

惑星探査ローバのための赤外線カメラを用いた地形傾斜推定に関する検討

A Study on Terrain Slope Estimation using an Infrared Camera
for Planetary Exploration Rovers

学 渡邊 哲志 (中大) 正 大津 恭平 (東大)
 正 大槻 真嗣 (ISAS/JAXA) 正 久保田 孝 (ISAS/JAXA)
 増山 岳人 (中大) 正 梅田 和昇 (中大)

Satoshi WATANABE, Chuo University, watanabe@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

Kyohei OTSU, The University of Tokyo

Masatsugu OTSUKI, ISAS/JAXA

Takashi KUBOTA, ISAS/JAXA

Gakuto MASUYAMA, Chuo University

Kazunori UMEMA, Chuo University

In recent years, planetary surface exploration missions by rovers have been actively performed. Rovers are required to recognize the surrounding environment autonomously for an efficient and safe exploration. Above all, terrain slope estimation is one of the essential techniques, which is conventionally performed with stereo cameras or shape-from-shading techniques. However, those schemes have problems such as the degraded accuracy in low-textured terrain and the heavy computational cost. Therefore, this paper proposes a new method that uses the difference of surface temperatures between flat and slanted surfaces. It is known that the difference of solar radiation generates the gap in surface temperatures, which can be remotely detected with an infrared camera. The proposed method estimates terrain tilt angles using the energy balance equation and a single thermal image from the infrared camera. The method is validated with a field experiment in Izu-Oshima island. The developed thermal-based technique potentially increases the applicability to various terrain types regardless of the terrain appearance.

Key Words: Planetary Exploration Rovers, Environment Recognition, Terrain Slope Estimation, Infrared Camera, Surface Temperature

1 緒言

近年、惑星探査を目的としたミッションが盛んに行われている。惑星探査は惑星の起源を解明するだけでなく、将来の惑星の開発利用のための事前調査を目的としており、重要な意義を持つ。惑星の開発利用のためには、資源調査や地質・地盤の調査が必要であるため、周回観測するだけでなく実際に惑星表面に着陸し詳細な探査を行う必要がある [1]。その際用いられるのがローバと呼ばれる無人ロボットであり、ローバにより比較的広い範囲を移動しながら直接的な探査を行う。現在では、アメリカ航空宇宙局 (NASA) が打ち上げた Opportunity や Curiosity が火星での探査を行っている。

ローバの移動探査の際には、通信遅れなどの問題から自律走行する必要があり、そのためには障害物を認識し、安全な領域と危険な領域を区別し、経路計画を行うといった技術が必要である。障害物と同様に、斜面やくぼみも転倒やスタックの危険性、電力の過剰消費の恐れがあるといった理由から避けるべき対象である。それらを認識する方法として、従来はステレオカメラや陰影画像から形状を復元する Shape from shading [2][3] などによる方法が一般的に用いられてきた。しかし、ステレオカメラは、図 1 のようにテクスチャが弱い領域では推定精度が低くなる [4]、マッチングの際に含まれる誤マッチングを取り除く必要があるなどといった問題が指摘されている。また、Shape from shading は前提条件として地表面の反射特性や太陽方向が既知であるなどといった条件が必要であるが、解を一意に求めるためには反射率特性を線形近似する [3]、面がなめらかに連続的に変化するなどの追加

の仮定が必要である。さらに、入射光に垂直な面は Shape from shading の性質上、形状復元することが出来ないといった点や計算コストが高いといった問題点もある。

本稿では、地表面の熱収支モデルを利用し地形傾斜を推定するという新たな手法を提案する。傾斜の異なる地形では太陽入射エネルギーに差があり、それが地表面の温度差として現れる。提案手法では温度差を赤外線カメラ (サーモグラフィ) を用いて検出し、熱収支モデルとの比較を行うことで傾斜角の推定を行う。赤外線カメラは既に火星ローバでの使用実績もあり、実現性は高いと考えられる。本稿では伊豆大島裏砂漠における地上での検証実験の結果を報告する。



Fig.1 An example of low-textured terrain on Mars (Image by NASA/JPL)

