

単一空撮画像による地形復元に 基づいた日照領域予測

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻

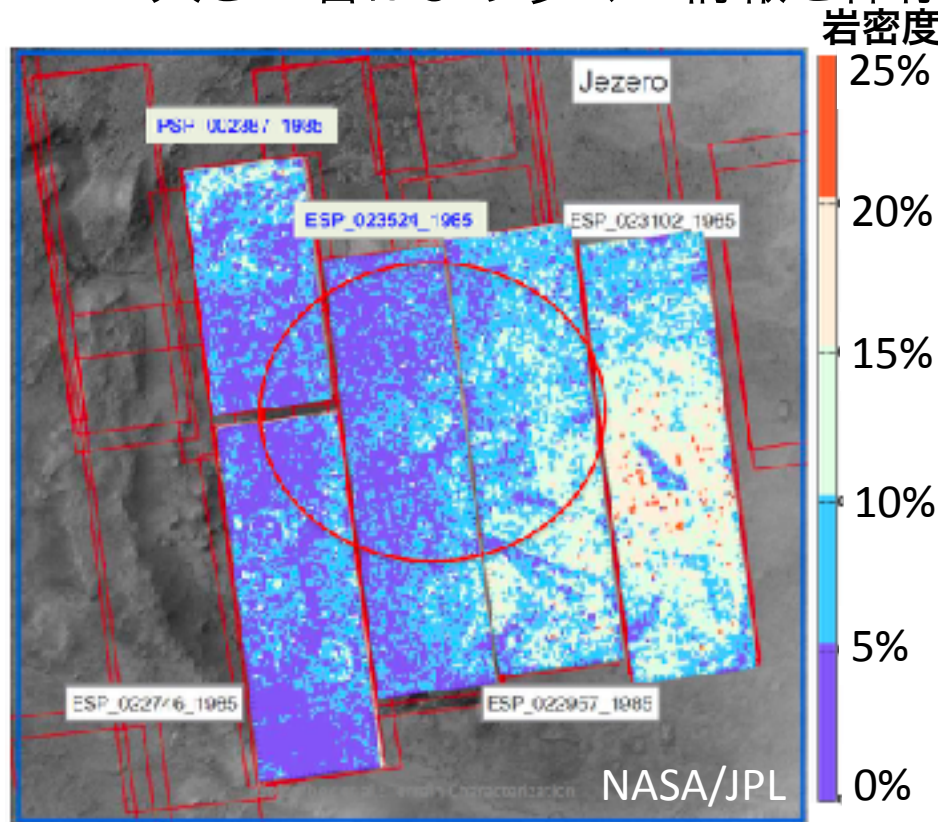
修士2年 佐野俊太

指導教員 橋本樹明

火星における探査要求領域

• 岩の多い領域

- 初期の火星や形成過程などの情報が保存
- 大きい岩はより多くの情報を保存しているため科学的に興味の対象



火星における火成岩[2]



地層構造を持つ岩[3]

次期火星探査候補地点のJezero Crator[1]

[1] J. Balaram, "Rotorcrafts for Mars Exploration," in 11th International Planetary Probe Workshop, 2014.

[2] Burr, Devon M., et al. "Inverted fluvial features in the Aeolis/Zephyria Plana region, Mars: Formation mechanism and initial paleodischarge estimates." Journal of Geophysical Research: Planets 115.E7, 2010.

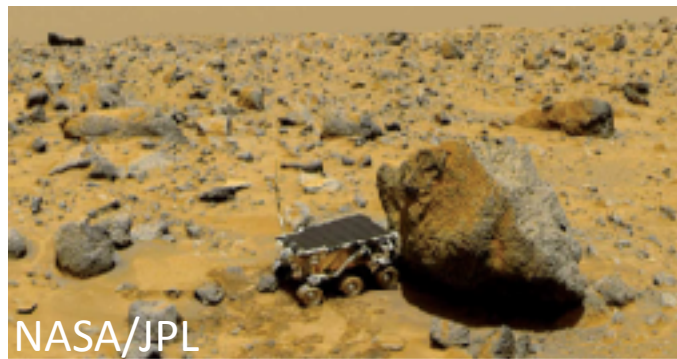
[3] Jakosky, Bruce M., and Everett L. Shock. "The biological potential of Mars, the early Earth, and Europa." Journal of Geophysical Research: Planets 103.E8, pp. 19359-19364, 1998.

