赤外線カメラを用いた地形傾斜推定法

渡邊 哲志 *1*3, 大津 恭平 *2, 大槻 真嗣 *3, 久保田 孝 *3, 増山 岳人 *1, 梅田 和昇 *1

Terrain Slope Estimation using an Infrared Camera

Satoshi WATANABE^{*1*3}, Kyohei OTSU^{*2}, Masatsugu OTSUKI^{*3}, Takashi KUBOTA^{*3}, Gakuto MASUYAMA^{*1}, and Kazunori UMEDA^{*1}

*1 Department of Precision Mechanics, Chuo University 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551, Japan *2 Jet Propulsion Laboratory

4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA 91109, The United States of America *³Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa, 252-5210, Japan

A field robot in natural terrain is required to recognize and avoid terrain slopes for efficient and safe operation. Stereo matching of visible images and shape-from-shading have been widely used for those requirements. However, the schemes have such problems as degradation of accuracy in low-textured terrain and the large computational cost. Therefore, this paper proposes a terrain slope estimation method using a single infrared camera. The proposed idea is to utilize the differences of surface temperatures between slope and flat surface, which is caused by the difference of solar radiation. Candidates of terrain tilt angles are estimated from the energy balance equation. This paper introduces a voting-based method to identify the estimate of tilt angle. Accuracy of the proposed method is evaluated by simulation, where the surface temperature is determined by the energy balance equation.

Key Words : Terrain Slope Estimation, Infrared Camera, Surface Temperature

1. 緒 言

屋外環境で活動するロボットは,一般に様々な制約 を受ける.その代表例としては,安全性やエネルギ効 率が挙げられ,これらは地表面の状態に強く依存する と考えられる.例として車輪型ロボットを考えると, 平らで強固な地表面上は問題なく走行できるが,地表 面が砂である場合にはスタックし,岩などの障害物が 多数ある場合にはスリップする危険性がある.また, 岩などを乗り越える場合には電力消費も大きくなる. 同様に,安全性やエネルギ効率は地形傾斜とも深い関 わりがあると考えられる.斜面走行時は平面走行時に 比べ電力消費が大きく,車体安定角を超えることによ る転倒,またはスタックの危険性が高くなる.車輪型 ロボットの中でも,他の天体を調査する惑星探査ロー バはこれらの制約を強く受ける.電力は自らに搭載し た太陽電池パネルや RTG のみで賄わなければならず, また,地球以外の天体で探査を行っているため,転倒,

スタックしても人間が関与することは出来ず,そこで 探査終了となる.惑星探査ローバに限らず,地形傾斜 を推定することは,ロボットが屋外環境において安全 で,かつ効率よく活動できることにつながる.

従来は,地形傾斜を推定する方法として,可視光ス テレオなどが一般に用いられてきた⁽¹⁾⁽²⁾.しかし,可 視光ステレオは,図1のような惑星表面や人工物な どのテクスチャが弱い領域では推定精度が低くなる, ステレオ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点がある.テクス チャが弱い領域にも対応出来る手法として,Edge map を用いた手法⁽³⁾などが提案されているが,屋外環境の 照明条件においてはロバストでないといった問題点が ある.また,Shape from shading⁽⁴⁾⁽⁵⁾も用いられてきた が,計算コストが高いといった問題点がある.

本稿では,従来用いられてきた可視光カメラではな く,赤外線カメラを用いて地形傾斜を推定する方法を 提案する.赤外線カメラを用いることで,推定精度が 地表面の特徴の強弱に依らず,また,単眼かつ低計算 コストで傾斜角を推定することが可能である.提案手 法の概要は以下の通りである.傾斜角が異なる場所で は太陽からの日射量が異なり,その結果,地表面温度

^{*&}lt;sup>1</sup> 中央大学理工学研究科精密工学専攻(〒112-8551 東京都文 京区春日 1-13-27) watanabe@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

^{*2} ジェット推進研究所(アメリカ合衆国 91109 カリフォルニ ア州パサデナ,オーク・グローブ 4800)

^{*3} 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(〒 252-5210 神奈川 県相模原市中央区由野台 3-1-1)



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

に差が生じる.その温度差を赤外線カメラにより検知 し,地表面温度と熱収支式を用いることにより傾斜角 を推定する.既報⁽⁶⁾では,斜面の方位角を既知として いたが,本稿では,時間を置いて同一地点を観測する ことにより,任意の傾斜角・方位角の推定を可能とす る.上記の提案手法を用いた初期検討として,赤外線 カメラによる温度計測の誤差の影響をなくした理想条 件での検討を行った.