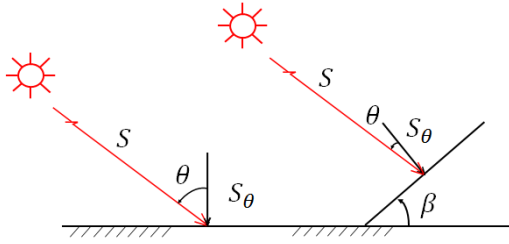
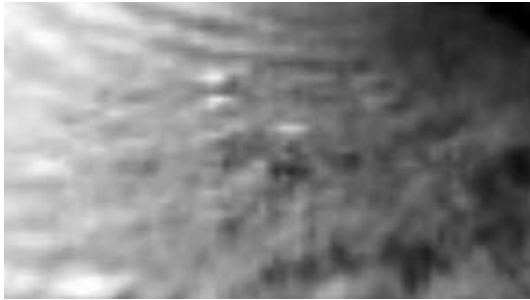


Fig.2 Solar radiation in flat and slanted surfaces[5]



(a) Visual image



(b) Thermal image

Fig.3 Visual and thermal images of a gully

2 提案手法の概要

平面と斜面では図2に示すように、傾斜角により太陽光入射角が異なる。よって、式(1)により太陽からの直達日射量に違いが生まれる。

$$S_{\theta} = S \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 S_{θ} は太陽光に垂直な法線面日射量、 S は太陽からの直達日射量、 θ は太陽光の入射角である[5]。

太陽からの直達日射量の差が平面と斜面の地表面温度の差を生むと考えられ、赤外線カメラで撮影した熱画像を用いて温度差を検出し、温度差と地表面の熱収支モデルを考慮することにより、単眼での傾斜角推定を行う。

本稿で用いる熱画像とは、赤外線カメラが受け取った対象物体からの放射エネルギーを温度に換算し、画像中の最高温度の領域を画素値255(白)、最低温度の領域を画素値0(黒)として表示したものである。

熱画像を用いれば、可視光画像では傾斜かどうか区別しにくい場所でも、温度の差が輝度値の差として顕著に表れるため、汎用性が高いと考えられる。図3(b)を見ると、熱画像では太陽が当たりやすい左側の領域は比較的白く、反対に太陽が当たりにくい右側の領域は比較的黒く表示されていることが見て取れる。

提案手法は単眼のためステレオカメラのようにマッチング処理する必要がなく、さらに、熱画像1枚のみを用いて行うため複雑な処理が必要なく計算コストも小さいという特徴を持つ。

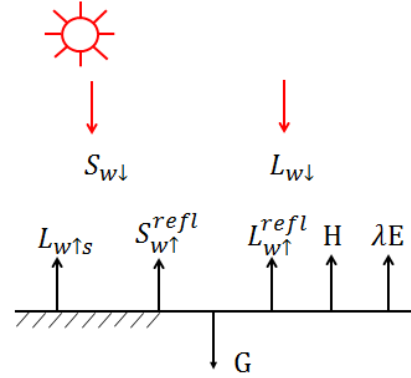


Fig.4 Energy balance of the earth's surface[6]

3 熱収支モデルの検討

地球地表面の熱収支は図4のようにモデル化される[6]。
熱入力

- 太陽からの直達日射 $S_{w\downarrow}$
- 大気からの放射 $L_{w\downarrow}$

熱出力

- 地表面からの放射 $L_{w\uparrow s}$
- 太陽からの直達日射の反射 $S_{w\uparrow}^{refl}$
- 大気からの放射の反射 $L_{w\uparrow}^{refl}$
- 顕熱輸送量 H
- 潜熱輸送量 λE
- 地中伝導熱 G

これらの間には以下の式が成り立つ。

$$S_{w\downarrow} + L_{w\downarrow} - L_{w\uparrow s} - S_{w\uparrow}^{refl} - L_{w\uparrow}^{refl} - H - \lambda E - G = 0 \quad (2)$$

式(2)が地球地表面の熱収支式である。

太陽からの直達日射 $S_{w\downarrow}$ は式(1)により表され、太陽からの直達日射の反射 $S_{w\uparrow}^{refl}$ は太陽からの直達日射 $S_{w\downarrow}$ に地表面の反射率(アルベド)をかけたもので表される。また、地表面からの放射 $L_{w\uparrow s}$ と顕熱輸送量 H は次式によって表される。

$$L_{w\uparrow s} = \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (3)$$

$$H = C_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (4)$$

ここで、 ϵ_s は地表面放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 T_s は地表面温度、 C_p は空気定圧比熱、 ρ は空気密度、 $C_H U$ は顕熱輸送の交換係数、 T_a は外気温である。