従来の惑星探査移動ロボット

- 車輪型ローバ
 - 多数の科学探査機器を搭載し**詳細な探査が可能**
 - 車輪駆動により惑星地表面を走破
 - 崖や岩の多い地形は科学的に興味があっても探査することが**困難**



Rover:Curiosity



岩の多い領域



Victoria Carter

火星探査ドローン

- 目的
 - ローバの探査できない岩の多い領域で探査
- 特徴
 - 垂直離着陸
 - 小型(高さ0.3m)軽量(1kg)な機体に大きい翼(半径0.5m)
 - 画像によるナビゲーションが主
 - 次に短い飛行(2,3分)のために1日かけて太陽光発電
- 問題
 - 大きな岩の作る影を避けて着陸する必要
 - 1日の間で影の位置と形状が変化
 - 影の変遷を着陸前に予測する必要



火星探査ドローン 'scout' [1]

'scout'の諸元 [1]

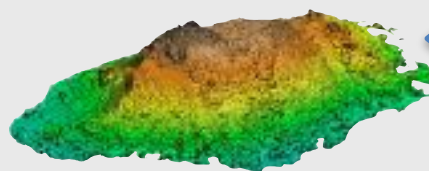
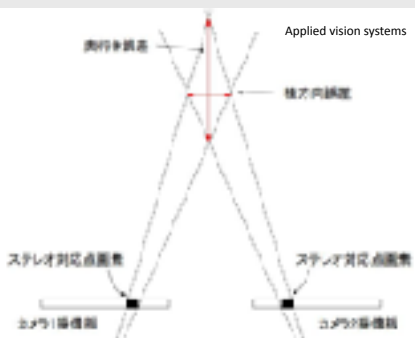
重量	1[kg]
機体の高さ	0.3[m]
翼の半径	0.5[m]
機体の体積	14*14*14[cm ³]
パネルの半径	0.5[m]
飛行時間	3分/sol(火星の1日) <small>This document is provided by JAXA.</small>

➡ 惑星着陸機と似た問題

着陸機とドローンにおける日照領域予測システム

着陸機

衛星画像
(低解像度)



ステレオ
ビジョン

DEM

(Digital Elevation Map)

レイ
トレーシング

日照領域

40[cm/pixel]
解像度不足

基線長不足で奥行き分
解能低い

3次元点群データ
大きすぎるデータ

地点から太陽光線上
に物体がないか判定
探索範囲、データ量
によって計算時間増加

火星ドローン

その場の空撮画像
(高解像度)

単一画像
による復元

簡易的な
地形表現

高速な
再投影計算

日照領域

研究の目的

- 各処理において精度，計算速度面の向上
 - 単一画像による地形復元手法
 - 高速な再投影計算手法
- 火星探査ドローンのための高速・高精度な日照領域予測システムの構築

火星ドローン

その場の空撮画像
(高解像度)

単一画像
による復元

簡易的な
地形表現

高速な
再投影計算

日照領域

研究の目的

- 各処理において精度，計算速度面の向上
 - 単一画像による地形復元手法
 - 高速な再投影計算手法
- 火星探査ドローンのための高速・高精度な日照領域予測システムの構築

火星ドローン

その場の空撮画像
(高解像度)

単一画像
による復元

簡易的な
地形表現

高速な
再投影計算

日照領域

単一空撮画像を用いたガウス分布近似による 地形復元法（既発表）

アルゴリズム

(i) 地面に落ちる影と岩の輪郭から岩形状情報の抽出

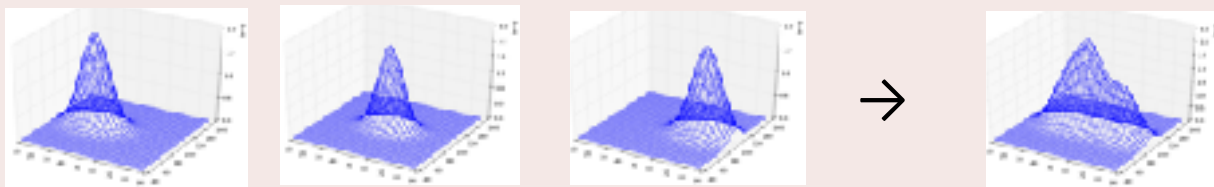


岩形状情報

×5

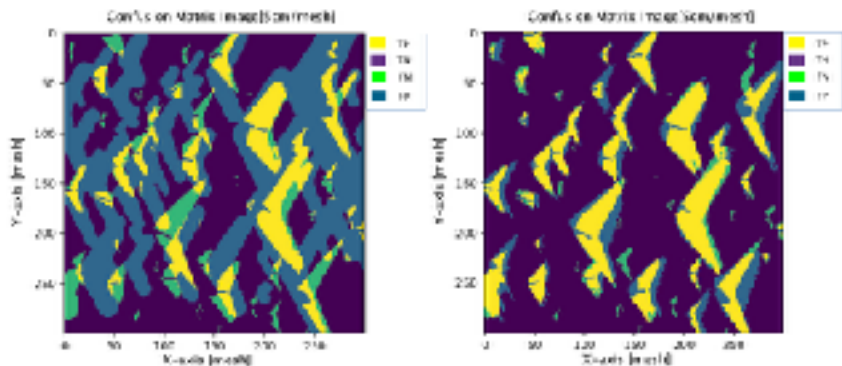
中心点： (x, y)
高さ： l
長径： d_x
短径： d_y

(ii) 複数の2次元ガウス分布関数の重ね合わせによる岩の近似



本提案地形復元は
従来法よりも有効

評価 従来の円柱で岩を近似する手法との性能の比較



	従来	提案
安全度	61.32%	94.55%
非冗長度	22.25%	43.31%

安全度=

正しく影と推定された領域/真の影の領域

非冗長度=

真の影の領域/影と推定された領域

研究の目的

- 各処理において精度， 計算速度面の向上
 - 単一画像による地形復元手法
 - **高速な再投影計算手法**
- 火星探査ドローンのための高速・高精度な日照領域予測システムの構築