2. 地表面温度を用いた傾斜角推定

地表面の傾斜角が異なると,図2のように太陽光入 射角が異なる.よって,式(1)で表される太陽からの 直達日射量に差が生じる.

$$S_{w\downarrow} = S\cos\theta \tag{1}$$

ここで, $S_{w\downarrow}$ は太陽からの直達日射量,Sは太陽光に垂 直な面が受ける日射量, θ は太陽光入射角である.こ の直達日射量の差が地表面温度の差として現れ,逆問 題を解くことにより地表面温度から傾斜角を推定する.

地表面温度から直達日射量の差を算出する際には, 赤外線カメラで撮影した熱画像から算出した地表面温 度と熱収支式を用いる.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を温度に換算 し,画像として表示したものである.ただし,画像中 の温度の高い領域を白,温度の低い領域を黒で表示し ている.図3は同じU字型の斜面を撮影したもので あるが,可視光画像では地表面のテクスチャに大きな 変化が無いため,斜面の傾斜角を推定するのは困難で ある.それに対し,熱画像では温度差が輝度値の差と して顕著に表れるため,傾斜角を推定することが可能 である.

また,直達日射量の差から傾斜角を推定する際には, 熱収支式から求めた平面と斜面の直達日射量の差と, 任意の傾斜角・方位角における直達日射量の差のテー ブルを比較する.このテーブルは,事前に太陽方向ベ クトルと斜面の法線ベクトルから算出しておく.さら



Fig. 2 Solar radiation in flat and slanted surfaces



(a) Visual image



(b) Thermal image

Fig. 3 Visual and thermal images of a gully

に,傾斜角の候補が複数ある場合は,候補への投票を 時刻を変えて複数回用いることにより,傾斜角を一意 に決定する.

3. 地表面の熱収支モデル

地表面の熱収支は図4のようにモデル化され⁽⁷⁾,熱 入力と熱出力は以下の通りである. 熱入力

- 、上四クショナン
- 太陽からの直達日射 S_{w↓}
- 大気からの放射 L_{w↓}

熱出力

- ・ 地表面からの放射 L_{w↑s}
- 太陽からの直達日射の反射 S^{refl}_{w↑}
- 大気からの放射の反射 L^{refl}_{w⁺}
- ● 顕熱輸送量 H
- 地中伝熱量 G



Fig. 4 Energy balance of the surface $^{(7)}$

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.

$$L_{w\uparrow s} = \varepsilon \sigma T^4 \tag{3}$$

$$H = C_p \rho C_H U (T - T_a) \tag{4}$$

ここで, ε は地表面放射率, σ はステファン・ボルツマン定数,Tは地表面温度, C_p は空気の定圧比熱, ρ は空気の密度, C_HU は顕熱輸送の交換係数, T_a は外気温である.

4.提案手法

傾斜角推定を行うにあたり,以下の仮定を設ける.

- 地表面の特性は一様である
- 地表面に関するパラメータの値は既知である
- 熱が蓄積されることはなく、地表面間の熱伝導も 起こらない
- 平面と斜面において,大気からの放射 L_{w↓}と大気 からの放射の反射 L^{refl},潜熱輸送量 λE,地中伝 熱量 G は等しい

傾斜角推定の手順は,以下の通りである.