赤外線カメラは地表面撮影時、大気からの放射 $L_{w\downarrow}$ 、地表面からの放射 $L_{w\uparrow s}$ 、太陽からの直達日射の反射 $S_{w\uparrow}^{refl}$ 、大気からの放射の反射 $L_{w\uparrow}^{refl}$ を受け取り、カメラ内で補正を行った上で受け取ったエネルギーを温度に換算し熱画像として出力する。

4 傾斜角推定

傾斜角推定手法を以下に示す。ただし条件として、太陽方向と斜面の方位角は既知であるものとする。

手法の概要としては観測と天体運動からそれぞれ平面と斜面の太陽日射量の差を算出し、それらを比較することにより斜面の傾斜角を推定する。

まず、観測から平面と斜面の太陽日射量の差を熱収支式により導出する。ここで、前提条件として探査する領域では地表面特性は一定とし、また、平面と斜面において大気からの放射 $L_{w\downarrow}$ と大気からの放射の反射 $L_{w\uparrow}^{refl}$ 、潜熱輸送量 λE 、地中伝導熱 G は一定であると仮定する。

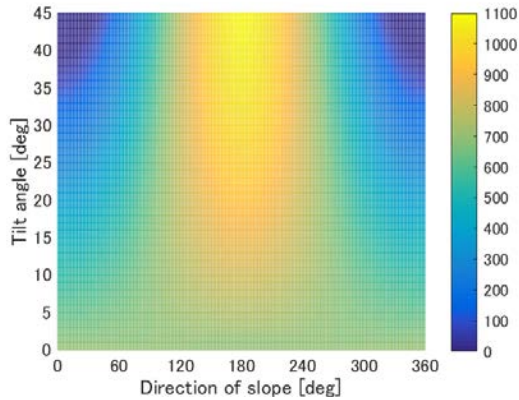


Fig.5 Simulation of solar radiation at varying directions and tilt angles

その上で、平面と斜面の熱収支式の差をとる．添え字は斜面を [i]，平面を [f] とすると平面と斜面の熱収支式の差は式 (5) で表せる．

$$S_{w\downarrow[i]} - S_{w\downarrow[f]} = (L_{w\uparrow s[i]} - L_{w\uparrow s[f]}) + (S_{w\uparrow[i]}^{refl} - S_{w\uparrow[f]}^{refl}) + (H_i - H_f) \quad (5)$$

式 (1)，(3)，(4) を代入し整理すると次式のようになる．

$$S_{w\downarrow[i]} - S_{w\downarrow[f]} = \frac{\epsilon_s \sigma (T_i^4 - T_f^4) + C_p \rho C_H U (T_i - T_f)}{1 - A} \quad (6)$$

ここで、 T_i は斜面の温度、 T_f は平面の温度、 A はアルベドである．式 (6) のように斜面における顕熱輸送量と平面における顕熱輸送量の差をとることにより、顕熱輸送量 H に含まれていた未知量である外気温の項を消去することができる．このことにより式 (6) の右辺の平面の温度 T_f と斜面の温度 T_i 以外のパラメータは全て特定の値を持ち、平面の温度 T_f と斜面の温度 T_i を入力することにより、平面と斜面の太陽日射量の差を数値として求めることができる．

次に、天体運動から平面と斜面の太陽日射量の差を導出する．得られた緯度・経度情報と時刻から任意の傾斜角・方位角における太陽光の入射角を MATLAB によるシミュレーションにより求め、式 (1) から太陽日射量を計算する．斜面の方位角とは、斜面上の法線ベクトルがどの方向を向いているかを数値として表したものであり、北向きを 0[deg]、東向きを 90[deg]、南向きを 180[deg]、西向きを 270[deg] としている．太陽光の入射角は太陽赤緯と太陽の時角を MATLAB の関数である SolarAzEl[7] により求め、算出した．この関数は、日付と世界標準時、緯度・経度、高度を入力すると太陽赤緯と太陽の時角を算出する関数である．図 5 に例を示す．この図は検証実験を行った日付と時刻、緯度・経度、高度 (2015 年 11 月 06 日、午前 11:30、緯度 34.722469[deg]、経度 139.407204[deg]、高度 633[m]) で行った結果である．

そして、傾斜角を求めたい斜面の方位角を入力し、入力した方位角の任意の傾斜角における斜面と平面の太陽日射量の差をテーブルとして求める．求めたテーブルをグラフにしたものの一例が図 6 である．この図により斜面と平面の太陽日射量の差と傾斜角の関係を明らかにできる．