火星ドローン

その場の空撮画像
(高解像度)

単一画像
による復元

簡易的な
地形表現

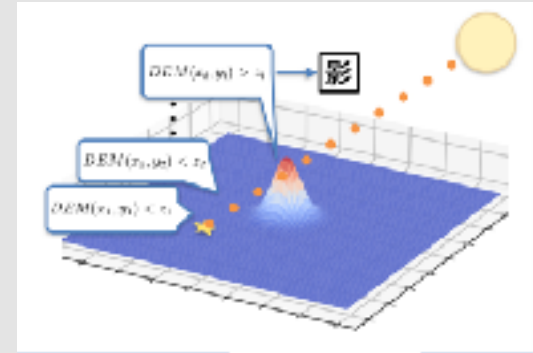
高速な
再投影計算

日照領域

ガウス分布関数による一地点での日陰判定法

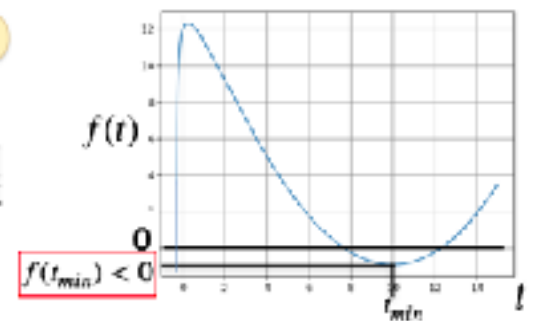
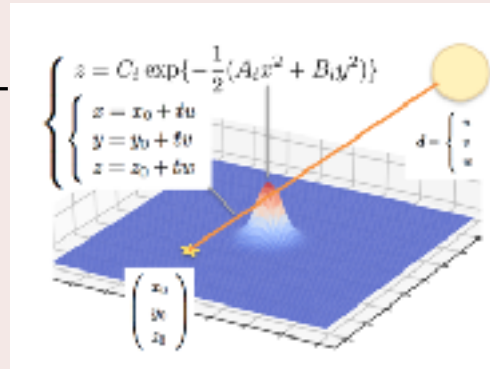
レイトレーシング (離散的)

- 離散的に1点1点DEMとの衝突判定
- DEM分解能に依って計算点数が変化



提案日陰判定法 (連続的)

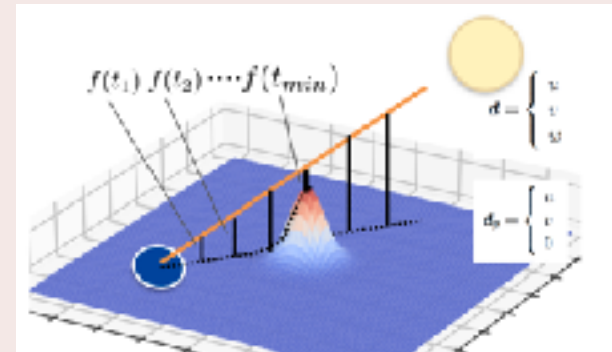
- ガウス分布関数と太陽光直線との連立方程式の解の個数で判定
 - 2個以上：影
 - 1個：日照



