

パノラマ地平線画像を用いた惑星探査ローバーの大域自己位置推定システムの構築 第二報 ロバストな地平線抽出手法の開発

大入 瑛, 永谷 圭司, 吉田 和哉 (東北大学)

Global positioning for Planetary Rovers based on Panoramic Skyline Image - Development of a Robust skyline extraction method -

A.OIRI, K.NAGATANI, K.YOSHIDA (Tohoku Univ.)

Abstract : This paper presents a new skyline extraction algorithm for the localization system of planetary rovers based on the panoramic skyline image. The new algorithm takes the image processing, color information, statistics and dynamic programming to extract the skyline from the omni-directional photo robustly. And we developed a stabilizer which can keep the camera horizontal to get horizontal images because rovers don't always have a flat. In this paper we introduce the new algorithm and show image processing and localization result.

1 緒言

ローバーが、月や火星などで探査活動を行う場合、ローバーには効率的な活動が求められるため、自己位置推定機能の搭載が必要不可欠である。従来の手法(オドメトリ、ビジュアルオドメトリ等)では、長距離移動による誤差の累積によって正確な位置の把握が難しい。また、月や火星では、当然ながらGPSを利用することは出来ない。そこで、本研究では、月・惑星等の砂漠環境下で、ローバーが得る環境情報を用いて、ローバーの現在位置を把握するシステムの開発を行ってきた[1]。本システムでは、全方位カメラを用いて獲得した地平線形状と、既存のDEM(Digital Elevation Map)情報を用いて生成する仮想地平線形状データベースと比較することで、現在位置の推定を行う[2]。この手法を用いた本システムの概要図を図1に示す。

本手法では、画像から地平線形状をいかに精度良くロバストに抽出するかが重要であるが、この地平線抽出には、これまでいくつかの手法が提案されてきた。画像からの地平線抽出手法の研究としては、2005年に報告されたWenらの研究がある[3]。Wenらの研究では、SobelフィルターやCanny検出器を利用して得たエッジ画像に対して動的計画法を適用することで、ロバストな地平線検出を試みている。この研究では、地平線が明確に存在する画像からの地平線の検出に成功しているが、フィルター適応後の画像においてエッジが複雑なものでは検出に失敗する。筆者らの研究グループでもCanny検出器を利用した地平線抽出を試みてきたが[1]、エッジ検出後のノイズ除去を手動で行うためロバストな手法とはいえず、また、Canny検出器に用いる閾値を入力画像に対して最適化できない場合には、地平線の抽出に失敗することがあった。

そこで、本研究では、ロバストな地平線抽出を実現するため、文献[1]で提案した抽出アルゴリズムの改良を行った。更に、文献[1]では、画像取得時のカメラの姿勢が位置推定の精度に大きく影響を与えることが確認できたため、本研究では、精度向上のため、全方位カメラの水平安定機構の開発を行った。

