

# 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

## Global positioning for Planetary Rovers based on Panoramic Skyline Image

大入 瑛 (東北大)

正 永谷 圭司 (東北大), 正 吉田 和哉 (東北大)

Akira OIRI(Tohoku Univ.), akira\_o@astro.mech.tohoku.ac.jp  
Keiji NAGATANI(Tohoku Univ.), Kazuya YOSHIDA(Tohoku Univ.)

This paper presents that the method of the position estimation for the planetary rovers based on the panoramic skyline image. The comparison between the two skyline images makes the global positioning possible; one skyline is extracted from the omni-directional photo, the other is calculated from a digital elevation map. Skyline detection is based on Canny's edge detector and the noise rejection by hand. Geometry-based calculation and law of cosines enable to calculate skylines from a digital elevation map. Then, we establish the position estimation system by this method and estimate the position off-line with desert images. As a result, this work verifies availability of estimation by this method.

Key Words : Robot, Position Estimation, Skyline

### 1 緒言

近年、ローバーを用いた火星探査が NASA によって行われ、JAXA もまたローバーを用いた月表面及び内部の探査を検討している。地球-月間では通信に遅れがあり、これに対処するためにローバーにはある程度の自律性が求められる。そして、目標地点までの効率的な移動経路判断・現地での探査活動を効率的に行うために、ローバーの自己位置を推定する必要がある。

ローバーの位置推定法として、内界センサベースの『オドメトリ』、外界センサベースの『ビジュアルオドメトリ』、『GPS』等の手法がある。ところが、月や火星などの軟弱地盤環境ではタイヤのスリップによって位置推定に大きな誤差が生じる可能性があり、長距離移動では誤差の累積によって正確な位置推定が出来なくなる。そのため、『オドメトリ』、『ビジュアルオドメトリ』は砂漠での利用に適さないと言える。また、『GPS』は位置を推定するために十分な数の衛星を飛ばす必要性があり、地球以外では利用不可能となる。このように、内界/外界センサベースの位置推定方法は軟弱地盤を伴う惑星探査では利用が難しいといえる。そこで、本研究では、ランドマークベースでの位置推定に注目をした。

ランドマークベースは、人工物・自然物の位置を記録し、その見え方によって現在位置を推定する方法である。また、月や火星では人工物が存在せず、自然物を対象とする必要がある。このことから本研究では、周囲に見える地平線形状(スカイライン)を計測し、衛星が獲得した地形情報(Digital Elevation Map: DEM)から予測した地平線形状と比較することでローバーの現在位置を推定する手法をとる。

ランドマークベースでの位置推定の先行研究として、Cozmanら(1997, [1]), Guienkoら(2003, [2]), 佐藤ら(2004, [3])の研究がある。Cozmanらの研究では、砂漠環境下においてスカイラインを計測し、地形情報から予測したスカイラインと比較することでローバーの現在位置を推定する方法を提案した。この研究では、ローバーの遠隔操縦補佐を目的としたシステムの構築を行い、オフラインでの位置推定にある程度の精度で成功した。また、Guienkoらの研究では、位置推定を行うまでの処理時間の短縮を目的とし、計算時間が従来の半分になる手法を提案した。これらに対して、佐藤らの研究では、従来の手法による処理時間の緩和を目的とし、測定した山頂と DEM から予測した山頂の位置を比較することで位置推定を行う方法を提案している。