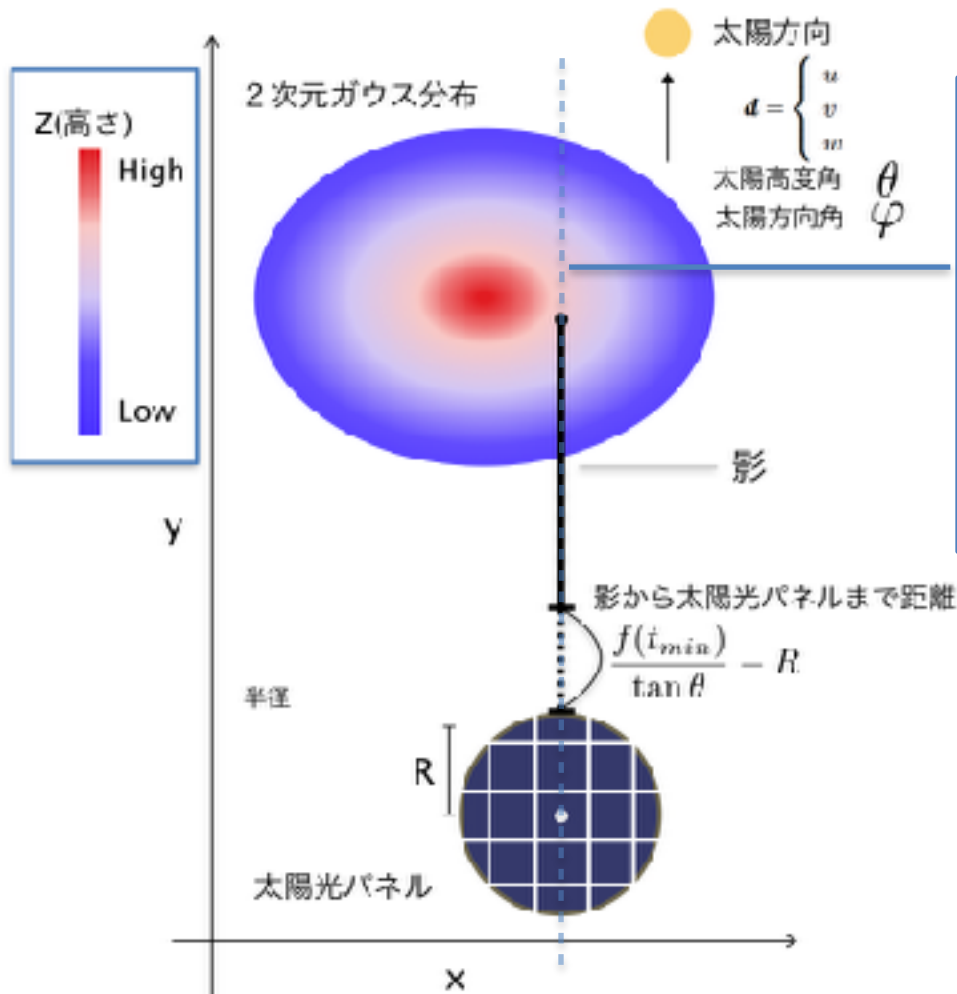
$$f(t) = -\frac{1}{2}(u^2 + v^2)t^2 + (u\mu_x + v\mu_y - x_0u - y_0v)t + \log(vt + z_0) - \frac{1}{2}(x_0^2 + y_0^2) - x_0\mu_x - y_0\mu_y - \log C$$

直線の点からxy平面に対する垂線を
ガウス分布曲線に下ろした時の交点までの距離

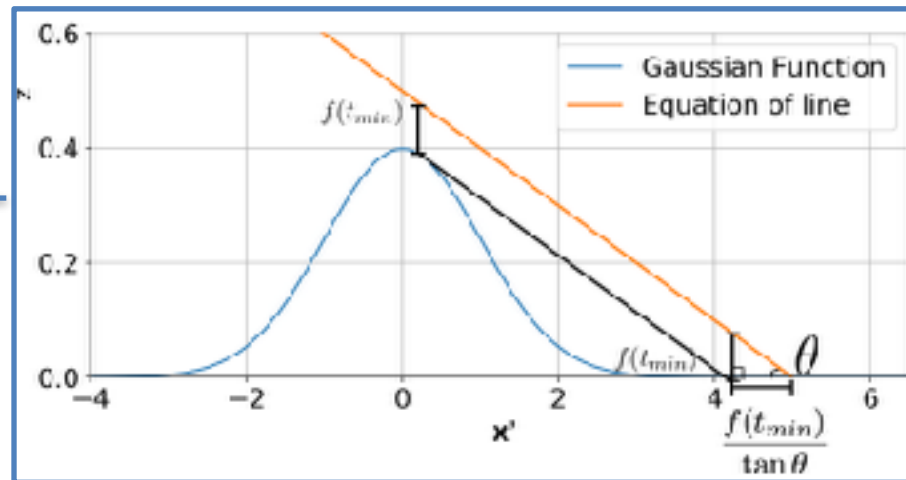
$$result = \begin{cases} shadow & [f(t_{min}) \leq 0] \\ irradiance & [f(t_{min}) > 0] \end{cases}$$



