

独立行政法人

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1447

Shape from shading **による月平坦地の実時間検出**

五味 広美 ・ 佐々 修一 ・ 山口 功  
二宮 哲次郎 ・ 濱田 吉郎

2002年8月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

# 目次

概要	1
第1章 まえがき	1
1.1 月・惑星着陸の歴史	2
1.2 障害物回避方法	2
1.3 構成	2
第2章 Shape from shading の理論とその解法	3
2.1 理論	3
2.2 解法	4
(1) Tsai & Shah 法	5
(2) Pentland 法	5
第3章 Shape from shading の評価：Tsai & Shah 法と Pentland 法による形状復元	6
3.1 形状復元の精度	6
3.2 太陽高度の影響	7
3.3 日陰の影響	7
3.4 太陽高度の入力誤差の影響	7
3.5 反射係数の推定誤差の影響	8
3.6 計算時間	8
3.7 画像ノイズの影響	8
3.8 実画像への適用	8
(1) 月面画像の調査	8
(2) 選んだ月面画像	9
(3) 復元結果	9
第4章 Shape from shading の障害物回避への適用	10
4.1 システム構成要素案	10
(1) 水平な平坦地の検出	10
(2) ステレオ法の併用	10
(3) 着陸前の反射率特性測定	10
(4) Pentland 法の採用	10
(5) 画像を分割し評価	11
4.2 月表面の反射率特性	11
4.3 画像処理の信頼性	11
4.4 比較	13
(1) ステレオ法との比較	13
(2) 2次モーメント法との比較	14
第5章 まとめ	15
Appendix Hapke モデル	15
参考文献	17

# Shape from shading による月平坦地の実時間検出\*

五味 広美\*<sup>1</sup> 佐々 修一\*<sup>1</sup> 山口 功\*<sup>2</sup>  
二宮 哲次郎\*<sup>1</sup> 濱田 吉郎\*<sup>1</sup>

Real-time recognition of flat areas for lunar landing using the shape-from-shading technique. \*

Hiromi GOMI \*<sup>1</sup> Shuichi SASA \*<sup>1</sup> Isao YAMAGUCHI \*<sup>2</sup>  
Tetsujiro NINOMIYA \*<sup>1</sup> Yoshiro HAMADA \*<sup>1</sup>

## ABSTRACT

The shape-from-shading technique is surveyed for application to obstacle avoidance for lunar landing. Tsai and Shah's algorithm is accurate, but it is time-consuming and sensitive to its boundary condition. Pentland's algorithm is robust and fast; however, it produces artifacts in reconstruction. We propose a real-time scheme of extracting flat areas instead of obstacles with Pentland's method.

**Key Words:** image processing, shape from shading, obstacle avoidance, soft landing.

## 概 要

カメラ画像を使い月着陸時に障害物を回避する方法として、shape from shading の理論と解法について検討した。解法としては Tsai & Shah 法と Pentland 法を合成画像と実画像を使い評価した。処理の安定性と高速性の点から Pentland 法が優れているが、線型近似による形状復元精度の低下を再認した。実時間処理が可能なシステムとして、画像を分割してその領域の平坦度を Pentland 法により判定することにより、着陸可能な平坦地を抽出することを提案する。

## 第 1 章 まえがき

画像処理 / 計算機視覚により安全な着陸が可能かを判断することには 3 つのレベルの困難がある。

第 1 のレベルは原理的な困難であり、解決不可能である。ヒトの視覚では外界の 3 次元の空間的、光学的情報を眼の網膜上に結像し、その像を脳が処理している。視覚は第 2 覚と呼ばれる様に、視覚により世界を理解する為には外界と画像情報との間に物理的な関連付けが必要で、その為には視覚以外の手段により得られた情報、外界のモデルが必要である。仮定した外界モデルが破綻し

た場合は視覚は正しい情報を提供しない。正しいモデルを獲得する為に動物は種としても個体としても多大な犠牲を払いながら試行錯誤を繰り返している。

第 2 のレベルは科学技術の未発達による困難である。画像処理 / 計算機視覚の研究は半世紀近く続けられているが、画像処理 / 計算機視覚機能の基本的なアルゴリズムの多くが実用レベルに達していない。ヒトの視覚機能も、種々の錯視からも解かる様に、脳の情報処理は不完全であり破綻することもあるが、現在の画像処理 / 計算機視覚はヒトが進化と学習とによって獲得した視覚機能のレベルに達していない。

第 3 のレベルは技術を適用する分野の制約から生じる困難である。着陸船に搭載可能なカメラ、計算機は重量、容積の制限がある。地上で高速計算機を使ってやっと実現出来る視覚機能は、宇宙環境で現在使われている小型計算機では実現出来ない。この報告はこのレベルに属し、現在あるいは数年後に利用可能な画像処理 / 計算機視覚の月着陸時の障害物検出に関する調査・研究報告である。

\* 平成 14 年 4 月 8 日受付 (received : 8 April 2002)

\*<sup>1</sup> 飛行システム研究センター  
(Flight Systems Research Center)

\*<sup>2</sup> 構造材料研究センター  
(Structures and Materials Research Center)

### 1.1 月・惑星着陸の歴史

アメリカはApollo計画を成功させる為に、Ranger計画(1961~1965)、Surveyor計画(1966~1968)、Lunar Orbiter計画(1966~1968)を実施した。Ranger計画では、ビデオカメラを衛星に搭載し、月の画像をリアルタイムで地球に電送し、衝突直前の月面のクローズアップ画像を得た。Surveyor計画では軟着陸を試みたが、障害物検出・回避はしていないので、着陸成功は運によった。Apolloの有人月着陸では、人間が外界を見ながら障害物を選ける誘導制御をした。

アメリカの火星探査計画でもViking1号、2号(1号と同一システム)、Mars Pathfinderでは障害物検出・回避はしていない。SpaceDaily(2000/2/16)によれば2003年のローバ計画ではレーザー高度計を使った障害物回避システムの試験をするが、着陸誘導制御は行なわない。NASAのHome page [1][2]によれば、知的な(smart)ランダーの為に精密誘導、障害物検出、回避技術の開発を計画している。

