

SLIM 画像航法の研究開発状況 (その1:クレータ抽出アルゴリズム)

永田心, 入江順也, 本田翔平, 鎌田弘之(明大), 金澤慧(総研大), 小沢慎治(愛知工科大), 高玉圭樹(電通大),
中谷幸司, 福田盛介, 澤井秀次郎(ISAS/JAXA)

【目 的】

本研究は、SLIM (Smart Landing for Investigating Moon) プロジェクトによる小型月面探査機のための自律的な画像航行システム実現を目指した開発研究を進めている。同プロジェクトでは、カメラで撮影した画像から月面クレータを検出し、その位置関係から飛行位置を推定してエンジン制御を行い、目標地点にピンポイント着陸することを目指している¹⁾。

また、クレータ検出に要する信号処理は、低演算リソースでも高速処理が可能なアルゴリズムが求められる。本研究では、**FPGA** での信号処理を想定し、乗算回数がきわめて少なく、並列処理性に富む、主成分分析によるクレータ検出アルゴリズムを提案している。

さらに、画像航行の精度向上のためには、クレータ位置および半径(直径)の検出精度が求められる。本研究では、主成分分析によるクレータ検出精度を精査し、さらにその検出精度向上の手法について検討する。

【主成分画像の推定】

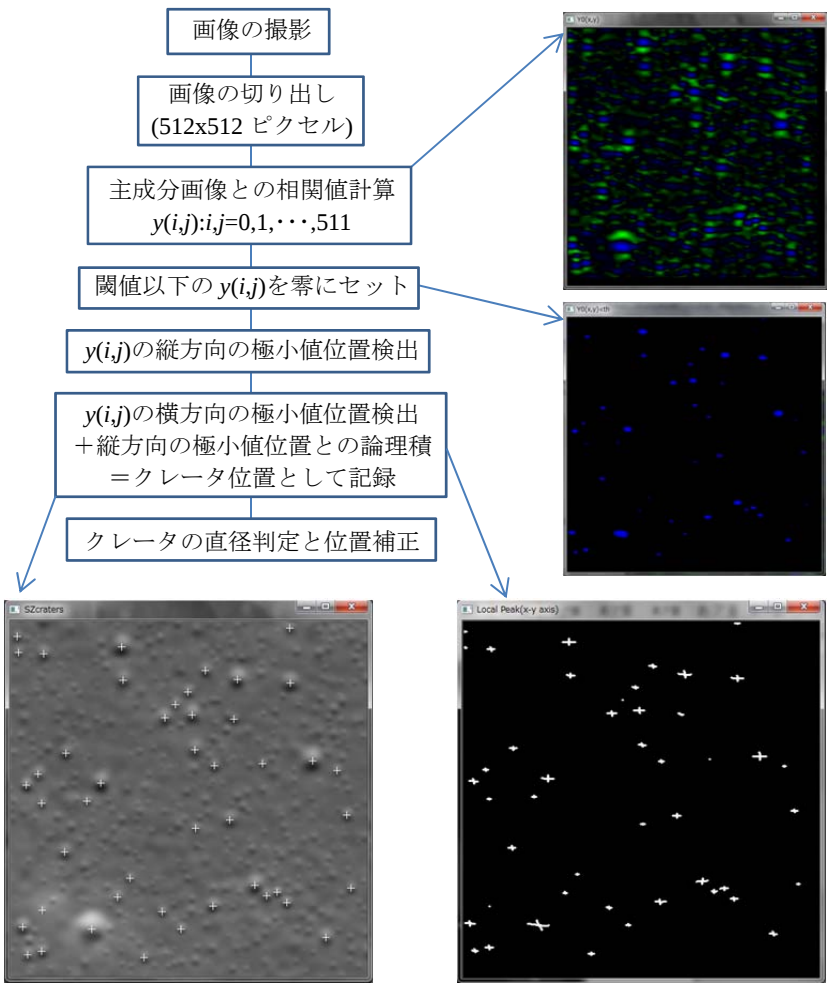
本研究は、検出漏れが少なく、かつ低演算リソースでの高速処理に適した方法として、主成分分析を用いたクレータ検出アルゴリズムを提案している²⁾。これまで検討した主成分分析によるクレータ検出法の概要は、以下の通りである。

- (1) Apollo, LRO、かぐやにより撮影された画像からクレータを切り出し、さらに±45 度の範囲を 5 度刻みで回転させたクレータ画像を加えて、 N =約 16000 枚のクレータ画像を用意する。
- (2) 2 次元 ($M \times M$ ピクセル) であるクレータ画像をラスタスキャンにより 1 次元化 ($L=M^2$ 次元) し、 $N \times L$ サイズの行列 **S** を作成する。さらに $\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T$ (**T** は転置) により共分散行列 **C** を求める。
- (3) 共分散行列 **C** の固有ベクトル $\mathbf{V}_0 \sim \mathbf{V}_n$ を求める。これをラスタスキャンの逆の行程により 2 次元化したものを主成分画像とする。

主成分画像は、「クレータ画像との相関値」と「非クレータ画像との相関値」との差が大きく、単純な閾値判断で、クレータか否か判別できることを確認している。なお行列 **C** の最大固有値に対応する主成分が、クレータの特徴を最も捉えた主成分画像になっている。