- 1. 熱画像の画素値から平面(傾斜角0 deg)と斜面の温度を算出する
- 2. 平面と斜面の温度から熱収支式を用いて,平面と 斜面の直達日射量の差を算出する(4·1節)
- 3. 直達日射量差を基に,太陽運動シミュレーション から傾斜角の候補を抽出する(4·2節)

4.5分間の連続観察と投票を用いて,傾斜角を一意 に定める(4·3節)

4.1 地表面温度から直達日射量の差算出 平面 と斜面の熱収支式の差をとる.下付き添え字 s で斜面 を,f で平面を表すとすると,式(2),(3),(4)より,平 面と斜面の熱収支式の差は式(5)で表せる.

$$S_{w\downarrow[s]} - S_{w\downarrow[f]} = \frac{\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_f^4) + C_p\rho C_H U(T_s - T_f)}{1 - A}$$
(5)

ここで, A はアルベドである.ロボットが実際に活動 する場合には,大気放射量 $L_{w\downarrow}$ と潜熱輸送量 λ E,地 中伝熱量 G,気温 T_a は未知量であることが多い.そ のような場合でも,熱収支式の差を取ることにより, これらの未知量を消去することが出来る.その結果, 式(5)の右辺の平面の温度 T_f と斜面の温度 T_s 以外の パラメータは,全て特定の値をもつ.よって,平面の 温度 T_f と斜面の温度 T_s を入力することにより,平面 と斜面の直達日射量の差を数値として求めることがで きる.

4.2 直達日射量の差から傾斜角推定 傾斜角を 推定する際には,4.1節で熱収支式から求めた平面と 斜面の直達日射量の差と,太陽の運動から求めた平面 と斜面の直達日射量の差を比較する.太陽の運動から 求めた平面と斜面の直達日射量の差とは,任意の傾斜 角・方位角における直達日射量から,平面の直達日射 量を引いたものをテーブルとして求めたものである.

任意の傾斜角・方位角における直達日射量は,以下 の手順で算出する.2章で述べたように,直達日射量 は太陽光入射角に比例する.また,太陽光入射角は太 陽赤緯と太陽の時角,斜面の傾斜角・方位角によって 定まる.よって,同じ時刻でも斜面の傾斜角・方位角 が異なれば,直達日射量は異なる.ここで,斜面の方 位角とは,斜面上の法線ベクトルがどの方角を向いて いるかを数値として表したものであり,北向きを0 deg (360 deg), 東向きを 90 deg, 南向きを 180 deg, 西 向きを 270 deg としている.太陽赤緯と太陽の時角は, MATLABの関数である SolarAzEl⁽⁸⁾により求めた.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出力する関数であ る.まず,太陽赤緯と太陽の時角を用いて太陽光のべ クトルを算出し,斜面の傾斜角・方位角を用いて斜面 の法線ベクトルを算出する.次に,両ベクトルのなす 角を計算することにより太陽光入射角を求め,直達日 射量を求めた.

斜面の傾斜角を 0 deg から 30 deg まで 0.1 deg 刻み, 斜面の方位角を 0 deg から 360 deg まで 1 deg 刻みで 変化させて直達日射量を算出し,平面の直達日射量を



Fig. 5 Difference of solar radiation at varying directions and tilt angles(p.m. 0:00)



Fig. 6 Extraction of the optional points

引いたものを 3 次元プロットすると,図 5 のようになる.ただし,この図は 2015 年 11 月 06 日,午後 0:00, 緯度 34.722469 deg,経度 139.407204 deg,高度 633 m で行った結果である.

テーブルの中から,熱収支式から求めた直達日射量 の差と合う点を探索する.それらの点をこれ以降,候 補点と呼ぶ.どの時間帯でも,候補点は図6の紺色の 曲線のように等日射量線上に多数存在する.ただし, この図は,図5の中から,直達日射量が102W/m²か ら104W/m²までの点を抽出したものである.図6で は,視認性のためにこの範囲の直達日射量を抽出して いるが,提案手法では,推定された直達日射量から± 0.1W/m²の範囲の点を抽出している.この多数ある 候補点の中から適当なものを選択するために,本稿で は定点観測と投票を用いる.