太陽方向のパネル領域に対する日陰判定



f(t)から影がどこまで迫っているかを算出



日陰判定式

$$\frac{f(t_{min})}{\tan \theta} - R > 0$$

YES

日照領域

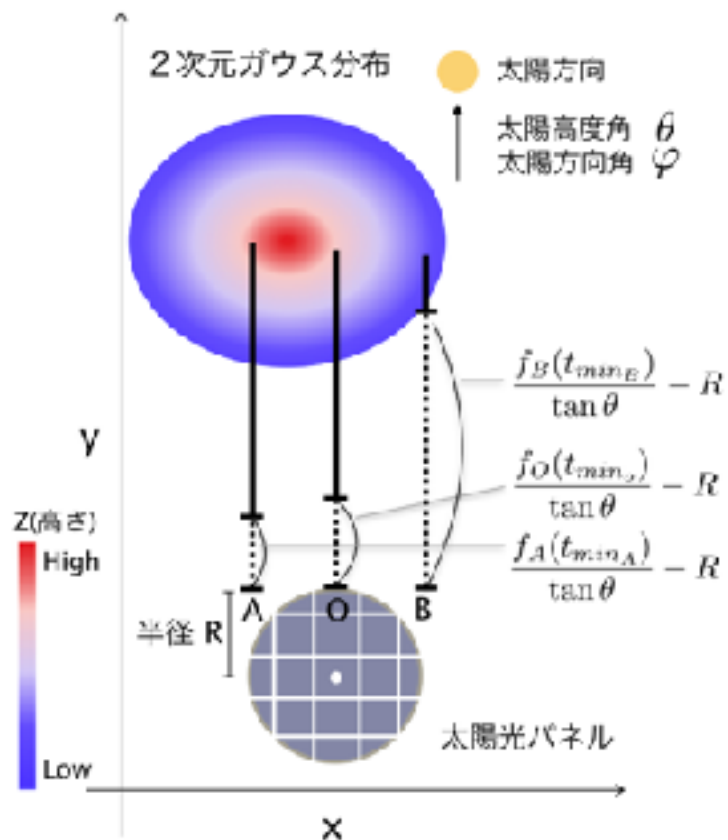
NO

影領域

ある地点から太陽方向に関するパネル領域の日陰判定が可能

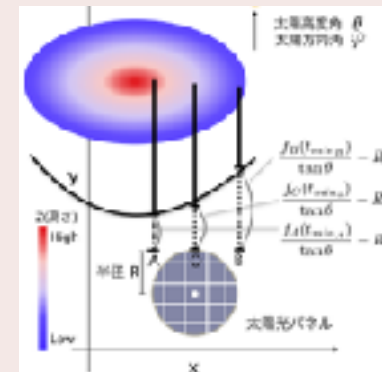
太陽直交方向のパネル領域に対する 日陰判定の場合分け

パネルの中央と両端で $f(t)-R$ を計算

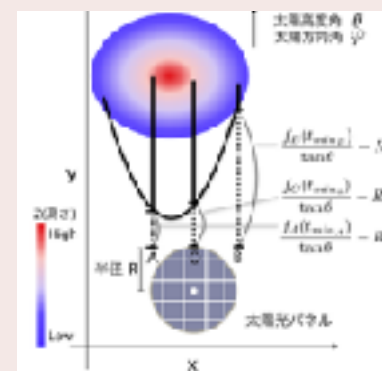


全て正
YES
NO
影領域

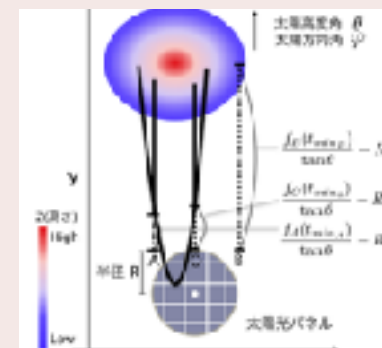
CASE1:
影のピークが
パネルの外にある



CASE2:
影のピークが
パネルの内にあり
パネルに届かない



CASE3:
影のピークが
パネルの内にあり
パネルに届く



パネル領域に対する日陰判定 (太陽直交方向)

最小の $f(t)$ - R と、その点から
微小距離ずらした
点Cの $f(t)$ - R とを比較

$$f_A(t_{min_A}) > f_C(t_{min_C})$$

YES

NO

日照領域
(CASE1)