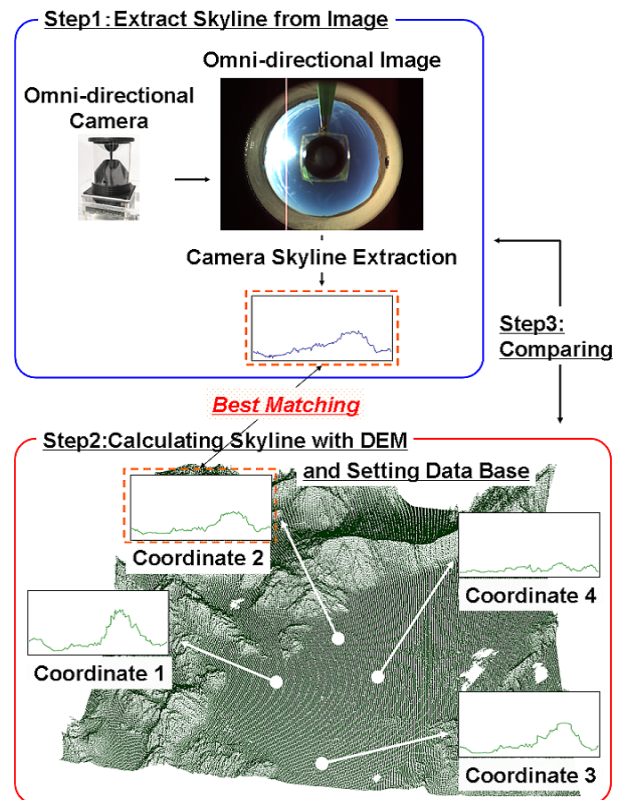


Fig. 1 Localization System Outline

ところが、いずれにおいてもオフラインでの位置推定にとどまり、ローバーの自律走行ナビゲーションとしては確立されていない。

以上のことから、本研究では、地平線画像を用いた自己位置推定システムの構築を行う。そして、実環境において小型ローバーを目標地点まで自律走行させることを目的と設定した。本稿では、位置推定のためのシステム構築について述べる。また、アメリカ合衆国ネバダ州にあるブラックロック砂漠で撮影された全方位写真を用いて行った、オフラインでの自己位置推定の結果について述べる。

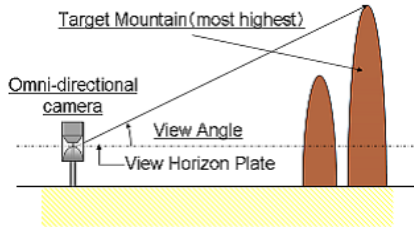


Fig. 2 Define Skyline Height - View Angle



Fig. 3 Omnidirectional Camera with True Point

## 2 地平線画像を用いた自己位置推定戦略の概要

本研究では、カメラが入手した画像情報から得るスカイラインと、衛星が測定して入手した地形情報から算出した、任意地点から見えるであろうスカイライン（これを以後『予測スカイライン』と呼ぶ）を比較することで、ローバーの位置推定を試みる。提案する戦略の流れを図 1 に示す。本戦略では、はじめに、全方位カメラから取得した写真を用いて、現在位置周辺のスカイラインを抽出する (Step1)。次に、地形情報を用いて、探索領域内の予測スカイラインを算出し、予めデータベース化する (Step2)。そして、2つのスカイラインを比較し、最も形状が一致する場所をローバーの現在位置とする (Step3)。2つのスカイラインを比較する際に用いる情報は、図 2 に示す角度 (View Angle) とする。また、本戦略の前提条件として以下の 2 点をあげる。

- ローバー (カメラ) の姿勢・方角は測定可能である
- 探査区域の地形情報は入手可能である

以降、3 章では画像中からのスカイラインの抽出方法について、4 章では地形情報を用いた予測スカイラインの算出について述べる。そして、5 章では 2 つのスカイラインの比較について述べ、6 章でまとめと今後の展開について述べていく。

## 3 全方位カメラを用いたスカイライン計測

### 3.1 概要

従来の研究 [1] では、全方位画像から得たパノラマ画像を利用してスカイラインの抽出を行っていた。ところが、全方位画像をパノラマ展開する際にスカイライン以外の不必要な部分まで計算する必要があり、余分な時間がかかることが考えられる。そこで、本研究では、全方位画像から直接スカイラインを抽出し、パノラマ展開を行うことで作業の簡略化を試みる。また、パノラマ展開に必要な変換式は、従来の極座標変換・Log-Polar 変換 [4] を用いず、カメラのキャリブレーション実験で求めた変換式を利用する。