本稿では、全方位カメラの水平安定機構、ならびに従来手法からのアルゴリズムの改良点を紹介し、実際の地平線

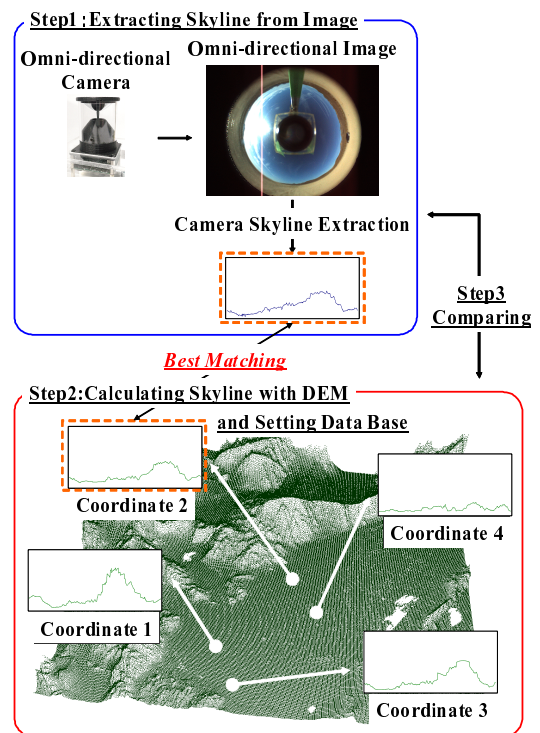


Fig. 1: Localization System Outline

画像を用いた位置推定実験の結果について述べる。

2 全方位カメラの水平安定機構

2.1 概要

筆者らが文献[1]で行った位置推定実験では、画像撮影時にカメラの傾きを考慮していないため、その傾きが位置推定の精度に影響を与えた。しかしながら、フィールドを走行することが期待されるロボットは本体が水平であるとは限らない。そこで、本研究では、傾きによる位置推定精度への影響を軽減するために、カメラの水平制御を行う機構を開発した。以下に、水平安定機構の構成と、その精度の評価について述べる。

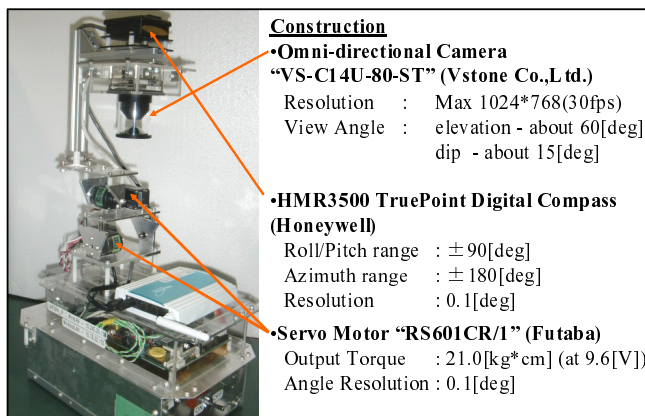


Fig. 2: Camera Stabilizer Construction and each Spec

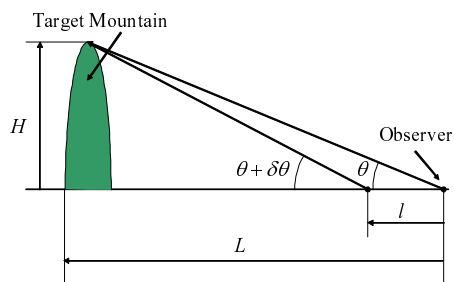


Fig. 3: Localization Error by Camera Tilt

2.2 水平安定機構の構成

今回開発した水平安定機構は、2自由度のスタビライザーとなっており、全方位カメラ（Vstone社製）・傾斜計（Honeywell製）・サーボモータ（Futaba製）×2で構成されている。本機構ではカメラ上部に搭載された傾斜計で傾きを計測し、そのデータからサーボモータがロール角・ピッチ角をそれぞれ制御することで、カメラの水平制御を可能とするものである。図 2 に、今回開発した水平安定機構とその構成、スペックを示す。

2.3 水平精度

2.2節で示した全方位カメラの水平安定機構は、傾斜計で測定した角度と目標値（水平なので0[deg]）を一致させるように動作するが、目標値付近では、十分にトルクを出ることが出来ないため、誤差が残る。本装置では、傾斜計の値で最大0.4[deg]の誤差が生じることが実験的に確認された。次に、この誤差が位置推定に与える影響を考える。図 3 のように、L[m]先に地平線を構成する標高H[m]の山が存在するとしたとき、カメラが $\delta\theta$ [deg]傾いている場合、位置推定の誤差l[m]は、

$$l = L - \frac{H}{\tan(\tan^{-1} \frac{H}{L} + \delta\theta)} \quad (1)$$

で表すことができる。例えば、地平線を構成する標高800[m]の山脈が2000[m]先に存在する時、任意の方角に+0.4[deg]傾いている場合には、式(1)を用いると、本来の位置に比べて約40mずれた位置のデータと一致する。本研究では、惑星環境における絶対自己位置推定を目指しているため、この程度の誤差は許容できる。