C-O間の点Pからガウス分布の中心点
までの距離とガウス分布の最大の
影の長さを比較

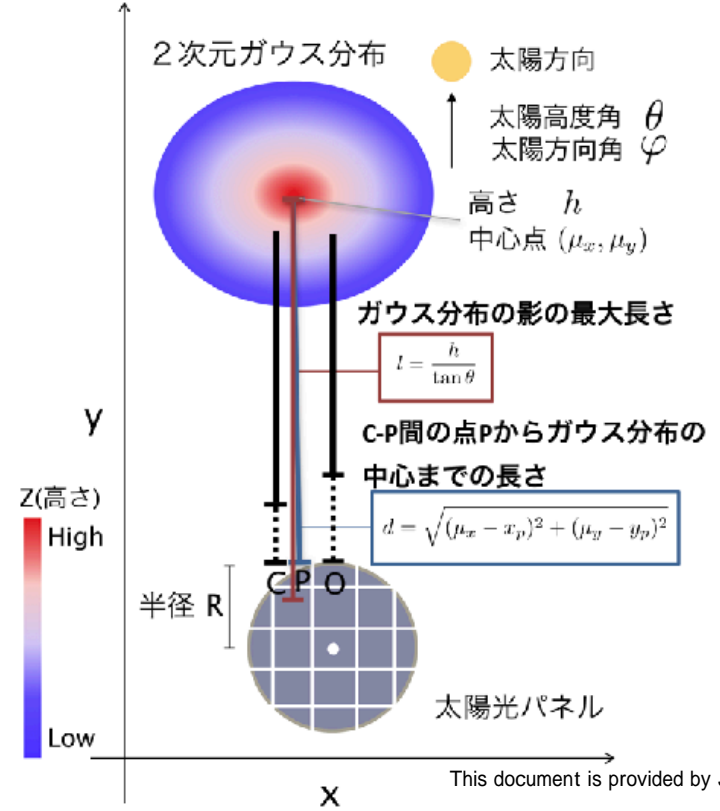
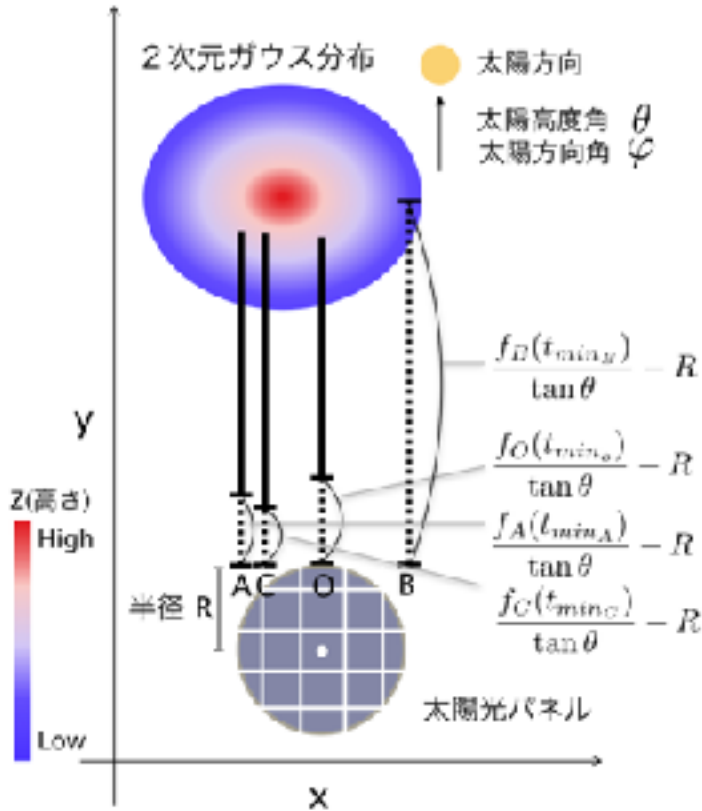
$$l > d$$

YES

NO

影領域(CASE3)

日照領域(CASE2)



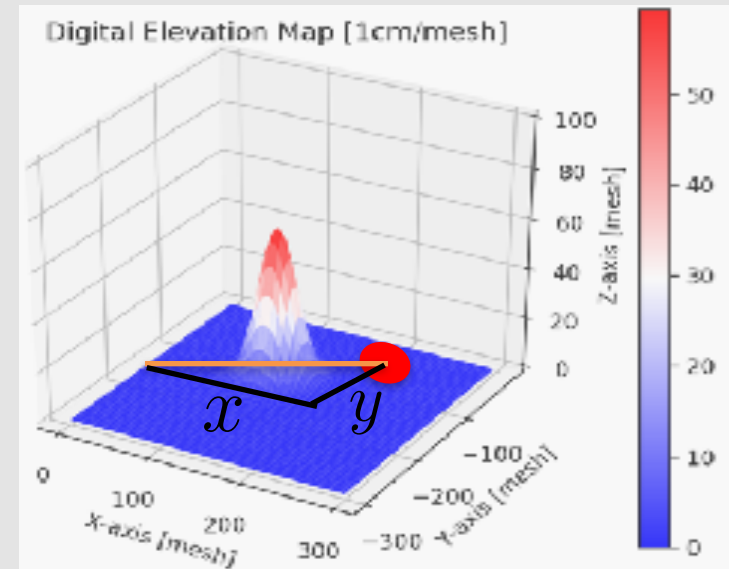
領域における日陰判定の計算速度評価

日陰判定の繰り返し計算の回数

- DEM+Ray Tracing法 $\frac{0.0314\sqrt{x^2 + y^2}}{s^3}$
- 5つのガウス分布の重ね合わせ+提案法 $5n$

0.0314 : パネルの面積[m²]
 $\sqrt{x^2 + y^2}$: 太陽方向のフィールド長[m]
 s : 分解能[m/mesh]
 n : 太陽方向上にある岩の数