### 3.2 全方位カメラ

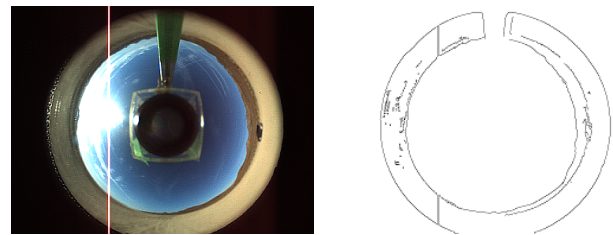
本研究では、図 3 に示す全方位カメラ (Vstone 社製:『VS-C14U-80-ST』) を用いる。その特徴は

- 解像度: 最大 1024 × 768 (30fps)
- 視野角: 仰角 約 60 度, 伏角 約 15 度

であり、このカメラによって獲得された現在地周辺の環境情報 (図 4(a)) から、位置推定のためのスカイラインを抽出していく。また、カメラ上部に取り付けた磁気/加速度センサ (TruePoint) により、カメラの姿勢・方角を測定する。

### 3.3 スカイラインの抽出

本研究では、図 4(a) に示した全方位写真に含まれるスカイラインを画像処理で抽出する。スカイラインの抽出には、



(a) Omni-directional Image

(b) Extracted Skyline

Fig. 4 Example image (N40 46 25 W 119 15 42)

OpenCV という画像処理ライブラリを用いて以下の手順を踏むことで実現した。

1. 入力画像に対して Canny エッジ検出器を適応し、スカイラインをエッジとして抽出する
  2. エッジ画像中におけるノイズを手動で除去する
- 上記手順によって抽出されたスカイラインを図 4(b) に示す。また、この方法によって得られたスカイラインは、図 4(b) を図 4(a) に重ねることで、正しく抽出されたことが確認できる。

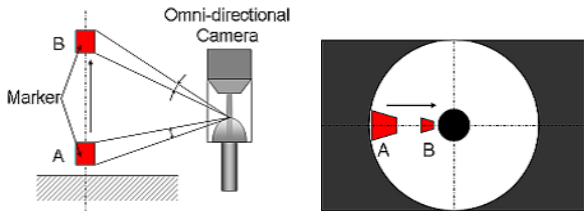
### 3.4 パノラマ展開と変換式

抽出したスカイライン (図 4(b)) のパノラマ展開を行うための変換式は、カメラのキャリブレーション実験より求めた。図 5 に示したように、対象マーカはその位置 (高さ) によって全方位画像中での大きさが異なる。すなわち、全方位画像中の撮影領域中心からの距離によって、1 ピクセル当たりが持つ角度は異なる。また、図 2 で示した View Horizon Plate の全方位画像中での位置はミラーの歪みから方向毎に異なる (図 6)。これらの結果をふまえて、全方位カメラの各方向 (全方位画像中における上下左右) での単位ピクセル当たりの角度情報  $\Delta\phi(r)$  [deg] を、カメラのキャリブレーション実験より導出した。結果を式 (1) に示す。

$$\Delta\phi(r) = Ce^{kr} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \text{Top} & (C, k) = (0.4687, -0.0025) \\ \text{Low} & (C, k) = (0.4581, -0.0026) \\ \text{Right} & (C, k) = (0.5182, -0.0029) \\ \text{Left} & (C, k) = (0.4724, -0.0028) \end{cases}$$