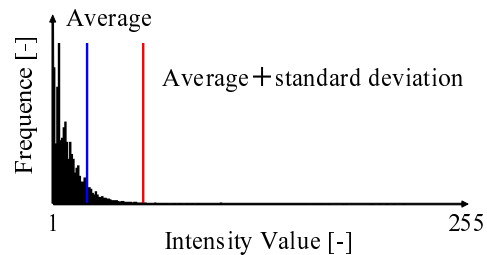


Fig. 5: Histogram of Edge Intensity

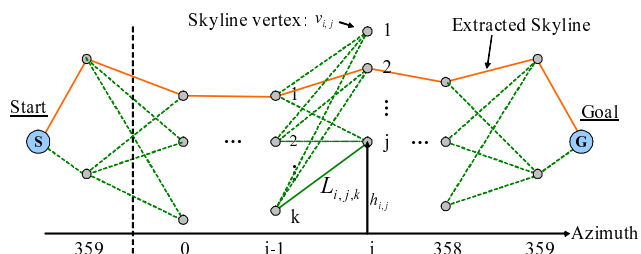


Fig. 6: Dynamic Programming Algorithm

3 ロバストな地平線抽出手法

3.1 地平線抽出手法の概要

本研究で提案する位置推定手法では、獲得した画像から地平線形状をロバストに抽出する手法がきわめて重要である。そこで、本研究では、動的計画法をベースとした手法を利用することで条件の悪い画像から地平線検出をロバストに行う手法を開発した。以下に、実際の処理手順を例を用いて紹介する。

3.2 地平線抽出手順

3.2.1 ガンマ補正

入力画像を一定の明るさにするためにガンマ補正を行う。図 4(a)を入力画像した場合のガンマ補正後の画像を図 4(b)に示す。

3.2.2 ガウシアンフィルターを用いたノイズ除去

ガンマ補正後の画像（図 4(b)）に対してマスク処理を行い、地平線抽出処理に影響を与えかねない部分をなくす。その後、ガウシアンフィルターを用いて画像内のノイズを除去する。図 4(c)にマスク処理、ガウシアンフィルター適用後の画像を示す。

3.2.3 Canny検出器を用いた地平線の抽出

Canny検出器を用いることで画像内の地平線の検出を行う。Canny検出器を利用する際には、ヒステリシス閾値を決定する必要があるが、このパラメータによってエッジ検出の精度が異なってくる。そこで、本手法ではヒステリシス閾値を入力画像のエッジ強度から統計的に求める方法を利用する。

まず、ノイズ除去後の画像から青成分を取り出し、そのエッジ強度を求める。これは「赤成分画像が、白い山と緑色の山の間のコントラストが強い[4]」という件に起因するが本研究では、「青成分画像が他の成分画像に比べて、青い空と緑（もしくは黄土）色の山の間のコントラストが強い」ため、エッジ強度の算出には青成分画像を用いた。

