近くで晴天になった日を選んで、自動検出のパラメタ調整をおこなった。2019年8月12日は16個の流星が撮像されていたが、本研究で作成したパイプラインはそのうち14個を検出した(適合率 87.5%)。一方で、自動検出で流星候補とされたものの流星ではなかったものは4個あった(再現率 77.8%)。誤検出(流星候補と判定されて流星でなかったもの)の多くは飛行機や人工衛星で、それらは発光の継続時間が流星に比べると長い。発光の継続時間を自動検出アルゴリズムに組み込むことで、自動検出の効率を向上させることができると期待される。

第1章 流星観測システム

いつどこに出現するかわからない流星を観測するためには、自動で流星を観測する流星観測システムを常時稼働させておくのがよい。そのような流星観測システムは既にいくつか稼働しているが、設置にかかるコストの高いことが数を増やす上での制約になっている。観測点を増やすことは、監視領域を広げることだけでなく、ひとつの流星を多点観測することで流星の軌道決定精度を向上させることにもつながる。安価な流星自動観測システムを構築して観測点を増やすことができると、流星観測は量的にも質的にも変わるものと期待することができる。

本研究は、市販の安価な防犯カメラを用いて流星自動観測をおこなうシステムを構築し、実際に流星の自動検出をおこなって流星自動観測システムの有効性を検証した。

第2章 安価な流星観測システムの構築

2.1 観測システムの概要

岡山大学津島キャンパス内にある自然科学研究棟の屋上に設置した流星観測システムの概要を表1にまとめた。夜空の動画撮影をおこなうカメラは市販の防犯カメラSJC21Bで、その見た目と仕様は図1と表2である。このカメラはもともと屋外設置用で防水性能があるため、そのまま屋外に設置することができる。今回は、旗竿用としてホームセンターで販売されていたコンクリート製の土台に、塩化ビニール製のパイプと継手を使ってカメラを取り付けて、建物の屋上に設置した(図2)。カメラが出力する信号は、ケーブル(長さ10m)で建物内に引き込み、USBビデオキャプチャーを介してパソコンに読み込んで保存する(図3)。パソコンのOSはUbuntu、動画の保存はフリーソフトウェアであるFFmpegを用いた(パソコンは2011年に購入された古いもので、機材の更新によって廃棄される予定の物品をもらい受けたものである)。夏季(4月から9月)は18:00から30:00(翌日06:00)までの12時間、冬季(10月から3月)は17:00から31:00(翌日07:00)までの14時間、毎日、空の動画撮影をおこなうようにした。



図 1 : 防犯カメラ SJC21B



図 3 : 動画読み込み, 保存用パソコン



図 2 : カメラ設置状態

夜空の動画は、色は白黒、解像度は 640x480、フレームレートは 30fps、とした。カメラはカラー撮影が可能な機種であるが、低照度下では感度を上げるため白黒撮影になる。カメラ自体はフル HD(1920x1080)の解像度で出力することが可能であるが、使用したビデオキャプチャが解像度 640x480 のコンポジット映像信号(CVBS)を取り込むものであったため、カメラの出力をアナログにして 640x480 の解像度でキャプチャする。また、フレームレートは 30fps で記録しているが、光量が小さくなる夜間にはデジタルスローシャッターによって感度を増幅して撮影がおこなわれるため、カメラの出力自体は 1~2fps でしかない(夜間に撮影された動画をコマ送りで見ると、15~30枚、同じ画像が連続していることを確認することができる)。

図 4 は、2019 年 10 月 10 日の早朝に撮像された動画の 1 コマである。カメラはほぼ天頂を向くように設置したので、画面中央が天頂になる。方位は、左が北、下が東、右が南、上が西、である。画面の左端の中央よりやや上にうっすら写っているのが北極星、右上の青い丸で囲った場所にオリオン座、中央の赤い丸で囲った場所にぎょしゃ座、緑の丸で囲った星はおおいぬ座のシリウス、である。カメラは特別な調整などしていないが、空の状態が良ければ 3 等星より暗い星まで写る。