式 (1) の係数および View Horizon Plate の位置が方向に応じて値を変化してくることから、図 6 に示した極座標上



(a) Marker Moving on Camera side (b) Marker Moving on Omnidirectional Photo

Fig. 5 Moving image

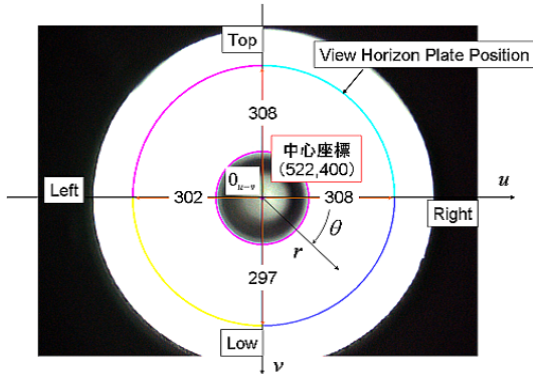


Fig. 6 Horizon Plate and Center Point Position On Omnidirectional Photo

の角度に応じてそれぞれの値が楕円状に変化するものと仮定することができる。よって、任意方向  $\theta$  における中心から半径方向  $r$  の位置にある点の View Angle の値  $\phi_{CAM}(r, \theta)$  は、式 (2) と導くことができる。

$$\phi_{CAM}(r, \theta) = -\frac{C(\theta)}{k(\theta)} \{e^{k(\theta)r} - e^{k(\theta)r_0}\} \quad (2)$$

$$\begin{cases} k(\theta) &= -\sqrt{k_a^2 \cos^2 \theta + k_b^2 \sin^2 \theta} \\ C(\theta) &= \sqrt{C_a^2 \cos^2 \theta + C_b^2 \sin^2 \theta} \\ R_0(\theta) &= \sqrt{r_{0a}^2 \cos^2 \theta + r_{0b}^2 \sin^2 \theta} \end{cases}$$

$k_a, k_b, C_a, C_b, r_{0a}, r_{0b}$ : 方向依存係数

式 (2) を用いて、全方位画像中から抽出したスカイラインをパノラマ展開する。

### 3.5 抽出結果と考察

3.3 章で抽出したスカイライン (図 4(b)) のパノラマ展開結果を図 7 に示す。図 7 に示したスカイライン形状の整合性は、複数枚の平面画像から作成するパノラマ写真を用いて確認する必要があり、今後の課題の一つとなる。また、図 7 では、北東約  $0 \sim 90$  [deg] において View Angle が  $0$  [deg] 以下であることが確認できる。基準である View Horizon Plate の位置が  $0$  [deg] にあたるため、本来 View Angle は  $0$  [deg] 以下になることはない。よって、この現象は写真撮影時のカメラが南東に傾いたことで起きたと考えられる。高精度の位置推定を行うためには、撮影時のカメラの姿勢を水平に保つ、パノラマ展開時にカメラの傾きを考慮する、