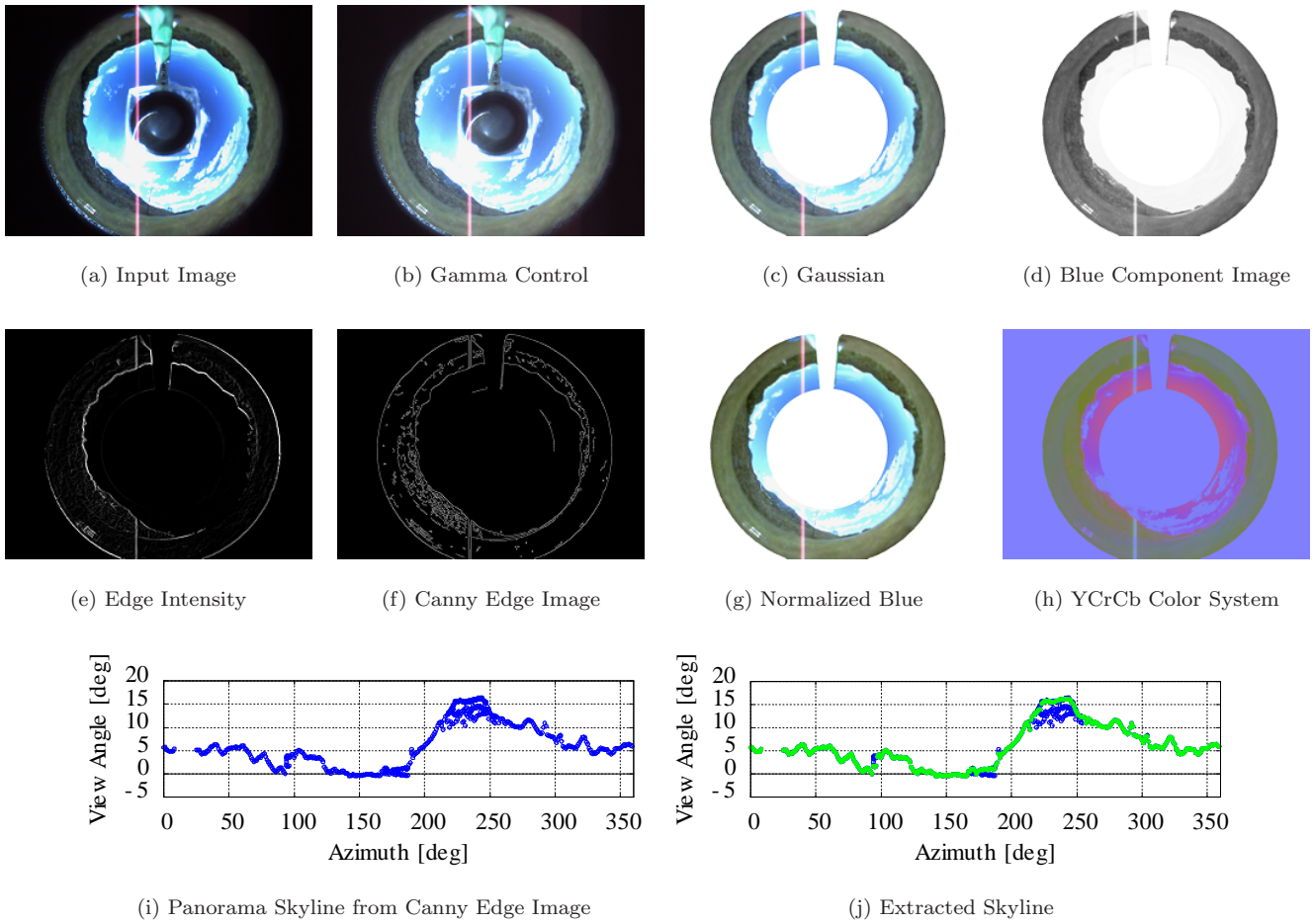


Fig. 4: Image Processing

次に、エッジ強度を正規分布とみなし、ヒステリシス閾値の上限をエッジ強度の「平均値+標準偏差」、下限を「平均値」とする。この2つの値を用いることで、地平線抽出に最適なエッジ画像の取得が可能となる。図 4(c)の青成分画像を図 4(d)に、エッジ強度のヒストグラムを図 5に示す。また、入力画像を図 4(c)とした場合のCannyエッジ画像を図 4(f)に示す。

3.2.4 動的計画法を用いた地平線の絞込み

Canny検出器によって得られたエッジ画像には、地平線以外の部分もエッジとして抽出されており、そのままではデータベースとの比較が困難である。そこで、本研究では、色情報を用いて全方位エッジ画像から地平線候補を選出し、予めパノラマ展開する。

まず、天候の影響を最小限に抑えるために入力画像の青成分を正規化する。文献[5]では天候の影響を軽減するために「赤」成分を正規化しているが、本研究では天候の影響軽減に加え、画像が鮮やかで地平線が明確になる「青」成分の正規化を行った。次に、青成分正規化画像をYCrCb表色系に変換し、輝度値 Y と青み割合($C_b/(C_r + C_b)$)の平均値と標準偏差を求める。得られた値を用いて、Cannyエッジ画像から地平線候補となるエッジを検出し、パノラマ展開する。動的計画法を用いた地平線抽出では、こうして得られたパノラマ画像を用いる。図 4(c)の青成分正規化画像を図 4(g)に、そのYCrCb表色系画像を図 4(h)に示