2005年度打ち上げ予定の日本のSELENE(月周回衛星)計画は、月周回軌道から科学観測を1年間行なった後に最後の実験として着陸を試みる当初計画であったが、着陸船が転倒する可能性が5%程度あったので、着陸実験は行なわないことになった。視覚/画像情報により障害物回避をして転倒確率を限りなくゼロに近づける開発計画は現在の視覚/画像処理の技術レベルからは実現性が無い。また、障害物回避の為に障害物検出システムと着陸船を誘導する為に推進剤が必要になり、その分だけ月面に届けることが出来るペイロードが減少する。

### 1.2 障害物回避方法

事前に得られる着陸予定地点の画像情報は低解像度なので、着陸時に新たな障害物が検出される可能性がある。また、航法・誘導制御の誤差により着陸地点がずれる可能性もある。したがって、あらかじめ得られた着陸予定地点の情報と着陸時に得られた情報とのマッチングを取るmodel basedな方法を採用することは出来ず、3次元計測により着陸可能な地形を探す方法しかない。現在考えられる方法は電波またはレーザーを使った高度計、画像情報を使ったステレオ法、テクスチャー解析、shape from shading(陰影からの形状復元。以下、SFSと略)である。

電波またはレーザーを使った高度計は着陸船から着陸予定地点に電波またはレーザーを放射して、その往復時間から距離を求める方法である。電波またはレーザーを放射する為のアンテナまたは光学系、発信器、電源が必要になる。その為、質量と体積の点から不利であるが、夜間、太陽から遠い惑星探査にも使える長所がある。電波またはレーザーを着陸予定地点で走査して3次元計測を

するので、衛星搭載の小型のシステムでは計測に時間がかかり、解像度も低くなる。

画像情報を使った方法にはアクティブ・ステレオ方法(光を対象に当て、それをカメラで撮影する方法)、パッシブ・ステレオ法(2台のカメラを使う方法)、ダイナミック・ステレオ法(1台のカメラを移動させる方法)があるが、原理は三角測量である。アクティブ法は電波またはレーザー高度計と同じ特徴がある。一般的に着陸予定地点に向けて直線的に進入するので、ダイナミック法としては最も不利な条件になるので、着陸の障害物回避にダイナミック法は向かない。航技研はパッシブ法により着陸地点の高度地図を作り、障害物を回避する方法を第1候補として提案している。正確にはスタティック・パッシブ・ステレオ法であるが、今後は短くステレオ法と呼ぶ。

ステレオ法は対象面上の画像的な特徴を使い左右の画像間の対応を求め、三角測量の原理で距離を測定する。障害物の検出にステレオ法を使う場合、障害物までの距離に比べて障害物の大きさが小さいので正確な距離測定が必要になる。距離測定の精度を上げるためにはカメラ間の距離を大きくし、焦点距離の大きなレンズを使う必要があるが、カメラ間距離を大きくした場合、正確なアライメントの維持が難しくなり、焦点距離の長いレンズを使った場合、視野が狭くなる問題が発生する。軟着陸時の逆噴射による機体振動や排気ブルームによる画像の歪みが問題になる可能性も考えられる。

SFSは惑星探査や視覚(脳科学)の分野で70、80年代に研究され、照明条件が単純で対象物の表面反射率が既知で様な場合には形状復元が可能であることが示された[3][4]。これらの条件は地球では満たされることがあまり無いが、月・小惑星では表面がレゴリス(regolith:岩盤を覆っている固着していない岩くずの層)で覆われているので、SFSの適用が可能である場合が多い。

SFSがステレオ法に比べて有利な点は1台のカメラで良いことである。また、対象面の画像的な特徴が少なく、ステレオ法の適用が困難な場合、SFSにより面の傾きを求め、傾きを積分することにより面の高度を求めることが出来る。ヒトの視覚でもステレオ視とSFSとは相補的に機能していると考えられている。

テクスチャー解析としては2次元モーメント法が提案されている。画像を使った障害物回避は1998年の宇宙科学技術連合講演会でジオラマモデルを使った評価が報告されているが[5]、再確認する為にSFSに関して調査・検討を行なった。

### 1.3 構成

第2章ではSFSの理論に付いて述べ、その基礎方程式

を導出し、その解法を紹介する。第3章ではTsai & ShahとPentlandによるSFSの解法を合成画像と実画像に適用して、その特徴を確認する。第4章では画像情報を使った障害物回避を実現するシステム構成要素を提案し、月表面の反射率特性、画像処理の信頼性、他の方法（ステレオ法と2次モーメント法）との定量的な比較について考察する。第5章はまとめである。

## 第2章 Shape from shading の理論とその解法

### 2.1 理論

Figure 1. を見ると、ヒトの眼には球体が左上手前の光源に照らされている様に見える。この原理を解明したのがShape from shadingの理論である。' shading とその訳「陰影」は共に広い意味に一般的には使われるが、SFSの理論で扱うことができるのは光が当たった領域だけである。そこでは面の傾きにより面の明るさが変化する。物体により光が遮られて光が当たらない部分：日陰 (shadow) はSFSでは扱うことが出来ない。

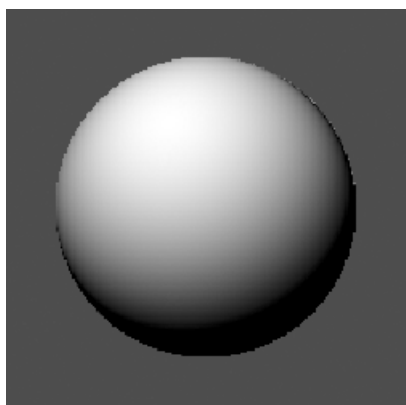


Figure 1. Sphere illuminated by a distant point light source at the left upper nearside of the image.