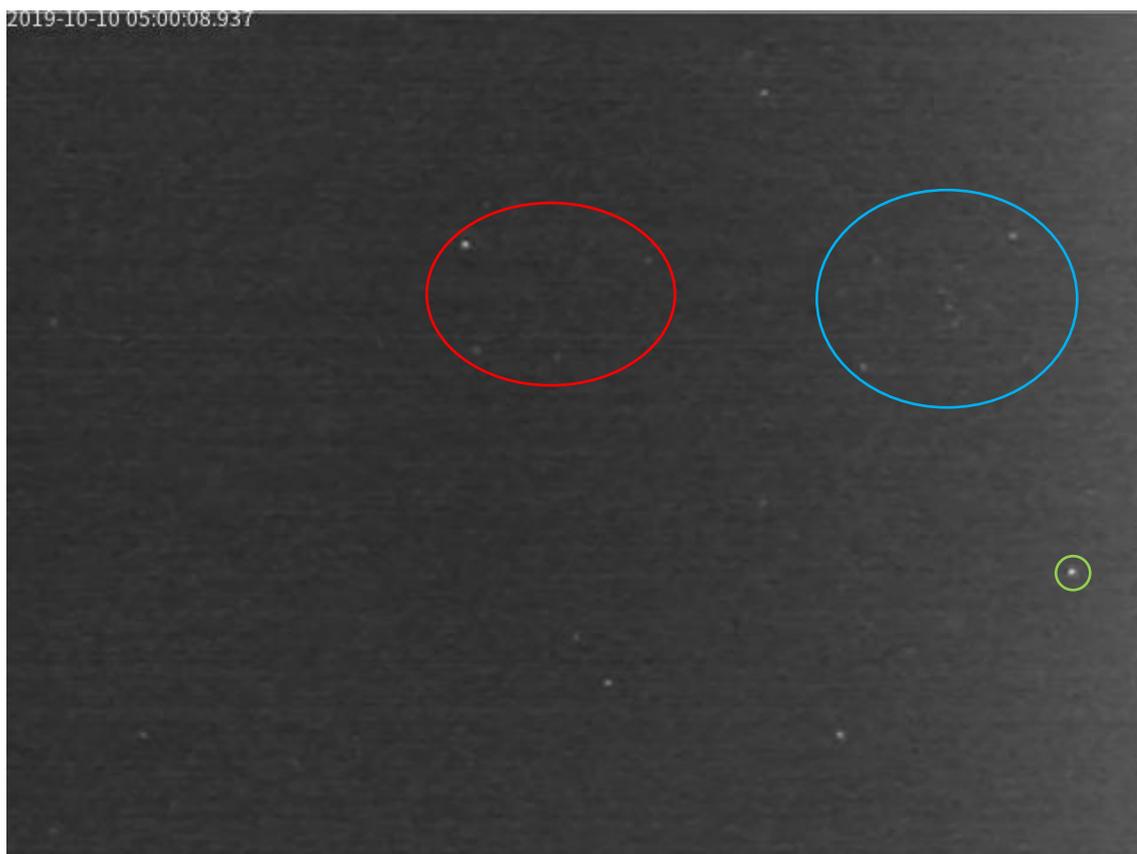


図4：2019年10月10日05:00の岡山の空.

表1：機材一覧

品名	金額 (円)
広角屋外用防犯カメラ	19,800
変換コネクタ	450
露出ボックス 2個	492
旗立ベース	1,598
継手	52
USB コンポジット オーディオ/ビデオ ビデオキャプチャーアダプタ	4,536
ケーブル (長さ: 10m)	3,420
合計	30,348

表 2：防犯カメラ SJC21B の仕様

センサー	1/2.8 インチ SONY Exmor CMOS
画素数	248 万画素
寸法 (mm)	直径 37×奥行 90
画角	水平 98 度
レンズ	焦点距離 2.5mm
防水性能	IP66