最後に、観測により数値として求めた平面と斜面の太陽日射量の差と天体運動によりテーブルとして求めた平面と斜面の太陽日射量の差を比較することにより傾斜角を推定する．

5 検証実験

5.1 実験方法及び実験条件

提案手法を実環境において実装し、有用性を実証するため伊豆大島裏砂漠において検証実験を行った．実験地は黒色のスコリア

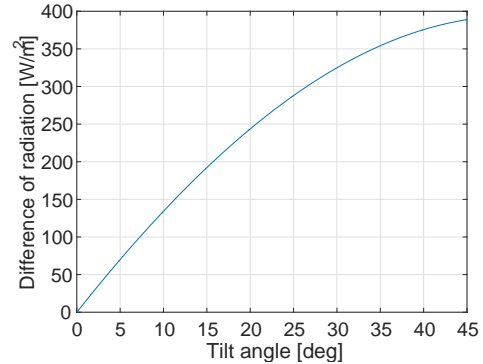


Fig.6 Difference of solar radiation(Direction 180[deg])



Fig.7 The exterior of ax8

で覆われており、傾斜面や流水痕が多数存在している．実験としては、赤外線カメラを用いて斜面を様々な角度から撮影し、その傾斜角を推定した．また、各傾斜に対し真値として、接触型の温度センサである熱電対を用いて温度を、傾斜計を用いて傾斜角をそれぞれ計測した．赤外線カメラには FLIR 製の AX8 を用いる．図 7 にその外観を示す．このカメラはデジタルカメラと赤外線カメラを併せ持っているため、可視光画像と熱画像を同時に取得することが可能である．解像度は可視光画像が 640×480[pixel] で、熱画像が 80×60[pixel] であり、スペクトル波長は 7.5~13μm で遠赤外線を見ている．実験における各種パラメータは表 1 のように設定して行った．

5.2 実験結果及び考察

まず、熱画像の画素値から算出した温度を用いて傾斜角推定を行った．温度は 1 マスの画素値から算出した値ではなく、3×3 の 9 マスの平均値を用いて行った．平面の温度は図 8 の 1 の地点から、斜面の温度は 2 の地点から算出した．ただし、図 8 中の赤矢印は太陽方向、黄色曲線は地形の概形である．傾斜角推定結果が図 9 であり、傾斜角推定に使用した値や推定結果、傾斜角の

Table 1 Experimental setup

熱画像の解像度	80×60[pixel]
可視光画像の解像度	640×480[pixel]
反射温度	20.0[]
相対湿度	50[%]
外気温	20.0[]
対象物体までの距離	1.0[m]
アルベド	0.25
地表面放射率	0.54

Table 2 Result value

	平面 1	斜面 2
温度 []	29.6	23.4
傾斜角実測値 [deg]	—	11.24
傾斜角推定値 [deg]	—	11.7
方位角 [deg]	—	40
日射量差 (天体運動)[W/m ²]	—	-72.07
日射量差 (熱収支式)[W/m ²]	—	-75.60

実測値を表 2 にまとめる．表 2 を見ると，傾斜角が精度良く推定出来ていることが分かる．表 2 中の天体運動の日射量差とは傾斜角の実測値における日射量差のことである．

次に，複数地点の傾斜角推定結果と計測した傾斜角を比較した．計測地点は 33 箇所であり，1 箇所につき 3 点計測した．地表温度は赤外線カメラによる計測誤差を考慮しないでいように熱電対で計測した値を使用した．地表面のパラメタの内，顕熱輸送の交換係数 C_{HU} だけ値が不明だったため 0.001 から 0.01 まで 0.001 ずつ変化させて行った．本稿では C_{HU} が 0.005 の時の結果を載せる．その結果が図 10 である．ただし，北向きの斜面を青，東向きの斜面をマゼンタ，南向きの斜面を赤，西向きの斜面を緑としている．

図 10 を見ると，10[deg] 以下の傾斜や 12[deg] 付近の傾斜角は比較的精度良く求まっているが，全体的に小さく推定されていることが分かる．この誤差の要因としては，熱電対による温度の測定誤差やモデルが地表面の熱伝導を考慮していないことなどが挙げられる．提案手法において推定した傾斜角が実際より小さいということは，シミュレーションより平面と斜面の温度差が小さいということを意味しており，これは，熱伝導により周囲から熱が移動し，温度が低い領域が温められているということが考えられる．