月着陸船から撮影した月面画像の明るさは、太陽の光度、太陽と月の距離、月面の反射率特性、月面と月着陸船間の距離、月着陸船カメラの光学特性によって決まる。とは時刻によらずほぼ一定で、は時刻により、は月着陸船の位置によって決まる。したがって、月面画像の明るさから の月面の反射率特性を推定することが出来る (Figure 2.)

反射率特性は入射角、観測角 (又は放射角)  $e$  の関数であるが、取り扱いが簡単なのは、反射率特性の係数である反射係数 (albedo) と面の傾きの関数の積で表わせる時である。多くの場合、さらに簡単なランバート面が仮定される。この時の画像の明るさ  $E$  は、反射係数を1とすれば、入射角 だけの関数となり、

$$E = \cos \quad (1)$$

観測角  $e$  (カメラの位置、姿勢) に依存しない。

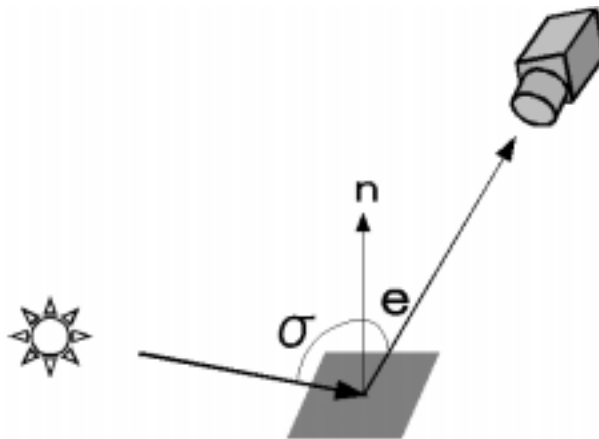


Figure 2. Simple model of image generation.

解析を容易にする為に、月面上の平均的な高さに  $x$  軸、 $y$  軸を、それらに垂直に  $z$  軸を取る (Figure 3.)。画像上の  $i-j$  座標と外界の  $x-y-z$  座標との幾何学的な対応関係は明確である。垂直下方にカメラを向けて月面を撮影した (観測角  $e = 0$ ) 場合、 $i$  軸を  $x$  軸に、 $j$  軸を  $y$  軸に平行に取ることが出来る。ランバート面を仮定した場合、画像の明るさは観測角  $e$  に依存しないので、観測角  $e$  で得られた画像を座標変換することにより観測角  $e = 0$  の画像を得ることが出来る。一般的な反射率特性で座標変換の式を含めてSFSの理論を考えると複雑になるので、以下の議論ではランバート面を仮定し、観測角  $e = 0$  として議論を進める。

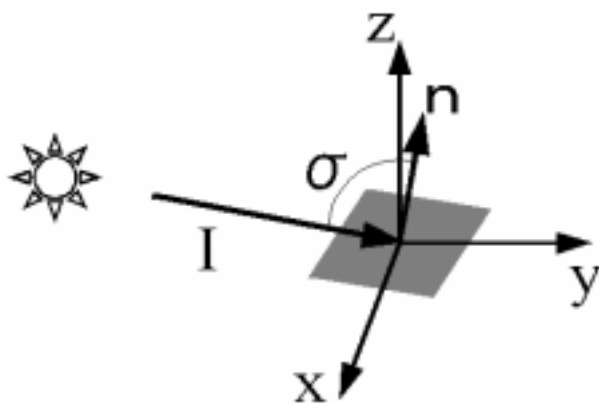


Figure 3. Coordinate system.

この座標軸に対して、入射光線方向  $\mathbf{I}$  とローカルな面の法線方向  $\mathbf{n}$  は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}\mathbf{I} &= (-p_s, -q_s, 1) \\ \mathbf{n} &= (-p, -q, 1)\end{aligned}$$

ただし、面高度を  $z$  とすると

$$p = \frac{z}{x} \quad (2a)$$

$$q = \frac{z}{y} \quad (2b)$$

となる。したがって、(1) 式は次の様になる。

$$E = \frac{1 + pp_s + qq_s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (3)$$

この式から面の傾きにより面の明るさがどのように変化するかを、 $p_s = 0.5$ 、 $q_s = 0.3$  の場合を Figure 4. に示す。

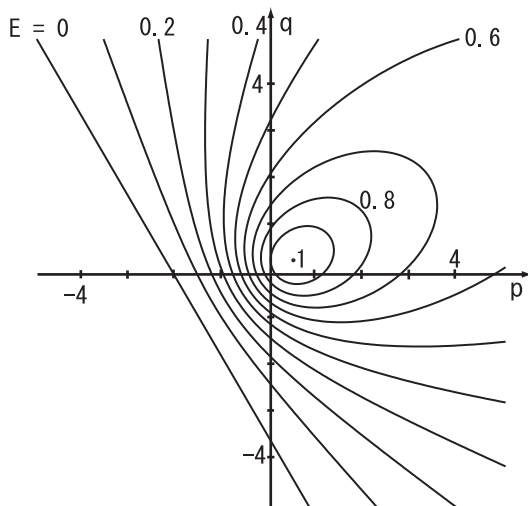


Figure 4. Reflectance map.

この図は反射率分布図と呼ばれ、同じ明るさに見える面の傾きを結んだ等明るさ線図である。入射光に垂直な ( $= 0$ ) 面が最も明るく、その位置は  $p$  軸と  $q$  軸の原点付近の点で、その時の  $E$  の値を 1 としている。面が入射光に平行な ( $= 90$  度) 時、面の明るさは 0 となり、その間を 0.1 間隔で等明るさ線を示してある。入射角が 90 度以上の場合には日陰になり (3) 式では計算出来ないが、面の明るさは 0 になる。

## 2.2 解法

反射率分布図から解かることは、入射光に垂直な面を除き、ある明るさに対応した面の傾き ( $p, q$ ) の組み合わせは無数にあるということである。このことから、面の傾きを決定するには SFS の基礎方程式 (1) または (3) の他にもう 1 つの  $p$  と  $q$  との関係式が必要になる。