2. 2 流星候補検出パイプライン

撮影された動画はパイプラインに流して流星候補を検出する。図 5 は今回構築したパイプラインの概略である。以下、各手順について説明する。

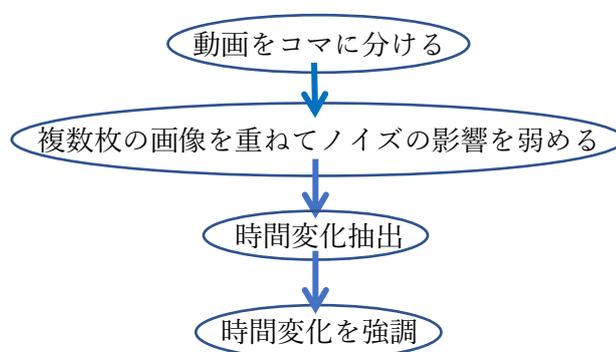


図 5：パイプライン概略

2. 2. 1 動画から静止画を生成する

撮影した動画は FFmpeg を用いてコマ(静止画)に分ける。動画は 30fps なので、録画時間が 12 時間の動画からは 1,296,000 コマ、14 時間の動画からは 1,512,000 コマの静止画が生成する。

2. 2. 2 ノイズ軽減

コマを連続する何枚かずつに分けて、それぞれから1枚の画像を合成する。カメラの出力が1-2fpsでしかないので、動画から生成したコマは、1fpsであれば30コマ、2fpsであれば15コマ、同じ静止画が連続する。したがって、それらを集めて1枚の画像を合成しても情報が失われることはない。それ以上の枚数を集めて合成をおこなうと、時間分解能は低下することになるが、枚数を増やすことでノイズを低減することができる。何枚の画像を集めるのかは、時間分解能とノイズ低減要求の兼ね合いで決定される。また、集めた画像を合成する方法についてもいくつかの選択肢がある。本研究では、平均(mean)をとる場合と、比較明合成(max)をおこなう場合の2通りについて、検討をおこなった。比較明合成は、各画素について複数の画像の中から最も明るい画素値を採って画像を合成する方法である

2. 2. 3 時間変化抽出

ノイズ軽減で生成した画像について、時間的に連続する2枚の画像の差分をとって、時間変化を抽出する。カメラは固定しているため、この処理によってカメラの視野内を移動するものが検出される。流星のように高速で移動する光点はもちろん抽出される。恒星もまた日周運動によって移動しているが、その移動速度は流星に比べると遅いため、差分をとる2枚の画像の時間差を十分に小さくすることで、移動量が画像の解像度よりも小さくすることができ、恒星は抽出されないようにすることができる。

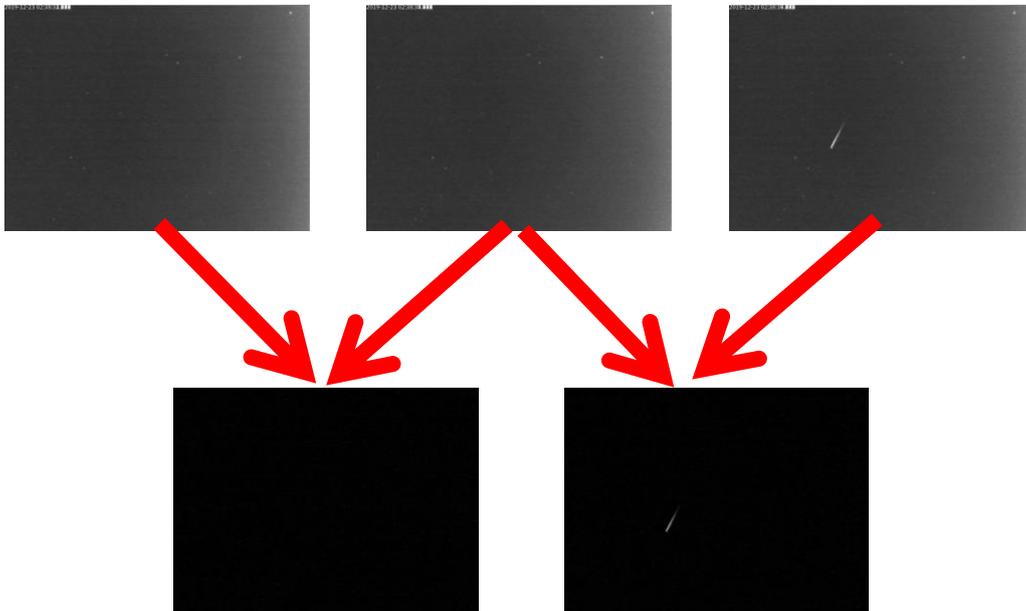


図6：時間変化抽出。上段の3枚はカメラが撮像した画像で、左、真ん中、右、の順番に撮像された。上段左と真ん中の画像のように流星が写っていないなら、2つの画像で差を

とると何も残らない(下段左). 上段右の画像のように流星が写っていると, 差をとったときに流星が残る(下段右).