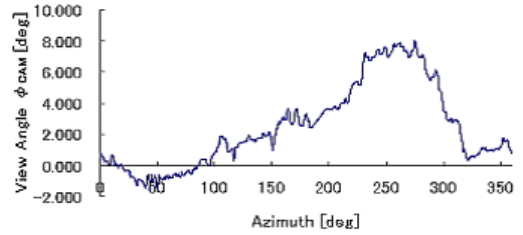


Fig. 7 Panoramic Camera Skyline

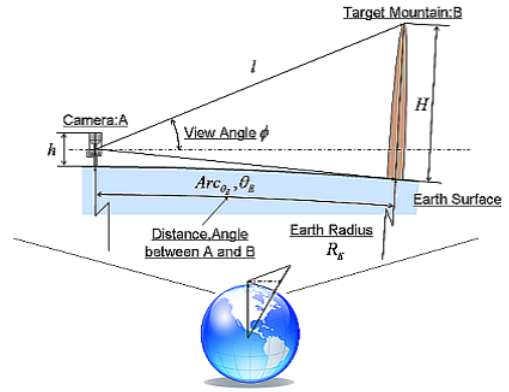


Fig. 8 Model of Calculating DEM Skyline

等を行う必要があると考えられる。また、本稿では手動で行ったノイズ除去を自動化させ、よりロバスト性の高いスカイライン抽出を行う必要がある。

## 4 地形情報を用いたスカイラインの予測算出

### 4.1 使用する地形情報 (DEM) について

任意地点における予測スカイライン算出において、Cozman らでは、アメリカ地質調査所 (USGS) から入手できる『National Elevation Dataset (NED)』という 7.5 分四方 (30m 分解能) の DEM を利用していた [1]。ところが、NED はアメリカ全域の地形情報であるため、日本国内での実験を考えた場合、利用に適さない。そこで、本研究では NASA/JPL より提供されている SRTM を用いた。SRTM は 2000 年に行われた地形データ測定ミッションで作成された DEM データであり、北緯 60 度 ~ 南緯 56 度の領域において対応している [5]。本研究では分解能が 1s (約 30m) のデータを用いて、任意地点での予測スカイラインを算出する。

### 4.2 予測スカイライン算出方法

図 8 に、地球上におけるカメラと山脈の位置関係を表したものを示す。図 8 に示すように、カメラ A の高さを  $h$ 、任意方向における最も大きい山 B の標高値を  $H$ 、AB 間の距離を  $l$ 、地球の中心と AB が成す角を  $\theta_E$ 、地球の半径を  $R_E$ 、A から B を見上げたときの距離を  $l$  としたとき、求めるべき A から B を見上げたときの角度 (View Angle)  $\phi_{DEM}$  [rad] は、余弦定理を用いることで式 (4) と表される。

$$l = \sqrt{(R_E + h)^2 + (R_E + H)^2 - 2(R_E + h)(R_E + H)\cos\theta_E} \quad (3)$$

$$\phi_{DEM} = \cos^{-1} \left\{ \frac{l^2 + (R_E + h)^2 - (R_E + H)^2}{2l(R_E + h)} \right\} - \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

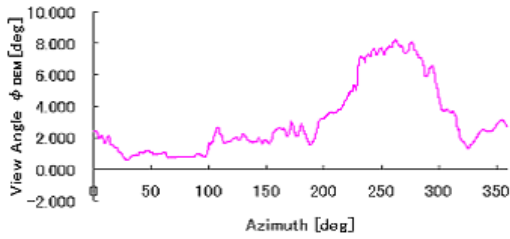


Fig. 9 Dem Skyline(N40 46 25 W119 15 42)

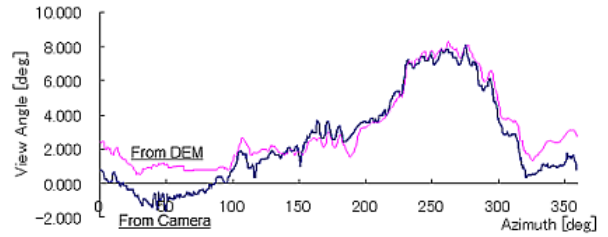


Fig. 10 Comparing between DEM and Camera Skyline

この式 (4) を用いて、任意地点から周囲 360[deg] における方向毎の角度情報を算出する。そして、得られた角度情報から任意地点での予測スカイラインを求める。

#### 4.3 算出結果・考察

図 9 に、式 (4) を用いて算出した、図 4(a) 撮影地点での予測スカイラインを示す。図 9 においても、3.5 章と同様、通複数枚の平面画像から作成するパノラマ写真と比較し、整合性を検討する必要がある。

### 5 比較方法及び結果

#### 5.1 評価関数

2つのスカイラインを比較する際、評価関数として確立統計における標準偏差の式を用いた。カメラから抽出したスカイラインに対する予測スカイラインのずれ度を  $Error[deg]$  とし、全方位画像から抽出したスカイラインの  $i$  番目の方角における高さを  $\phi_{CAM}(i)[deg]$ 、DEM から算出した予測スカイラインの  $i$  番目の方角における高さを  $\phi_{DEM}(i)[deg]$ 、スカイラインのポイント数を  $N[-]$  としたとき、 $Error$  は式 (5) となる。