Horn & Brooks (1989) は今までに発表された SFS の代表的な論文を著者名でアルファベット順に並べた本を出版し、Zhang et al. (1999 [6]) は今まで発表された論文を 4 つのカテゴリー：minimization、propagation、local、linear に分類している。

SFS の論文 / 解法は他の画像処理、例えば、動き検出アルゴリズムと同様に global 法と local 法の 2 つに分類する方が見通しが良い。Global 法は画像全体で、local 法は画像の部分だけで、形状復元を試みるアルゴリズムである。Global 法は画像全体の情報を使うので最適な形状復元が可能になるが、処理時間が長くなる。Local 法は画像の部分だけを使うので高速処理が可能である。ヒトの視覚でも local 処理が初期段階で行なわれ、local 処理結果の統合が後 / 高次処理として行なわれていると考えられている。

画像処理 / 視覚は 2 次元に圧縮された画像情報から 3 次元的な情報を復元するので、多くの画像処理は画像に含まれるノイズに敏感である。Global 法はノイズの点から有利である。SFS の基礎方程式 (1) または (3) の他の条件としては面がなめらかに連続的に変化すると制約をするのが一般的である。この 2 つの方程式を連立させて誤差を最小化 (minimization) して形状を復元するのが global 法である。

Local 法は、面を 2 次曲面で近似する (Pentland 1984 [7])、反射率特性を線型化する (Pentland 1988 [8]、1990 [9]) などの大胆な仮定を導入して、ローカルな画像情報から形状を復元する。

入射角  $= 0$  の点は画像上での明るさが最大になり、その最大の明るさを示す点は面の傾きが決まる。この点の傾きを制約条件として隣接する形状を制約 / 伝搬させるのが propagation 法である。しかし、形状復元の誤差も伝搬する。Propagation 法は global 法と local 法のどちらにも分類可能である。

Tsai と Shah は Zhang et al. (1999) の論文の共著者であるが、Zhang et al. (1999) の論文では Tsai & Shah (1994 [10]) の解法を Linear に分類している。Tsai & Shah (1994) の方法は以下に紹介する様に、傾きを差分化する意味では線型化しているが、これを linear に分類すると、全ての解法はデジタル計算機で処理をする為に差分化しているので linear に分類しなければならなくなる。Tsai & Shah (1994) 法は global 法ではないのかと Tsai に質問し

たが回答は得られていない。

この報告では、処理が簡単で理解し易く高速化が可能な Tsai & Shah (1994) 法と Pentland (1988, 1990) 法について検討を進める。

#### (1) Tsai & Shah 法[10]

面の高度を  $z_{ij}$  とすれば、 $p_{ij}$ 、 $q_{ij}$  は差分により、

$$\begin{aligned} p_{ij} &= z_{ij} - z_{i-1j} \\ q_{ij} &= z_{ij} - z_{ij-1} \end{aligned}$$

と表わせる。ここで  $z_{ij}$ 、 $p_{ij}$ 、 $q_{ij}$  は画像上の  $(i, j)$  画素に対応する面の高度、 $x$  軸方向と  $y$  軸方向の傾きである。また、画素の大きさに対応する実空間の大きさは

$$\begin{aligned} x_{ij} - x_{i-1j} &= 1 \\ y_{ij} - y_{ij-1} &= 1 \end{aligned}$$

とした。Tsai & Shah は (1) 式より、

$$0 = f(E_{ij}, z_{ij}, z_{i-1j}, z_{ij-1}) = E_{ij} + R(z_{ij} - z_{i-1j}, z_{ij} - z_{ij-1})$$

なる方程式を考え、逐次計算により既に  $z_{i-1j}$ 、 $z_{ij-1}$  が求まっているものとし、上式を  $z_{ij}$  の方程式とみなした。Newton 法により

$$0 = f(z_{ij}) = f(z_{ij}^{n-1}) + (z_{ij} - z_{ij}^{n-1}) \frac{df(z_{ij}^{n-1})}{dz_{ij}}$$

を導き、さらに

$$z_{ij}^n = z_{ij}^{n-1} - \frac{f(z_{ij}^{n-1})}{df(z_{ij}^{n-1})/dz_{ij}}$$

の更新則を導いた。ここで  $n$  は繰り返し計算の回数を示す。なお、 $df(z_{ij}^{n-1})/dz_{ij}$  は解析的に

$$\begin{aligned} \frac{df(z_{ij}^{n-1})}{dz_{ij}} &= - \frac{p_s + q_s}{(1 + p_s^2 + q_s^2)^{1/2} (1 + p_{ij}^2 + q_{ij}^2)^{1/2}} \\ &+ \frac{(p + q)(1 + p_s p_{ij} + q_s q_{ij})}{(1 + p_s^2 + q_s^2)^{1/2} (1 + p_{ij}^2 + q_{ij}^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

と陽に求めることが出来る。ただし、 $df(z_{ij}^{n-1})/dz_{ij} = 0$  付近では更新則が不安定になり、繰り返し計算が発散することがあるので、工夫が必要である。

#### (2) Pentland 法[8][9]

反射率特性を線型近似する方法は 1988 年の国際会議 [8] と 1990 年の IJCV [9] とに発表されているが、前者の方が解かり易い。

入射光線が  $x$  軸と成す角 (方位角) を  $\theta_0$  とすると、

$$\begin{aligned} p_s &= -\cos \theta_0 \tan \alpha \\ q_s &= -\sin \theta_0 \tan \alpha \end{aligned}$$

となるので、(3) 式は

$$E = \frac{\cos \theta_0 - p \cos \theta_0 \sin \alpha - q \sin \theta_0 \sin \alpha}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}$$

となる。さらに、面の傾きが小さい ( $p, q \ll 1$ ) 時、

$$E = \cos \theta_0 - p \cos \theta_0 \sin \alpha - q \sin \theta_0 \sin \alpha$$

と近似することが出来る。

水平面に対する方位角を  $\theta_0$ 、入射角を  $\alpha$  とし、 $(p, q) = (0, 0)$  でテーラー展開すると

$$E = \cos \theta_0 - p \cos \theta_0 \sin \alpha - q \sin \theta_0 \sin \alpha \quad (4)$$