2. 2. 4 変化量の計量

時間変化を抽出した各画像について, それぞれ閾値を決めて, 閾値より大きな変化があった画素の数を時間変化量と定義する. 閾値 t は, 画像に含まれる全画素値の平均 m と標準偏差 s を用いて,

$$t = m + a \times \alpha \dots (1)$$

で与えるものとした, パラメタ α の値を小さくすると, 光の微かな変化を抽出することになって暗い流星まで検出することができるようになるが, 一方で, ノイズも時間変化として抽出される可能性が高くなる. 微光流星を見逃さないようにすることと, ノイズを誤検出しないこと, 両者のバランスでパラメタ α の最適値は決定される.

2. 2. 5 流星候補の判定

時間変化量の閾値を与えて, 閾値よりも大きな時間変化があった時刻を流星候補と判定する. 時間変化量の閾値を小さくすると, 微光であったり光跡が短かかったりする流星も検出することができるようになるが, 一方で, ノイズも流星候補として検出される可能性も高くなる. 時間変化量の閾値もまた, 検出と誤検出のバランスで最適値が決定される.

2. 2. 6 流星の判定

流星候補と判定された時刻の画像を目で見て, 流星であるか否かの判定をおこなう.

2. 3 流星候補検出パイプラインの調整

ペルセウス座流星群の活動が活発であった 2019 年 8 月 12 日夜の動画を用いて, 流星候補検出パイプラインのパラメタ調整をおこなった. 月明かりや雲の影響が少ない時間帯である 23:32~28:16 について, 全画像を自分の目で見て流星を同定し, 16 個の流星が撮像されたことを確認した. 次に, いくつかあるパラメタを変更して流星候補の自動検出をおこない, その結果を目で見て判定した結果と比較して, パラメタの最適値を探索した. 調整したパラメタと探索で使用した値は表 3 にまとめた.

複数のコマをまとめて 1 枚の画像に合成するノイズ軽減の処理において, 合成するコマの数は, 15, 30, 60, 120 の 4 通りを試した. 動画は 30fps で記録しているので, それぞれ 0.5 秒間, 1 秒間, 2 秒間, 4 秒間, に記録された画像を重ね合わせたことになる.

表3：流星候補自動検出パイプラインのパラメタ

処理		試した値
ノイズ軽減	枚数・方法#	15max , 15mean , 15max*2max , 15max*2mean , 15mean*2mean , 15mean*2max , 30max , 30mean , 30max*2max , 30max*2mean, 30mean2max , 60max , 60mean , 60max2max , 60max2mean , 60mean2max , 120max , 120mean
変化量計量	α	8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
流星候補判定	変化量閾値	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100

15max は 15 枚の比較明合成, 30mean は 30 枚の平均, 15mean*2max は 15 枚平均画像 2 枚の比較明合成.

2. 3. 1 自動検出パイプラインの評価

流星の自動検出は, 各画像が流星を含んでいるか否かを判定するものなので, 二値分類(二項分類)と呼ばれる分類作業である. 二値分類の結果は, 予測と実際にそれぞれ正(流星あり)と負(流星なし)があるため, 図7に示すような 2x2 の行列にまとめられる. 予測が正(流星あり)で実際に正(流星あり)と, 予測が負(流星なし)で実際に負(流星なし), 以上の2つは正解(true)で, 前者を true positive (TP), 後者を true negative (TN)と呼ぶ. あとの2つは不正解(false)で, 予測が正(流星あり)で実際に負(流星なし)は false positive (FP), 予測が負(流星なし)で実際に正(流星あり)は false negative (FN)である. FP は誤検出, FN は見逃し, と言えわかりやすい. 二値分類の結果を評価する指標はいくつかあるが, ここでは以下の式で定義される再現率 r と適合率 p を用いて, パイプラインの評価をおこなった.

$$r = TP / (TP + FN)$$

$$p = TP / (TP + FP)$$

再現率が大きいことは見逃し(FN)が小さいこと, 適合率が大きいことは誤検出(FP)が小さいことを意味する.