	レイトレーシング	提案法
分解能 s	3乗のオーダで増加	依存しない
岩の数 n	依存しない	1乗のオーダで増加



OS : MacOS Sierra 10.12.6
 プロセッサ : 2.4 GHz Intel Core i7
 メモリ : 16 GB 1867 MHz LPDDR3
 プログラミング言語 : Python3.6.3

**本提案日陰判定は
従来法よりも高速**

3 * 3[m²]フィールドの1つの岩による日陰判定時間

	レイトレーシング(1cm/mesh)	提案法
計算点数	1.0*10 ⁽⁵⁾ 点	5
計算時間	2.0*10 ⁽⁻²⁾ [s]	5.0*10 ⁽⁻⁴⁾ [s]

研究の目的

- 各処理において精度， 計算速度面の向上
 - 単一画像による地形復元手法
 - 高速な再投影計算手法
- 火星探査ドローンのための高速・高精度な日照領域予測システムの構築

火星ドローン

その場の空撮画像
(高解像度)

単一画像
による復元

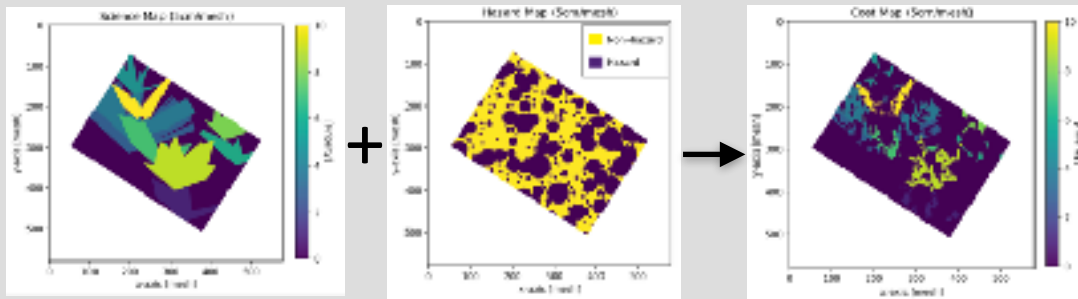
簡易的な
地形表現

高速な
再投影計算

日照領域

提案日照領域予測システム

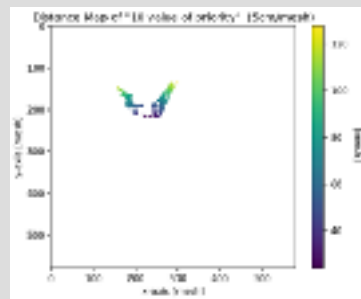
コストマップ作成



サイエンスマップ ハザードマップ コストマップ

↓ コストマップ

着陸候補地点選択・削除



距離マップ

選択：岩から最短距離の地点

削除：影判定地点の周囲2R

着陸候補地点

影領域

火星ドローン

その場の空撮画像
(高解像度)

情報抽出
ガウス分布近似

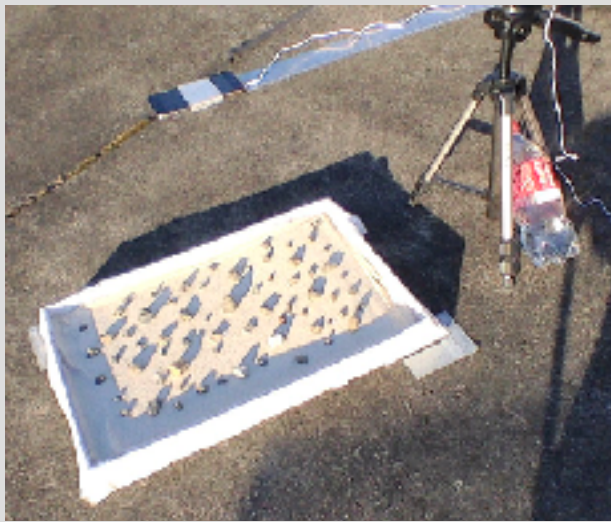
ガウス分布
パラメータ

領域日陰判定

日照領域

提案日照領域予測システムによる実画像実験

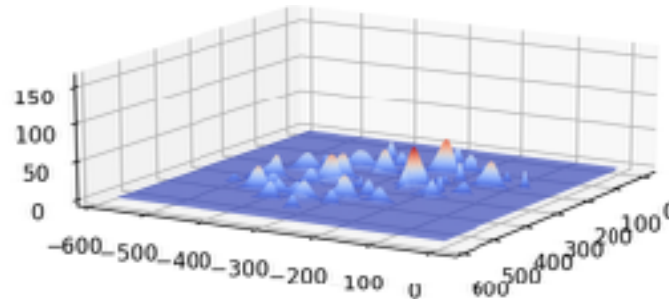
- 火星フィールドを模擬したジオラマを作成
- 太陽高度15度時の俯瞰画像と1日の影の変遷を撮影
- 実験環境
 - 宇宙科学研究所屋上
 - 岩密度 25%
 - 1/40スケール