入射角  $\alpha$  が 90 度に近づくにつれて、反射率分布図上の等明るさ線が平行な直線に近づくことから解かる様に、線型近似の範囲が広がる / 精度が上がる。

基礎方程式を線型化した為、入射光方向の斜面の高度は正確に求まるが、それに垂直な斜面の高度は復元されない。このことは  $x$ - $y$  面を  $z$  軸の廻りに回転し、入射方向を  $x$  軸に並行 ( $\theta_0 = 0$ ) とすると、

$$E = \cos \theta_0 - p \sin \theta_0$$

となり、画像の明るさは  $y$  軸方向の傾き  $q$  の影響を受けなくなることからも解かる。

しかし、自然の地形は方位角に対して等方的なので、正確な形状復元は出来ないが、障害物回避に必要な精度での形状復元は可能と思われる。

Pentland はさらに線型化した方程式の解法として FFT を利用することにより安定な解法と高速処理を実現した。

(4) 式に (2) 式を代入すると、

$$E = \cos \theta_0 - \cos \theta_0 \sin \theta_0 \frac{z}{x} - \sin \theta_0 \sin \theta_0 \frac{z}{y} \quad (4')$$

となり、画像の明るさは水平面の明るさに面の傾きによ



る明るさの変化を加えたものであることが解かる。面の傾きが等方的に分布しているとする、平均的な明るさは水平面の明るさになる。画像から平均的な明るさを引いた画像  $E \cdot \cos \theta_0$  をフーリエ変換すると

$$F_{E \cdot \cos \theta_0} = -2 \sqrt{-1} (\cos \theta_0 \sin \theta_0 u + \sin \theta_0 \sin \theta_0 v) F_z$$

したがって、

$$F_z = \frac{-F_{E \cdot \cos \theta_0}}{2 \sqrt{-1} (\cos \theta_0 \sin \theta_0 u + \sin \theta_0 \sin \theta_0 v)} \quad (5)$$

なので、画像  $E \cdot \cos \theta_0$  をフーリエ変換したものを  $2 \sqrt{-1} (\cos \theta_0 \sin \theta_0 u + \sin \theta_0 \sin \theta_0 v)$  で割ったものをフーリエ逆変換することより、形状が復元される。

画像の2次元フーリエ変換、フーリエ逆変換は数学ライブラリーに登録されているルーチンを使えば、Pentland法の中心部分のコーディングは数行で済んでしまう。ただし、 $2 \sqrt{-1} (\cos \theta_0 \sin \theta_0 u + \sin \theta_0 \sin \theta_0 v)$  が0の場合の対策等が必要になる。

フーリエ変換、逆変換での特異点問題を回避する為に、画像の平均的な明るさを0とするので、画像の平均的な明るさを水平とした形状が復元される。撮影された画像全体が一定方向に傾いている場合、その平均的な傾きが解からない。しかし、ある程度の広さの領域を撮影した場合、撮影された面の平均の傾きは水平であるとするのは不自然では無い。

### 第3章 Shape from shading の評価：

#### Tsai & Shah 法と Pentland 法による形状復元

画像処理のアルゴリズムを評価する為には計算機で合成されたノイズの無い、または、ノイズの特性が解かっている画像データを使った評価から始める必要がある。3次元地形モデルを作り、光源の位置を決め、ランバート面を仮定し、直交投影により合成画像を計算した。

入射光に垂直な面や日陰の部分では、いずれのアルゴリズムでもその前提が崩れるので、形状復元は出来ない。したがって、入射角  $\theta$  が  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  の範囲になる様に対象面の形状を制限するのが良い。水平面に対する入射角  $\theta$  ( $= 90^\circ - \text{太陽高度}$ ) が  $45^\circ$  であれば対象面の傾斜が  $\pm 45^\circ$  まで太陽光に垂直な面も日陰も出来ないので、アルゴリズムの立場からは理想的である。数値シミュレーションの多くは水平面に対する入射角が  $45^\circ$  付近で行なった。

数値シミュレーションの結果は基本的にはSFSの理論から予想されることであった。使用した解法は Tsai & Shah 法 (1994) と Pentland 法 (1988, 1990) である。

#### 3.1 形状復元の精度

画像ノイズが無い場合、Tsai & Shah 法では、繰り返し計算の回数を増やすことにより精度は向上した。計算機による画像生成と形状復元は同じランバート面を仮定している、画像生成と形状復元のアルゴリズムが正しいのであれば、計算機内部での数値の有効桁数の精度で形状が復元されなければならない。クレーターモデル (Figure 5.) を使い、Tsai & Shah 法による形状復元で300回の繰り返し計算をした場合、最大の復元誤差は  $10^{-7}$  以下になった (Figure 6.)。実際の画像にはノイズがあり、8ビット程度で量子化されるので、これ程の精度は出ない。

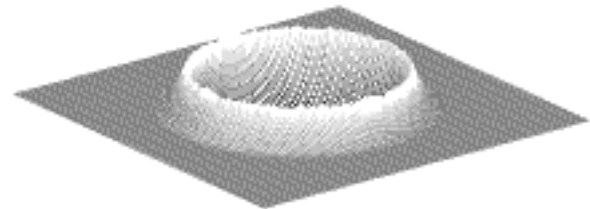


Figure 5. Crater model.

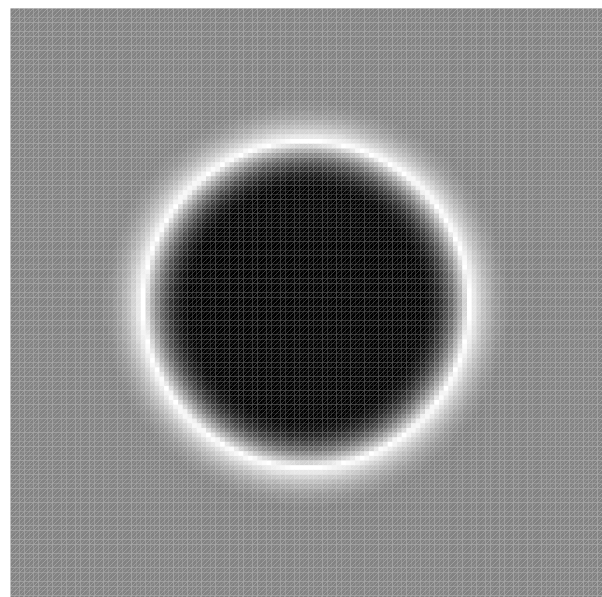


Figure 6. Crater reconstruction by the Tsai & Shah method.