	実際：正(流星あり)	実際：負(流星なし)
予測：正(流星あり)	true positive (TP)	false positive (FP)
予測：負(流星なし)	false negative (FN)	true negative (TN)

図7：二値分類

表3にある値を用いて、1568通りのパラメタセットで流星候補の自動検出をおこなった。そのなかから、再現率 $r \geq 0.88$ かつ $FP \leq 24$ を満たしたものを、表4にまとめた。この4つのパラメタセットについて、誤検出(FP)と見逃し(FN)のパラメタ α 依存性を図にしたものを図8～11に示す。変化量計量の閾値を設定するパラメタ α を大きくすると、条件が厳しくなるため誤検出(FP)は減るが見逃し(FN)は増える。逆に、パラメタ α を小さくすると、条件が緩くなり、見逃し(FN)は減るが誤検出(FP)は増える。

表4：流星候補自動検出で好成績を示したパラメタセット

	ノイズ軽減 枚数・方法	変化量計量 α	流星候補判定 変化量閾値	適合率 p	再現率 r
A	60max	9	2 5	0.7	0.88
B	60max	8	3 0	0.78	0.88
C	120max	8	2 0	0.38	0.94
D	120max	8	2 5	0.5	0.88

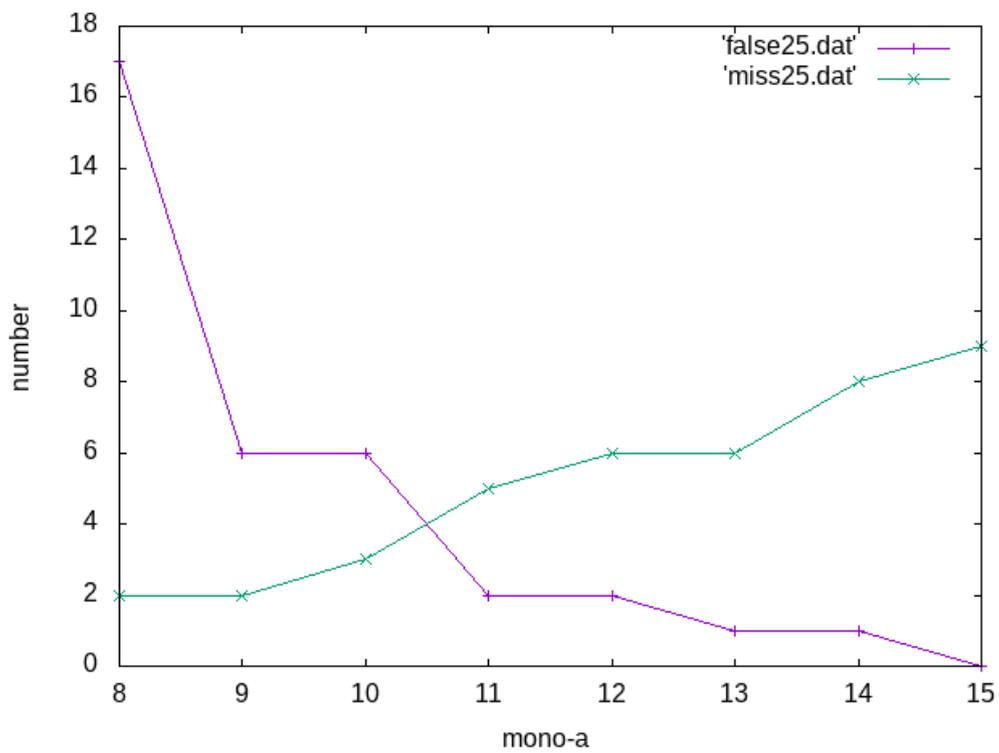


図8：パラメタセット A を用いたときの、誤検出(FP)と見逃し(FN)のパラメタ α 依存性。
誤検出は紫，見逃しは緑。

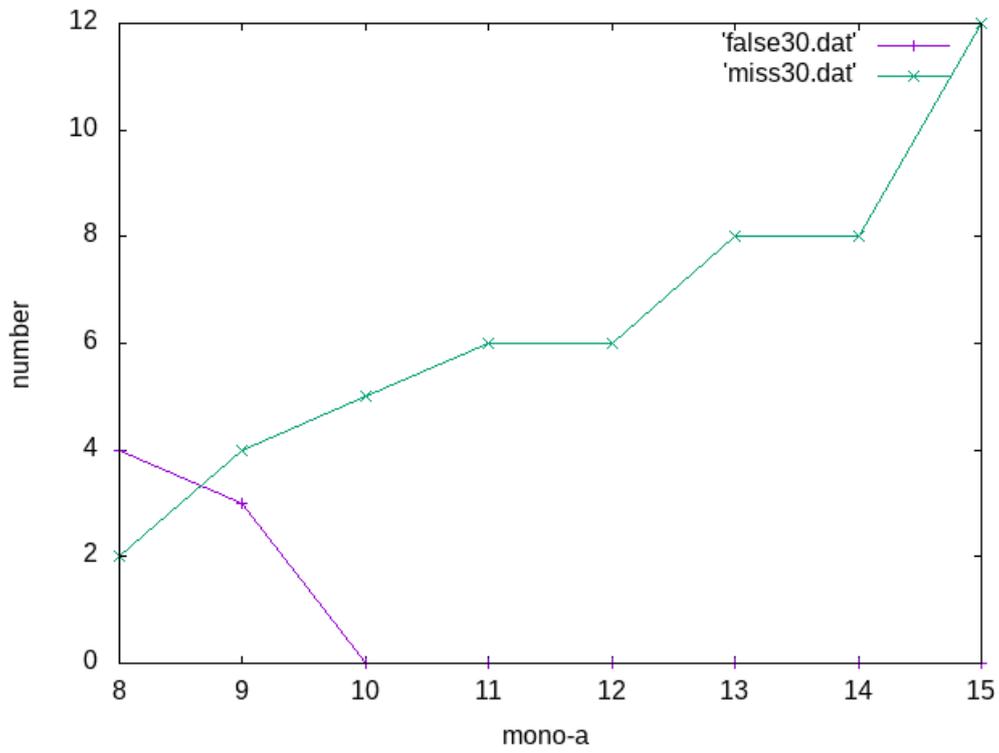


図9：パラメタセット B を用いたときの，誤検出(FP)と見逃し(FN)のパラメタ α 依存性。
誤検出は紫，見逃しは緑。