実験風景



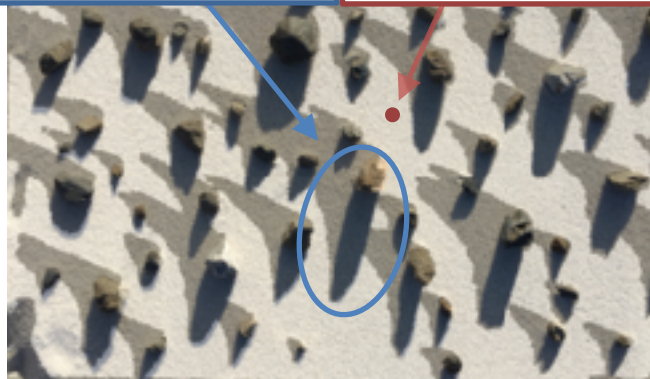
太陽高度15時の空撮画像



復元されたフィールド

観測したい大きい岩

決定された着陸地点



真の影を合成した画像

火星ドローン

その場の空撮画像
(高解像度)

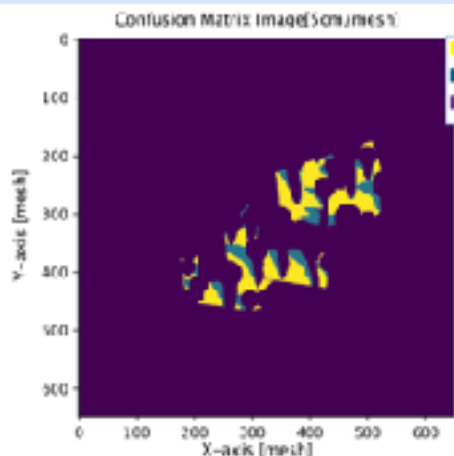
情報抽出
ガウス分布近似

ガウス分布
パラメータ

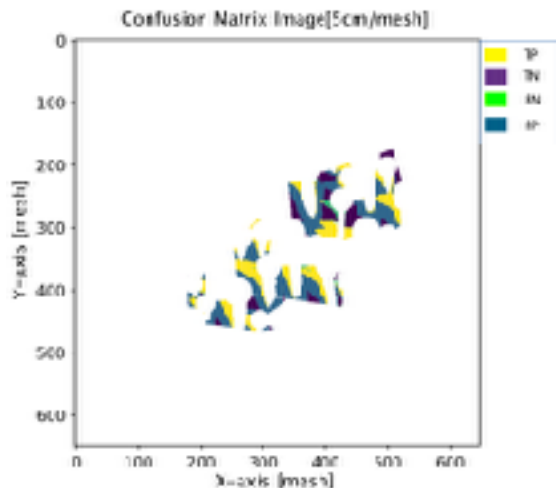
領域日陰判定

日照領域

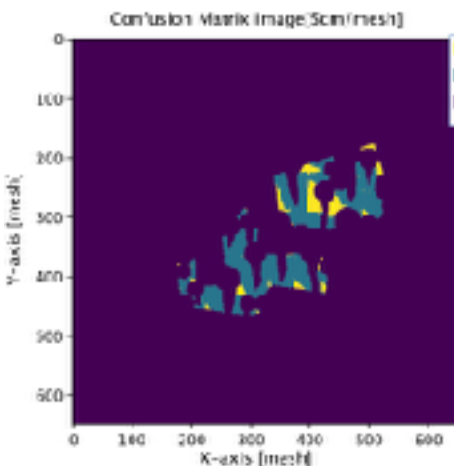
提案システムの性能評価



推定された日照領域



実際の結果と推定結果の比較



真の日照領域

	提案システム
安全度	93.68%
非冗長度	37.50%

計算時間

300ms
(15ms/rock)

100ms
(100us/judge)

400[ms]

火星ドローン

その場の空撮画像
(高解像度)

情報抽出
ガウス分布近似

ガウス分布
パラメータ

領域日陰判定

日照領域

火星ロボットコンピュータは地上パソコンの1/10の性能 → 4[s]ほどの計算時間

本提案システムによりリアルタイムで岩の多い領域において日照領域予測可能

まとめ

- **背景**
 - 火星探査ドローンでの岩の多い領域の探査
- **研究の目的**
 - 高精度・リアルタイム日照領域予測法の構築
- **提案システムの各処理**
 - 2次元ガウス分布関数の重ね合わせ復元
 - 曲面と直線の連立方程式による領域日陰判定
- **実験的検討**
 - 実画像での日照領域の予測をリアルタイムに処理
- **今後の展開**
 - より現実に即した環境に対するロバスト性能の向上（斜面，崖）

	従来法と比較した提案法
地形復元	着陸可能地点数が2倍増加 安全性能が1.5倍向上 計算速度が1/3低下
再投影	計算速度が約50倍向上
総合	計算速度が100倍向上 安全性能が1.5倍向上 着陸可能地点数が1.7倍増加