Pentland法ではSFSの基礎方程式を線型化した為に形状復元精度が、Figure 7. に示す様に、入射光に対する方位角により異なる。入射光方向には勾配が無く、それに直交する方向の勾配だけの場合、水平の地形が復元された。この時の形状復元の誤差はいくらでも大きくすることが可能である。



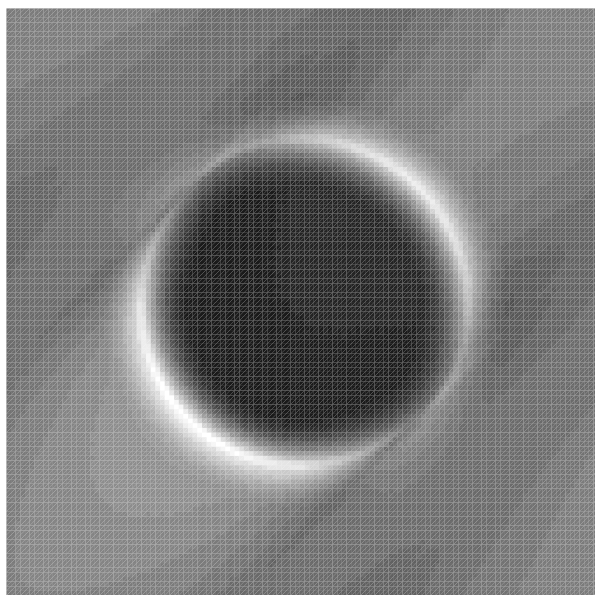


Figure 7. Crater reconstruction by the Pentland method.

勾配が方位角に対して等法的に分布している場合、形状復元誤差は形状モデルに依存すると考えられるが、次式で表わせる、

$$z = \exp \left( - \left( \frac{x - 16}{4} \right)^2 - \left( \frac{y - 16}{4} \right)^2 \right)$$

単純な正規分布形状の山モデル (Figure 8.) の場合、山の高さが3割程度低めに形状が復元された (Figure 9.)

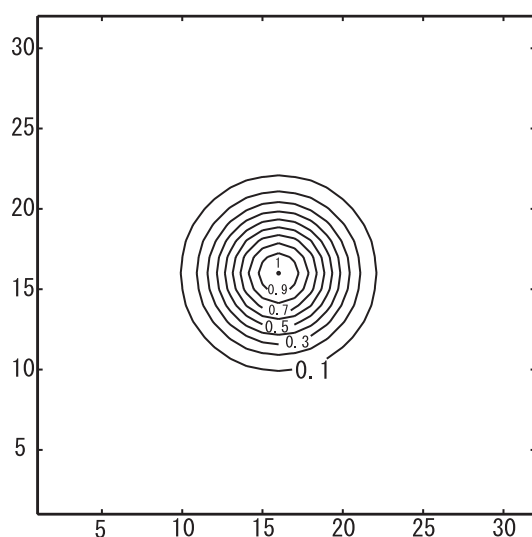


Figure 8. Mountain model.

### 3.2 太陽高度の影響

3.1 から明らかな様に、画像ノイズが無ければ太陽高度の影響は無い。実際には画像ノイズがあるので、太陽高度が低い方が面の傾きの変化による明るさの変化が大き

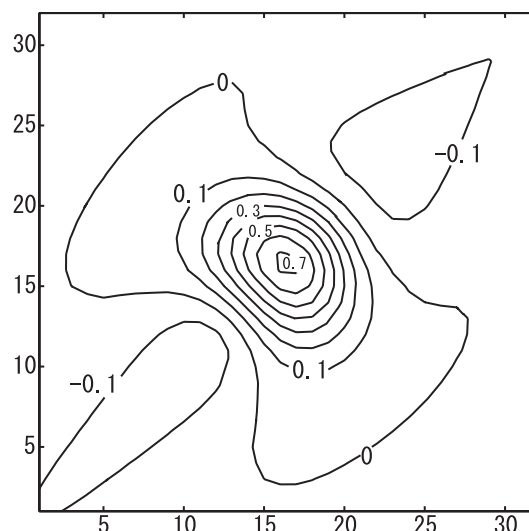


Figure 9. Mountain reconstruction by the Pentland method.

いので、太陽高度が低い方がSFSによる形状復元は正確になる。ただし、日陰が生じ易くなる。

### 3.3 日陰の影響

着陸の時刻は月面での活動時間を長く取る為に着陸地点の早朝が選ばれと予想される。太陽高度が低くなると日陰が問題になる。日陰の部分は他の部分に比べて暗いので、原理的に形状復元出来ない部分を取り除くことは可能である。日陰の部分との境界を見い出して、境界条件を満足する様にSFSの基礎方程式を解くのが厳密ではある。簡便な方法としては日陰が存在する画像に対してSFSのアルゴリズムを適用する方法が考えられる。

厳密に日陰のある画像を作るにはray tracing法によらなければならないが、(3)式による計算で画像の明るさが負になる部分の明るさを0とする画像を作成した。山モデルで山の高さを10とすると40画素の明るさが0となったが、この場合、厳密な計算をすれば日陰の部分は多少長くなり、日陰の画素数が1~2割増える程度と予想される。Pentland法により復元された山の高さは真の値の3割程度に低くなった (Figure 10.)。日陰の無い場合のPentland法の復元結果との比較では、山の高さが半分程度になるが、山の形状にはそれ程の変化は見られない。