【主成分画像を用いたクレータ検出アルゴリズム】

提案法は、FPGA による実現を想定し、乗算回数を最低限にし、並列処理性に富むシンプルなアルゴリズムとして実現する。



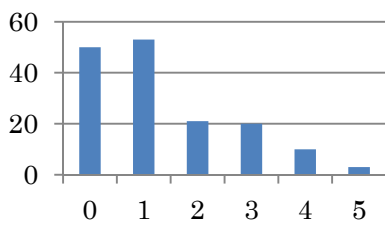
提案法は、Haar-Like 特徴¹⁾を用いた物体認識等と比較して、対象画像の拡大・縮小を必要とせず、様々なサイズのクレータが検出できる。元画像を縮小してクレータ検出した場合、中心座標の位置の精度も低下するため、クレータ検出の高精度化の可能性を保っている。

【クレータ検出の精度】

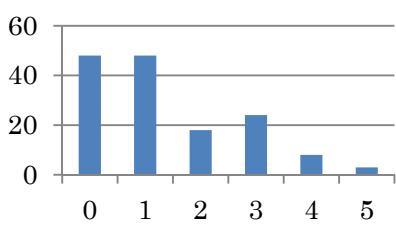
提案法は、分析対象画像の縮小拡大することなしに、15×15 ピクセルサイズの主成分画像を 1 つ用いることで、13×13～30×30 ピクセル程度のクレータを、9 割を超える正答率で検出している。これは、従来法である Haar-Like 特徴等を用いる方法¹⁾を上回る良好な特性である。

一方、JAXA 提供の未学習の合成画像およびクレータデータベースを基準にし、利用する主成分の個数の違いによる、検出クレータの中心座標の精度を検証する。

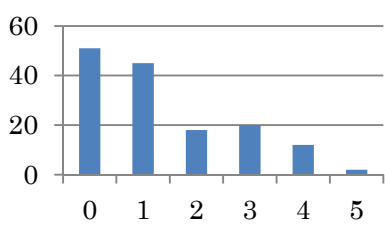
(a) y0 のみを利用



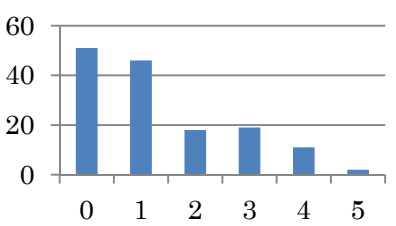
(b) y0, y1 を利用



(c) y0, y1, y2 を利用



(d) y0, y2 を利用

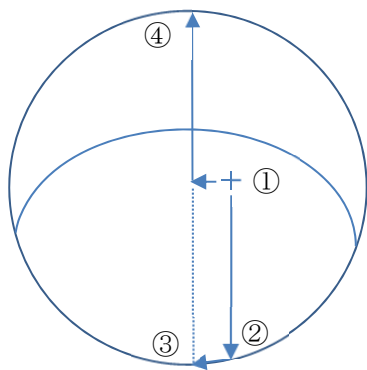


注：y0：第 1 (最大固有値の) 主成分と対象画像との相関値、yn：第 n+1 主成分との相関値
縦軸：クレータの検出個数、横軸：真値からの距離 (単位：ピクセル)

同図が示すとおり、複数の主成分を用いてクレータ位置の検出を行うと、検出精度が向上する。ただしこの方法で検出精度が向上するのは主に 15x15 ピクセルサイズに近いクレータのみである。

【クレータサイズの推定による中心位置の高精度化の方向性】

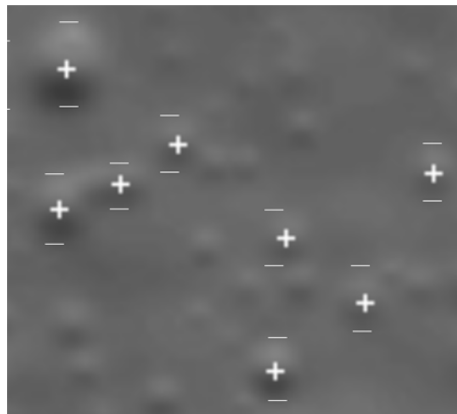
主成分分析により推定された中心座標の検証と高精度化を図るため、以下の要領でクレータサイズを計測する。この方法では、明暗差が大きいクレータ上端および下端のエッジ検出を行うが、これには高速処理を目指し 3x3 ピクセルサイズの Haar-Like 特徴¹⁾を候補としている。



- ① 主成分分析により得られた中心座標(候補)：(Xp,Yp)
- ② クレータ下端の検出：(Xp,Ylo)
- ③ クレータ最下端の検出：(XL,YL)
- ④ クレータ最上端の検出：(XL,Yu)

補正後のクレータ位置：(XL(暫定),(Yu+Yl)/2)
クレータの直径：Yl-Yu+1

利用する Haar-Like 特徴 (候補)	
下端検出	上端検出



+：主成分分析により推定されたクレータ中心位置
-：Haar-Like 特徴により検出されたクレータ上端、下端 (位置精度は、1 ピクセル精度以下まで推定) (この画像は、元画像を縦横 4 倍に拡大したもの。)

【参考文献】

- 1) T. TANAAMI, Y. TAKEDA, N. AOYAMA, S. MIZUMI, H. KAMATA, K. TAKADAMA, S. OZAWA, S. FUKUDA and S. SAWAI, "Crater Detection using Haar-Like Feature for Moon Landing System Based on the Surface Image", The 28 ISTS Special Issue of Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, 10(2012), ists28, pp.39-44(2012)
- 2) 入江,永田,本田,鎌田,金澤,高玉,小澤,中谷,福田,澤井,"主成分分析を用いたクレータ検出の高精度化に関する研究",第 54 回宇科連講演会 3F09(2013-10).