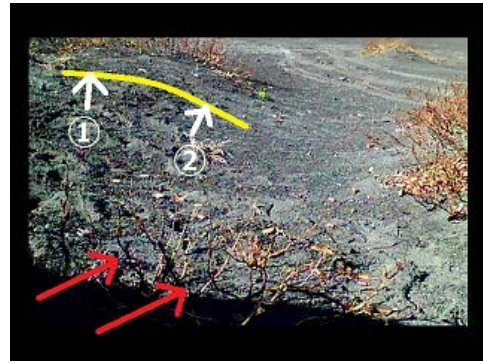
6 結言

本稿では，惑星探査ローバの地形傾斜推定に関する検討として，太陽日射量の違いによる平面と斜面の温度差に着目し，温度差を赤外線カメラにより検知することで傾斜角を推定するという手法を提案した．さらに，伊豆大島裏砂漠において検証実験を行い，実環境において評価を行った．

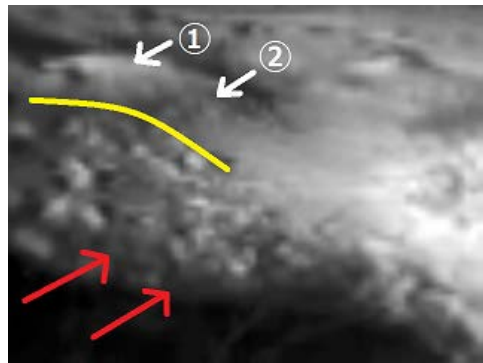
実験で取得した熱画像から算出した温度を用い傾斜角を推定し，傾斜計で計測した値と比較した．また，複数地点で傾斜角推定の結果と傾斜計で計測した値を比較したところ，相違が生じた．今後は，傾斜角推定アルゴリズムに地表面熱伝導を考慮することにより傾斜角推定精度の向上を行う．

参考文献

- [1] 狼嘉彰, 若林靖史, 足立忠司, “特集 大地とロボット 月・火星探査ローバ”, 日本ロボット学会誌, vol.12-7, pp.979-985, 1994.
- [2] Horn, B. K., “Shape from Shading: A Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object from One View,” Project MAC, A. I. Tech. Rep.79, 1970.
- [3] Pentland, A. P., “Linear Shape from Shading,” International Journal of Computer Vision, vol.4-2, pp.153-162, 1990.
- [4] Scharstein, D. and Szeliski, R., “A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms,” International Journal of Computer Vision, vol.47-1, pp.7-42, 2002.
- [5] NEDO 新エネルギー部 太陽電池グループ, “NEDO 標準気象データベースの解説書”, 2012.
- [6] Best, M. J., “A Model to Predict Surface Temperatures,” Boundary-Layer Meteorology, vol.88-2, pp.279-306, 1998.
- [7] Darin, K., “Vectorized Solar Azimuth and Elevation Estimation,” Matlab Central, File Exchange, 2009.



(a) Visual image



(b) Thermal image

Fig.8 Visual and thermal images of an experimental spot

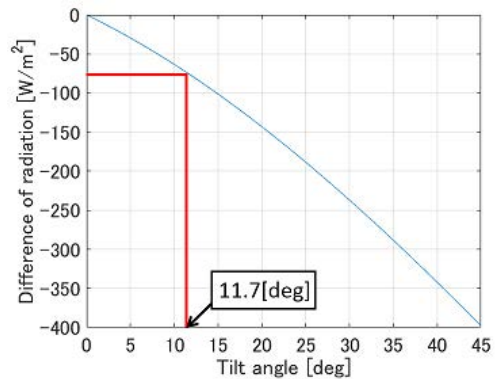


Fig.9 Tilt angle estimation result

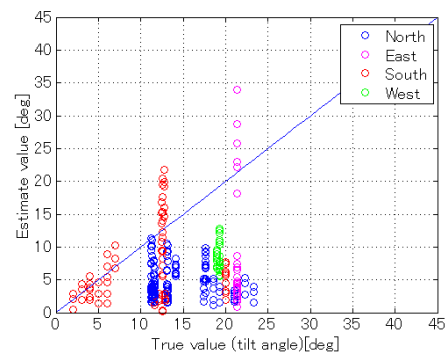


Fig.10 Tilt angle estimation at 33 spots