4.1(5)で提案する画像を分割する方法を採用し、日陰の無い/少ない領域から着陸地点を選べば、日陰の問題を避けることが出来る。

### 3.4 太陽高度の入力誤差の影響

Tsai & Shah法では、復元された面に対する太陽光の入射角は、太陽高度の入力値により変わらなかった。ランパート面を仮定した場合、面の明るさは入射角のみによ

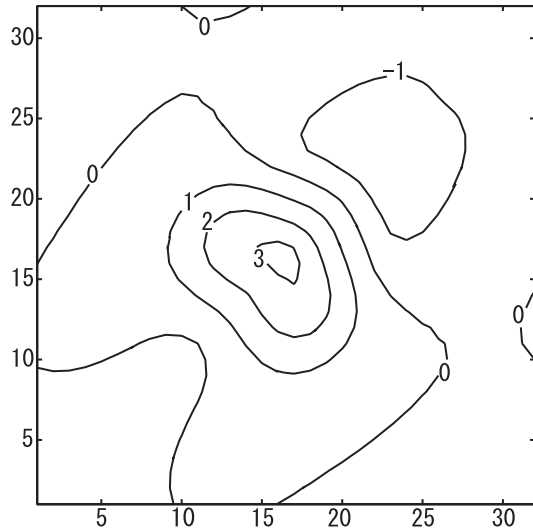


Figure 10. Effect of shadows on reconstruction by the Pentland method.

り決まるので、入射角を基準とした面の傾斜が復元されるからである。すなわち太陽高度の入力誤差に応じて面の傾きの誤差が生じる。Pentland 法ではあまり影響を受けない。

### 3.5 反射係数の推定誤差の影響

画像の明るさが与えられた時、SFS の基礎方程式から推測される様に、反射係数は面の傾き（高度）と逆比例関係にあった。

### 3.6 計算時間

128 × 128 画素の画像を Pentium - 600 MHz (SPEC-int95=24)、メモリー 256 MB のパソコンで処理した場合の所要時間は、

- Tsai & Shah 法 : 5 秒 (繰り返し計算 200 回)
- Pentland 法 : 0.04 秒

となった。

### 3.7 画像ノイズの影響

計算機で合成した画像に対して明るさが正規分布するノイズを付加し形状復元をした場合の高度誤差を調べた。この数値シミュレーションでは、Tsai & Shah 法では正規分布の形状をした山モデルに対して合成した画像にノイズを加えた。Pentland 法は精度が悪いので、復元誤差が無い水平面の画像にノイズを加えた。

Figure 11. の横軸は 8 ビットで AD 変換した場合の AD 変換の分解能を単位 (ADU) としている。1 ADU は AD 変換の量子化ノイズである。画像ノイズとしては、個々の CCD 画素の出力には 1% 程度 (2 ~ 3 ADU) のノイズがあり、CCD 画素間の感度のばらつきやカメラレンズの

周辺減光などが考えられる[11]。SFS のアルゴリズムの立場からは反射率特性のモデルからのずれもノイズであり、これが最も大きなノイズ源と考えられる。

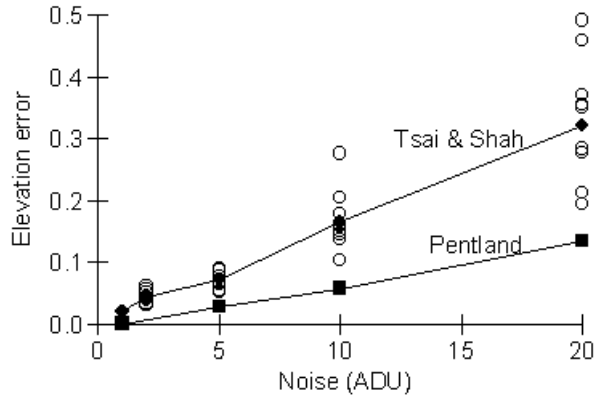


Figure 11. Effect of image noise on elevation.

ノイズによる高度誤差を予測すると、次のようになる。

- 1/3 インチ CCD (画素サイズ 7.4 μm)
- レンズ焦点距離 : 10 mm

のカメラを使用した場合、高度 2 km の時、画素分解能は 1.5 m となる。画像ノイズの標準偏差を 10 ADU とすると、画像ノイズによる高度誤差は Figure 11. より Pentland 法では 0.07 (傾斜で 4 度) となる。

$$0.07 \times 1.5 \text{ m} = 0.1 \text{ m}$$

なので、2 km の高度から 0.1 m の高度変化を検出することが可能と推定される。

### 3.8 実画像への適用

#### (1) 月面画像の調査

今までは合成画像に対して SFS による形状復元を試み、SFS の理論から予想される復元能力と限界を確認した。次のステップとして、SFS を実画像に適用した場合の問題点を洗い出す為に、月着陸時の障害物回避アルゴリズムの評価に使える月面画像を探した。

月面画像が満たすべき条件は次の 2 つである。

着陸船の転倒に影響を与える大きさの起伏、岩等が写っている。

入射角 = 45 度、観測角  $e = 0$  度付近が良い。

の条件を満足できる画像 (解像度 0.1 m 程度) はアポロ月着陸船が月に着陸、月から離陸する時に撮影した画像に限られる。アポロ月着陸船内部から撮影した 16 mm 記録フィルム (DAC movie filems) の仕様は次の通りである[12][13]。

- フレームレイト : 1, 6, 12, 24 フレーム / 秒
- レンズ焦点距離 : 5, 10, 18, 75mm

- ・アポロの各ミッションごとに1巻に編集されている。

NASAのNSSDC[14]の担当者とのメールのやり取りでは、初めは、購入可能とのことであったが、途中から連絡が取れなくなった。NASDAにNASA Liaisonを通して記録フィルムの入手を依頼したが、受け入れられなかった。

高解像度の月面画像が入手出来なかったので、月の地形がフラクタルな構造をしていると仮定して、入手可能な解像度の画像を使うことにした。NASAレポートとして出版されているLunar Orbiterの写真集では入射角が60度以上と大きく、日陰を伴っていた。写真の繋ぎ目等が画像処理の障害になる。