4.3 投票を用いた候補点の絞り込み ある地点 における傾斜角・方位角は一定である一方,その地点に おける等日射量線は,太陽位置の変化に伴い時々刻々 変化する.そこで,複数の時刻における等日射量線の 交点を推定することで傾斜角・方位角を求める.図7



Fig. 7 An example of the optional points at multiple times



Fig. 8 An example of the voting result

に複数時刻における等日射量線の例を示す.本稿では, 候補点位置への投票により交点を求める.

投票手順は以下の通りである.まず,ある時刻にお ける全ての候補点の位置に1のスコアを投票する.次 に,1分間その場に待機した上で,同様にして4·1節 から4·2節の手順に従って候補点を抽出し,候補点位 置に投票する.この一連の操作を5回繰り返す.投票 結果の一例を図8に示す.ただし,図8は午後0:00, 傾斜角10 deg,方位角180 degで投票を行った結果で あり,傾斜角が8 deg から12 deg,方位角が150 deg から210 deg の部分を拡大表示している.

最後に,投票結果を基に,これらの候補の中からス コアが最大の点を抜き出す.スコア最大の点が複数あ る場合には,複数ある中から傾斜角の値が中間値であ るものを採用する.

5. シミュレーション検討

理想的な地表面温度情報から推定される傾斜角の精 度を検証するために,シミュレーションを行った.平 面の温度 T_f と斜面の温度 T_s には,3章で述べた地表



Fig. 9 Tilt angle estimation error (p.m. 0:00)

面の熱収支式(式(2))により算出されるものを用い る.これは,赤外線カメラの観測誤差の影響を除くた めである.この他にも,以下の追加の仮定を設ける.

- 地表面の水分は蒸発しない(潜熱輸送量 λE は 0)
- 地中へ伝熱しない(地中伝熱量Gは0)
- ・ 大気放射量 L_{w⊥} は既知で固定の値を取る

傾斜角推定結果は,真値とのずれの絶対値の平均と標 準偏差で評価する.

地表面温度は,以下の手順で算出する.上記の仮定 下では,地表面の熱収支式は以下のようになる.

$$S_{w\downarrow} + L_{w\downarrow} - \varepsilon \sigma T^4 - S_{w\uparrow}^{refl} - L_{w\uparrow}^{refl} - C_p \rho C_H U(T - T_a) = 0$$
(6)

直達日射量 $S_{w\downarrow}$ は, 4·2 節で直達日射量を求めた方法 と同様にして求める.式(6)を平面と斜面の場合でそ れぞれ立て,平面の温度 T_f ,斜面の温度 T_s について 解くことにより,平面と斜面の温度を求める.本稿で は,斜面の傾斜角を 0 deg から 30 deg まで 0.5 deg 刻 み,斜面の方位角を 0 deg から 360 deg まで 1 deg 刻 みで変化させて,地表面温度を算出した.

この地表面温度と提案手法を用いて,傾斜角推定シ ミュレーションした結果を図9に示す.ただし,図9 は方位角の正の方向を x 軸,傾斜角の正の方向を y 軸 としたとき, z 軸に傾斜角推定誤差の絶対値を取り,3 次元プロットしている.時刻は午後 0:00 で,傾斜角 は 0 deg から 30 deg まで 0.5 deg 刻み,方位角は 0 deg から 360 deg まで 1 deg 刻みで変化させて行った.

午後 0:00 における傾斜角推定誤差の絶対値は,図 10 に示す通り,誤差 0 deg が最も多いという結果に なった.この傾斜角推定誤差の,全点についての平均 と標準偏差を算出した結果,平均は 0.0322 deg で,標 準偏差は 0.0727 deg であった.同様にして,9:00 から 15:00 まで 30 分間隔で傾斜角推定シミュレーションを



Fig. 10 Number of points at each estimation error (p.m. 0:00)



Fig. 11 Mean and standard deviation of estimation error

行い,傾斜角推定誤差の平均と標準偏差を算出した. その結果を表2に示し,図で表したものを図11(a)に 示す.また,傾斜角毎の推定誤差の平均と標準偏差を 図11(b)に示す.

