

# 赤外線カメラを用いた地形傾斜推定法 Terrain Slope Estimation using an Infrared Camera

渡邊哲志<sup>\*1</sup> 大津恭平<sup>\*2</sup> 大槻真嗣<sup>\*3</sup> 久保田孝<sup>\*3</sup> 増山岳人<sup>\*1</sup> 梅田和昇<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 中央大学 <sup>\*2</sup> JPL <sup>\*3</sup> AXA

## 1. 背景

屋外環境で活躍するロボットは**安全性**や**エネルギー効率**などの制約を受ける

これらの制約は**地形傾斜**と深い関わりがある

斜面走行時

- ・平面走行時に比べ消費電力が大きい
- ・転倒やスタックの危険性が高い

地形傾斜推定はロボットが屋外環境で安全で効率よく活動できることにつながる

従来の画像を用いた地形形状推定手法

- ① 可視光ステレオカメラによる地形推定  
問題点: テクスチャが弱い領域⇒推定精度が低くなる
- ② Shape from Shading  
問題点: 計算コスト高い

研究目的・赤外線カメラを用いた地形傾斜推定法の確立  
・実地データを用いて傾斜角・方位角推定精度の検証

## 2. 提案手法の概要

赤外線カメラを用いた地形傾斜推定

傾斜角の違いによる**直達日射量**の違いが地表面温度の差として現れる  
太陽の直達日射量

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

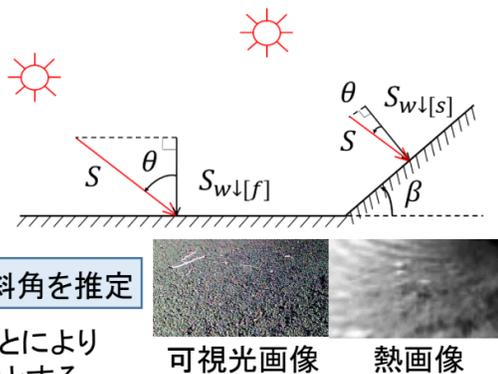
S: 太陽の法線面日射量[W/m<sup>2</sup>]

1. 地表面温度差を**赤外線カメラ**で撮影した**熱画像**により検知

2. 地表面温度と熱収支式により傾斜角を推定

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

- ・推定精度が地表面の特徴の強弱に依らない
- ・単眼・低計算コストで傾斜角推定可能



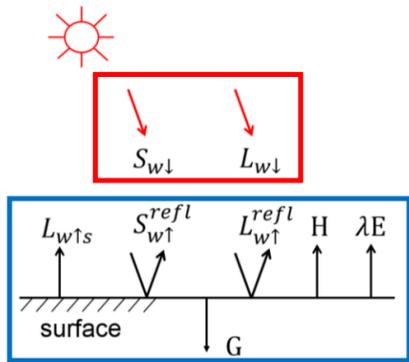
熱画像中で  
温度低 → 黒  
温度高 → 白

## 3. 地表面の熱収支モデル

流入熱量

流出熱量

- ・ $S_{w\downarrow}$ : 太陽放射
- ・ $L_{w\downarrow}$ : 大気放射
- ・ $L_{w\uparrow s}$ : 地表面からの放射
- ・ $S_{w\downarrow}^{refl}$ : 太陽放射の反射
- ・ $L_{w\downarrow}^{refl}$ : 大気放射の反射
- ・ $H$ : 顕熱輸送量
- ・ $\lambda E$ : 潜熱輸送量
- ・ $G$ : 地中伝導熱



熱収支式

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

## 4. 地形傾斜推定手順

1. 熱画像の画素値から平面と斜面の温度を算出
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
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
4. 5分間の連続観察と投票を用いて、傾斜角を一意に決定

### 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取る 仮定: 平面と斜面で $L_{w\downarrow}$ ,  $\lambda E$ は等しい

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

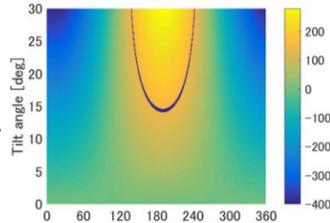
$$= k_1(T_s^4 - T_f^4) + k_2(T_s - T_f) \quad k_1, k_2: \text{定数}$$

### 4.2 直達日射量の差から傾斜角推定

熱収支式から求めた日射量差



傾斜角の候補を抽出(右図)



傾斜角候補の抽出 (午後0:00)

同一地点の観測時間を増やす+投票により傾斜角を一意に決定

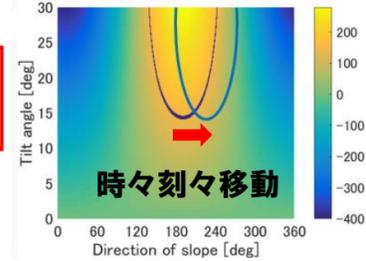
### 4.3 投票を用いた候補の絞り込み

時間経過したとき、

太陽の位置は**変化する**  
傾斜角・方位角は**変化しない**

曲線の交点の値=求めたい斜面の傾斜角

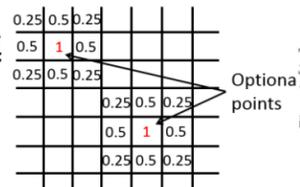
投票により交点を算出



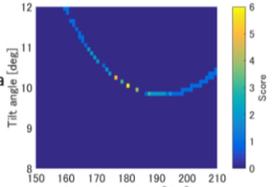
時々刻々移動

### 投票手順

ある時刻において候補に投票  
for n = 1 to 5  
n分後のデータを用いて  
手順4.1, 4.2  
候補に投票(図(a))  
end for  
スコア最大の点抽出



(a)候補への投票



(b)投票結果一例

## 5. 屋外実験

伊豆大島裏砂漠で斜面を赤外線カメラで撮影し、そのデータを用いて傾斜角推定を行った

### 実験概要

斜面を赤外線カメラで撮影し、地表面温度を取得。10時から15時まで30分毎にデータを取得。傾斜角は傾斜計を用いて取得。

### 実験装置

赤外線カメラ(FLIR AX8)

スペクトル波長: 7.5~13μm(遠赤外線)  
熱画像と可視光画像を同時に取得可能  
解像度: 可視光(640×480ピクセル)  
赤外線(80×60ピクセル)



傾斜計

地表面に置いて計測  
分解能: 0.01°



### 実験結果



A: 平面  
B: 斜面  
傾斜角: 23.81°  
方位角: 151°



可視光画像 熱画像

### 傾斜角推定結果

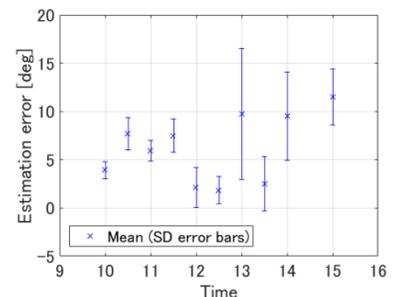
傾斜角推定誤差は誤差の絶対値の**平均**と**標準偏差**で評価

推定誤差の平均が小さい

精度よく推定できている

推定誤差の標準偏差が小さい

再現性が高い(安定して傾斜角を推定できる)



推定誤差の平均と標準偏差

- ・午後0時のとき精度が最高で、太陽が傾くにつれて精度は低くなる
- ・10時から15時では角度誤差は最大で48.2%と大きい

推定精度の向上が必要不可欠

## 6. 今後の課題

熱伝導モデルを導入し推定精度を向上