す。また、算出した値を用いて得られた図 4(f)のパノラマ地平線画像を図 4(i)に示す。

次に、パノラマ画像から地平線抽出を行う。パノラマ画像からの地平線抽出は、「砂漠環境下で見える地平線は急激な勾配変化を伴わない」という観点から、地平線抽出を「端から端までの最短経路の探索」とであるとみなし、動的計画法[6][7]を利用することで実現した。本研究で用いた動的計画法のアルゴリズムを図 6に示す。方角 i [deg]に存在する j 番目の点 $v_{i,j}$ が持つ角度を $h_{i,j}$ [deg]としたとき、任意の2つの点 $v_{i,j}$ 、 $v_{i-1,k}$ を繋ぐ際に生ずるコスト $L_{i,j,k}$ は、重み係数 C_w を用いて式(2)とする。

$$L_{i,j,k} = \begin{cases} C_w | h_{i,j} - h_{i-1,k} | & (0 \leq i \leq 359(\text{first time})) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

このとき、方角359[deg]から点 $v_{i,j}$ までの最短経路を $f_{i,j}$ としたとき、 $f_{i,j}$ は式(3)と表される。

$$f_{i,j} = \min_k (L_{i,j,k} + f_{i-1,k}) \quad (3)$$

よって、求める地平線は方角359[deg]までの最短経路 $f_{359,j} \equiv f_G$ となる。本手法を用いて、図 4(i)から抽出した地平線を図 4(j)に示す。本研究における位置推定では、図 4(j)のように上記手法を用いて得られたパノラマ地平線形状を利用し、データベースとの比較を行うことで実現する。

4 位置推定手法

4.1 位置推定の方法と評価関数

本研究では、全方位画像から抽出した地平線形状とDEM情報から生成した仮想地平線形状を比較することで、位置推定を行う。ただし、本研究では計算コスト軽減するために、方位データを利用することとした。実際の惑星探査では、方位の獲得にサンセンサ等を利用することが想定されるが、今回は、デジタルコンパスを用いて方位を得る。また、2つの地平線形状を比較する際に用いる評価関数は、確率統計における標準偏差の式を用いた。画像から抽出した地平線の方位 i [deg]における高さを $\phi_{CAM}(i)$ [deg]、DEM情報から生成した仮想地平線の方位 i [deg]における高さを $\phi_{DEM}(i)$ [deg]、地平線のポイント数を N [-]としたとき、2つの地平線形状のずれ度 $Error$ [deg]は、

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_i \{\phi_{DEM}(i) - \phi_{CAM}(i)\}^2}{N}} \quad (4)$$

となる。この値が小さいほど形状が一致していることを表す。

なお、デジタルコンパスを用いた方位測定では偏角が生じるため、本実験では、偏角に対応する回転を与えたデータを用いて位置推定を行う。

4.2 位置推定実験の結果

入力画像として、宮城県仙台市の泉ヶ岳で撮影した写真(図4(a)、撮影時ロール角:0.3[deg]、ピッチ角:0.2[deg]、座標:N 38° 25' 11" E 140° 43' 28")を用い、約1km四方・1[sec](約30m)間隔のマップで位置推定を行った。なお、この地域の偏角は約-7[deg]なので[9]、本実験では、測定された方位に対して-7[deg]の回転を与えたものを利用する。

また、仮想地平線形状の生成に用いたDEMはNASA/JPLより提供されているSRTM(1度四方、3秒分解能)を用いた[8]。

図4(j)に示す地平線形状を用いた位置推定実験の結果、本手法による位置推定は約40[m]の誤差が生じた。表1に、本実験における一致度を示す。

5 考察

本研究では、図4で示したように、従来の手法に比べてロバストな地平線の抽出に成功した。しかし、図4(j)を見ると、途中地平線として不適切な部分が抽出されていることが確認できる。これは、Canny検出器によるエッジ検出の際に本来の地平線を検出できなかったためである。今後は動的計画法を行う際の隣接点の選択に制限を与える[3]等の方法を行い、より適切な地平線の抽出を試みる。