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_i \{\phi_{DEM}(i) - \phi_{CAM}(i)\}^2}{N}} \quad (5)$$

式 (5) の値が小さい程、2つのスカイラインは形状が一致していると言え、式 (5) を用いて比較結果を評価する。

#### 5.2 比較結果・考察

図 3 を用いて抽出したスカイライン (図 7) と、同地点における予測スカイライン (図 9) を比較したものを図 10 に示す。また、式 (5) を用いて算出した約 400m 四方におけるずれ度の分布を、表 1 に示す。なお、表 1 における縦軸・横軸は入力画像の座標位置である中心からの距離を表したものであり、 $1[s] \cong 30[m]$  となっている。

図 10 に示したように、2つのスカイラインは北部 (Azimuth:  $0 \sim 90, 270 \sim 360[deg]$ ) における形状のずれが大きいものの、方角ごとにおける変化の傾向が完全に一致していることが確認できる。このずれは、3.5 章で述べたように図 4(a) を撮影した際のカメラの姿勢が南東に傾いていたために生じたものと考えられる。一方、南部では大きなずれが存在しないが、これは対象となる山までの距離が北部に比べて遠く、カメラの傾きに影響されないためと考えられる。約 400m 四方におけるずれ度の比較を行ったところ、このずれの影響により、表 1 に示したとおり最もずれの少ない部分 (現在位置と推測される場所) が撮影地点から南東約 117m(-3, -3) の地点となった。この精度を向上させるためには、カメラの傾きを考慮した修正変換式を構築する、カ

Table 1 Matching Error(unit:[deg])

Lat \ Lon	6	3	0	-3	-6
6	1.14	1.09	1.19	1.56	1.29
3	1.14	1.08	1.13	1.24	1.33
0	1.21	1.04	1.12	1.00	1.02
-3	1.35	1.16	1.04	0.94	1.00
-6	2.00	1.13	1.04	1.02	0.97

メラの姿勢を常に平行に保つ機構を開発する、等の方法が挙げられ、今後取り組んでいくべき課題となる。

### 6 結言

本研究では、全方位カメラが取得した環境情報と衛星の取得した地形情報を利用し、ローバーが自律走行するための自己位置推定システムの構築を目標と設定した。そして、全方位画像中からのスカイライン抽出・地形情報を用いた予測スカイライン算出を行い、オフラインでの位置推定を行った。今後は、各章で述べたスカイライン抽出方法・位置推定の精度に関する問題点を解決し、より高精度の位置推定が実現できるよう研究を進めていく。また、屋外での実証実験を行うために、試験用ローバーの整備、ロボスタ性の高いスカイライン抽出方法の実装、比較結果へのカメラ姿勢反映方法の考案、自律走行ナビゲーションとしての構築等を行う予定である。

### 文献

- [1] Fabio Cozman, Eric Krotkov, Carlos Guestrin, Outdoor Visual Position Estimation for Planetary Rovers, Autonomous Robots 9, pp135-150, 2000
- [2] Guennadi Guenko, Eugene Levin, Aliaksandr Zharnouski, GEOGRAPHI INFORMATION TO SUPPORT VISION-BASED APPROACHES FOR GPS-INDEPENDENT AUTONOMOUS NAVIGATION, Proceedings of ASPRS Annual Conference, Anchorage, 2003
- [3] 佐藤 孝洋, 久保田 孝, 中谷 一郎, 月・惑星探査における山頂を用いた自己位置同定, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 巻 22nd, 頁 1C18, 2004
- [4] 佐藤 辰雄, 後藤 和弘, 全方位カメラのためのパノラマ画像展開大分県産業科学技術センター研究報告, 巻: 2002, 頁: 9-11, 2003
- [5] 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