時間帯,傾斜角によらず,良好な結果が得られてい

Time	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00
Mean [deg]	0.0415	0.0375	0.0349	0.0326	0.0320	0.0311	0.0322
Standard deviation [deg]	0.0889	0.0818	0.0777	0.0732	0.0721	0.0712	0.0727
Time	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	
Mean [deg]	0.0337	0.0360	0.0386	0.0506	0.1265	0.4206	
Standard deviation [deg]	0.0754	0.0795	0.0844	0.1269	0.4648	1.4055	

Table 2 Mean and standard deviation of estimation error



Fig. 12 Solar radiation at varying directions and tilt angles(15:00)

る.しかし,14:30や15:00の標準偏差が,他の時間 帯と比較すると大きい値となっていることが分かる. これは,直達日射量によるものだと考えられる.15:00 の直達日射量は図12のようになっており,方位角が0 deg から 110 deg, 傾斜角が 18.5 deg から 30 deg まで の斜面は,直達日射量が0W/m²で太陽が当たってい ないことが分かる.本手法の特徴として,直達日射量 が等しい箇所は,傾斜角推定値が等しくなるという性 質があるため,直達日射量が0W/m²である箇所が, 全て同じ傾斜角であると判断される.その結果,傾斜 角真値とのずれが大きくなる.この部分の誤差の影響 で,14:30や15:00の平均値と標準偏差が大きくなっ ている.図11(b)で18.5 deg以上で標準偏差が大きく なっているのも,同様の原因であると考えられる.ま た, 18.5 deg から 21.5 deg まで, 傾斜角が大きくなる につれて次第に標準偏差が小さくなり, 22 deg 以上で, 次第に標準偏差が大きくなっている.これは,直達日 射量が0W/m²の箇所は全て,傾斜角が21.5 degと推 定されているためである.

6. 結 言

本稿では,ロボットが屋外環境で安全かつ効率的に 活動できるように,赤外線カメラを用いて地形傾斜を 推定する方法について述べた.地表面温度から平面と 斜面の直達日射量の差を算出し,事前に任意の方位角・ 傾斜角でテーブルとして求めた直達日射量の差と比較 することで,傾斜角の候補を抽出した.その上で,投 票を用いて傾斜角を一意に定める手法を提案し,理想 条件での傾斜角推定シミュレーションを行った.時刻 が 9:00 から 15:00,傾斜角が 0 deg から 30 deg,方位 角が 0 deg から 360 deg において推定精度は高く,本 手法は有用であるといえる.今後の課題としては,実 環境データを用いた傾斜角推定などが挙げられる.

参考文献

- K. Schauwecker, R. Klette, and A. Zell, "A New Feature Detector and Stereo Matching Method for Accurate High-Performance Sparse Stereo Matching", *Proceedings of the* 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2012), pp.5171–5176.
- (2) Z. F. Wang and Z. G. Zheng, "A Region Based Stereo Matching Algorithm using Cooperative Optimization", *Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (2008), pp.1–8.
- (3) L. T. Sach, K. Atsuta, K. Hamamoto, and S. Kondo, "A Robust Stereo Matching Method for Low Texture Stereo Images", *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Computing and Communication Technologies*, (2009), pp.1–8.
- (4) R. Zhang, P. S. Tsai, J. E. Cryer, and M. Shah, "Shapefrom-Shading: a Survey", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.21, No.8(1999), pp. 690–706.
- (5) M. K. Johnson and E. H. Adelson, "Shape Estimation in Natural Illumination", *Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (2011), pp.2553–2560.
- (6) 渡邉 哲志ほか、"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"、第28回日本 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2016講 演論文集、2A2-18a4、(2016).
- (7) Martin J. BEST, "A Model to Predict Surface Temperatures", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.88, No.2(1998), pp.279–306.
- (8) Koblick DARIN, "Vectorized Solar Azimuth and Elevation Estimation", *Matlab Central, File Exchange*, (2009).