Table 1: Matching Error(unit:[deg])

| | | Longitude:E 140° 43' | | | | |
|-----------------------|--------------------|----------------------|-------|--------------|--------------|-------|
| | | 26" | 27" | 28" | 29" | 30" |
| Latitude N 38° 25' | 9° 10' 11" 12" 13" | 4.165 | 5.272 | 4.510 | 3.789 | 6.283 |
| | 10° 11' 12" 13" | 1.748 | 2.044 | 1.714 | 1.560 | 3.734 |
| | 11° 12' 13" | 1.821 | 2.090 | <u>1.755</u> | 1.591 | 4.121 |
| | 12° 13" | 1.897 | 2.148 | 1.826 | 1.565 | 4.686 |
| | 13" | 2.031 | 1.887 | 1.894 | 1.856 | 1.890 |

次に、位置推定実験の結果について考える。本実験では、方位データに偏角に対応する回転を与えて位置推定を行ったところ、約40[m]の誤差が生じた。この原因は、地平線抽出時の誤検出やカメラの水平制御の精度による影響であると考えられる。本研究における地平線抽出手法では、Cannyエッジ検出の際に地平線が誤検出されてしまう場合、パノラマ画像(図4(i))から抽出される地平線の形状が変化する。そのため、式(4)の値に影響がでる。また、2.3節で述べたように、撮影時のカメラの傾きに応じて位置推定には誤差が生じる。本実験で用いた画像は、撮影時の傾きがロール角0.3[deg]・ピッチ角0.2[deg]であるため、カメラの傾きと地平線の誤検出の影響によって、約40[m]の位置推定誤差が生じたと考えられる。この誤差は、2.3節で述べたように、惑星環境における絶対自己位置推定では十分許容できる。だが、より高精度の位置推定を実現させるため、今後は水平安定機構の精度向上や地平線抽出・撮影時の傾きによる誤差を吸収する評価関数の考案等を行う。

6 結言

本研究では、月面などのGPSの利用出来ない砂漠環境下で位置推定を行うシステムの開発を行ってきた。本稿では、自己位置推定に必要な画像からのロバストな地平線抽出アルゴリズムの従来手法からの改良点、ならびに、カメラ水平安定機構を用いて獲得した実際の地平線画像での位置推定実験の結果について述べた。その結果、従来手法に比べてロバストに地平線を抽出でき、惑星環境で十分活動可能な誤差での位置推定に成功した。今後は、偏角による方位補正やカメラの傾きの影響を吸収する位置推定評価関数の考案を行い、より高精度の位置推定システムの構築を行う。

参考文献

- [1] 大入 瑛, 永谷 圭司, 吉田 和哉, パノラマ地平線画像を用いた惑星探査ローバーのグローバル位置推定システムの構築, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス講演会 ROBOMECH2010,1A2-B21,2010
- [2] Fabio Cozman, Eric Krotkov, Carlos Guestrin, Outdoor Visual Position Estimation for Planetary Rovers, Autonomous Robots 9, pp135-150, 2000
- [3] Wen-Nubg Lie, Tom C.I. Lin, Ting-Chih Lin, Keng-Shen Hung, A robust dynamic programming algorithm to extract skyline in images for navigation, Pattern Recognition Letters 26(2005),pp221-230
- [4] Prospero C. NAVAL Jr., Masayuki MUKUNOKI, Michihiko MINOH, Katsuo IKEDA, Estimating Camera Position and Orientation from Geographical Map and Mountain Image, 38th Research Meeting of the Pattern Sensing Group, Society of Instrument and Control Engineers, pp.9-16,1997
- [5] Yutaka Takeuchi, Martial Hebert, Evaluation of Image-Based Landmark Recognition Techniques, Technical Report CMU-CS-95-116, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Jul.1998
- [6] 大鹿 譲, 一森 哲生, オペレーションズリサーチ - モデル化と最適化 -, 共立出版株式会社, 1993, pp95-100
- [7] 鍋島 一郎, 数学ライブラリー7 動点描画法, 森北出版, 1968, pp71-73, 114-118
- [8] Bernhard Rabus, Michael Eineder, Achim Roth, Richard Bamler, The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57(4), pp241-262, 2003
- [9] 国土地理院 地磁気測量, <http://v1ldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/index.html>