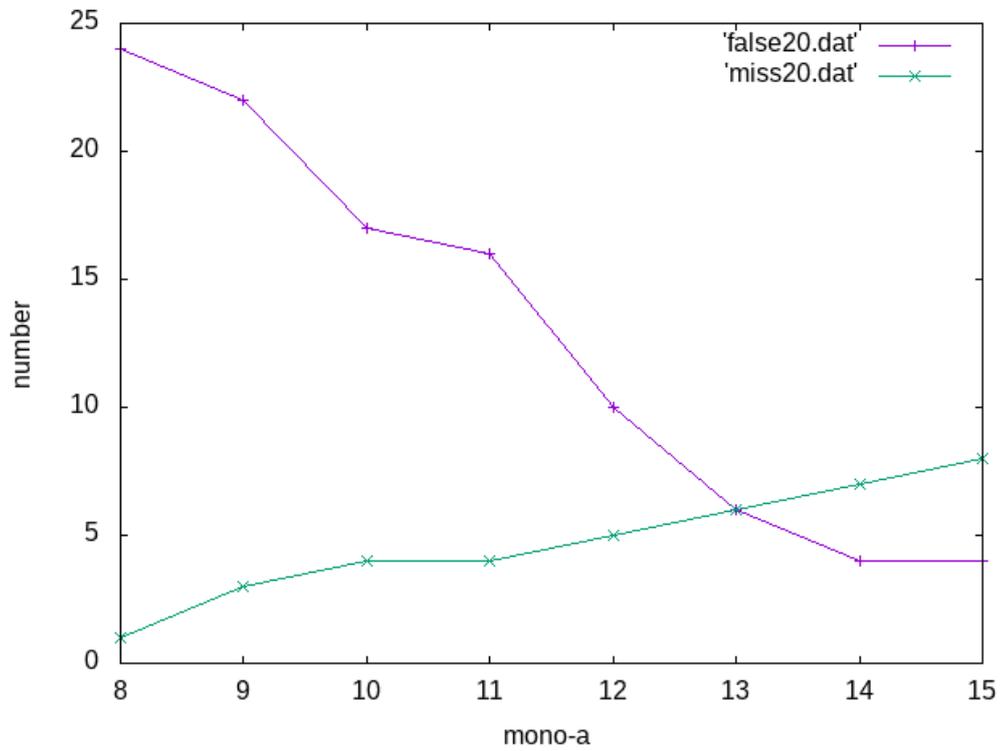


図10:パラメタセットCを用いたときの,誤検出(FP)と見逃し(FN)のパラメタ α 依存性.
誤検出は紫,見逃しは緑.

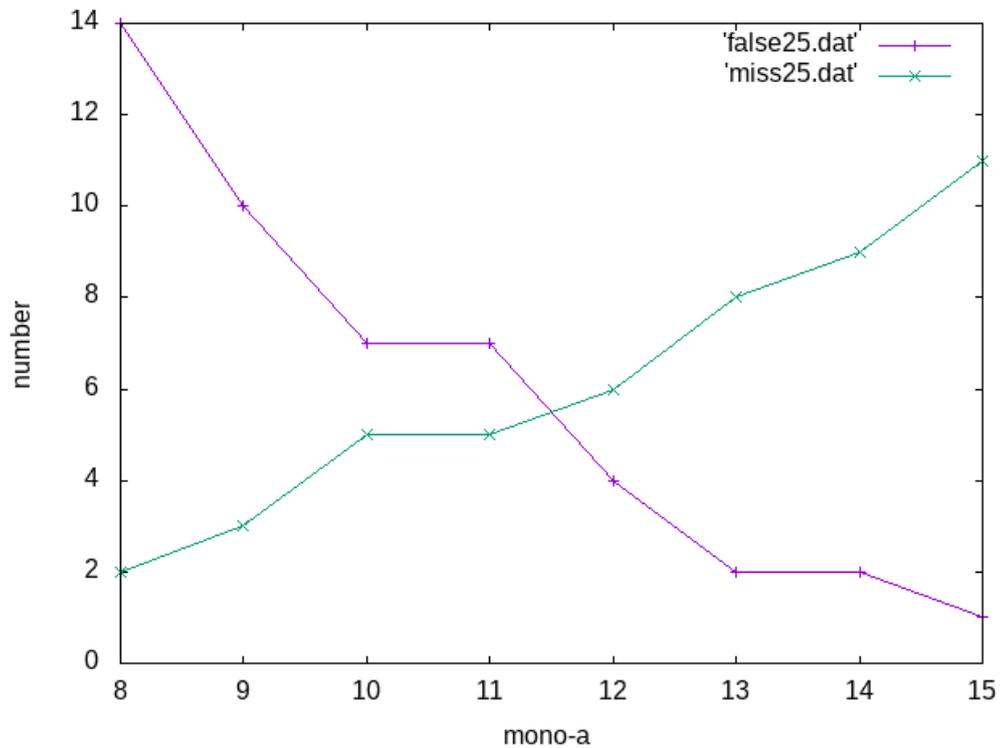


図 1 1 : パラメタセット D を用いたときの, 誤検出(FP)と見逃し(FN)のパラメタ α 依存性.
誤検出は紫, 見逃しは緑.

第 3 章 まとめ

流星自動観測システムを構築して, 流星の自動検出をおこなった. 流星自動検出パイプラインによって, 流星候補の自動検出がおこなえるようになったが, 飛行機, 人工衛星, 雲, などの誤検出が多いことが問題である. 誤検出されたものは流星に比べると発光の継続時間が長いものが多いため, 発光の継続時間を自動検出のアルゴリズムに組み込むことができれば誤検出を減らすことができると考えられる.