の入射角45度は日陰が出来にくい条件であり、観測角0度は着陸船が最終段階で垂直降下して月面に着陸することに対応するものである。ランバート面の近似が成立するのであれば、観測角はそれ程重要ではない。月面は比較的なだらかなので入射角が大きな条件で撮影しなければ、明暗のあまりない、ぼやけた感じの画像になる。一般に月面の写真は大きな入射角の時に撮影されるので、Lunar Orbiter [15]やClementine[16]の画像(解像度100 m オーダー)の中に適当なものは少ない。

## (2) 選んだ月面画像

地球上からの月面画像であれば、解像度は1 kmのオーダーになるが、入手性は高くなる。インターネット上で公開されている地球上から撮影された月面画像の中から、観測角が0度(地球に向けた月面の中央部分)付近で、入射角が45度になる月齢11.1日、18.4日付近のものを探した。インターネット上の画像は圧縮がかかっていたので画像処理に適さないが、その中から比較的圧縮率の低い国立天文台が公開している画像[17]を使って、SFSによる形状復元を試みた。その後、撮影者から非圧縮の画像を直接入手して再度処理をした。

復元対象の地形としては、ヒトの眼で見て光学的に均

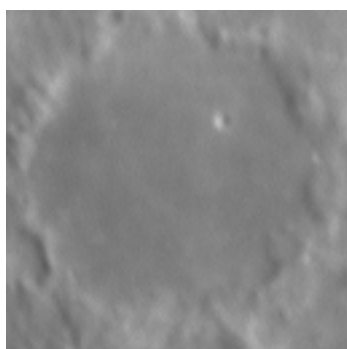


Figure 12. Ptolemaeus crater (128 × 128 picture elements).  
By courtesy of H. Fukushima[17]).

一なレゴリスで覆われていそうなPtolemaeusクレーター(中心:南緯9.2度、西経1.8度)を選んだ。写真からPtolemaeusクレーター128 × 128画素(Figure 12.)を切り出して、SFSにより形状復元を試みた。Ptolemaeusの直径は153 km、深さ2.4 kmである[18]。1画素の大きさは約1.4 kmである。

入射角、観測角に影響するものとしては次のものが考えられる。

- ・クレーターの位置(緯度で9.2度、経度で1.8度のずれ)
- ・地形の広がり(緯度経度とも $\pm 2.5$ 度)
- ・光学秤動(緯度秤動 $\pm 7$ 度、経度秤動 $\pm 8$ 度)
- ・月齢11.1日からのずれ:約4度
- ・自転軸傾き:約7度
- ・月の軌道面と地球の軌道面の交差角:5度
- ・写真上の方位(入射光の方位角):9度

入射角、観測角を厳密に求めることは可能であるが、入射角、観測角に対する影響は10度程度なので、簡単の為、画像に対する入射角を45度、(ランバート面を仮定しているので観測角の影響は無い)、方位角を0度とした。

## (3) 復元結果

Tsai & Shah法では繰り返し回数を多くすると異常な形状に収束した。繰り返し回数を10回に制限した場合(Tsai & Shah [10]は数回で充分と主張している) Tsai & Shah法では平原にあるAmmoniusクレーターは窪みとして形状が復元されたが、Pentland法ではFigure 13.に示す様にクレーター平原の東(右)が高くなり、西(左)が低くなる形状が復元された。また、Pentland法による復元形状深さはTsai & Shah法による復元形状深さの1/2 ~ 1/4程度になった。

計算機で合成された画像に対してはTsai & Shah法とPentland法とでほぼ等しい形状の高さが復元されている。実画像ではカメラ感度特性を含めた月面反射率特性が解らないので、適当な値を仮定することにより、それらしい地形を復元することが出来る。

Pentland法による形状復元結果(Figure 13.)はあまり正確ではない様に見えるが、以下のことを復元結果から読み取ることが出来る。

- ・平原は比較的平らで、縁は比較的険しい。
- ・平原内の小クレーターの存在が見られる。
- ・東西の縁に比べ南北の縁の復元が悪い。
- ・平原に対する縁の高さは最大0.8程度である。

解像度が1.4 kmなので縁の高さは1.1 kmとなるが、Ptolemaeusの縁の高さは2.4 kmである。反射係数を0.5程度にすることによりほぼ正確な形状(高さ)が復元されるようになる。

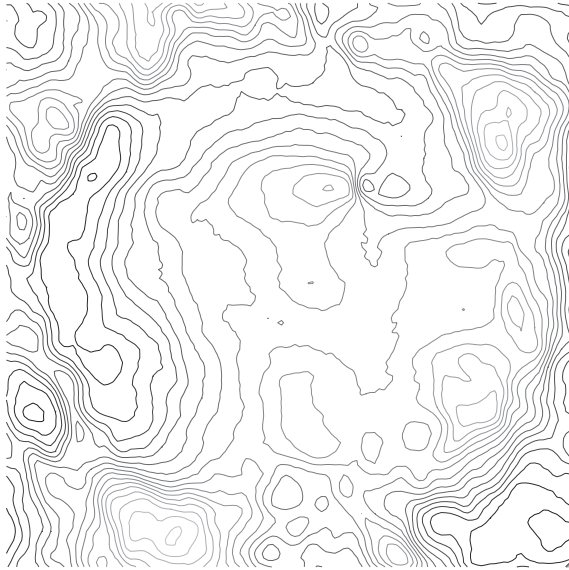


Figure 13. Reconstruction by the Pentland method.

## 第4章 Shape from shading の 障害物回避への適用

### 4.1 システム構成要素案

第3章で行なった shape from shading の評価から、月着陸時に実時間で安全な着陸候補地点を検出するシステムを構成する主要要素として、次の5つを提案する。(具体的なシステム構成例は文献[32]を参照)

- (1) 水平な平坦地の検出
- (2) ステレオ法の併用
- (3) 着陸前の反射率特性測定
- (4) Pentland 法の採用
- (5) 画像を分割し評価

#### (1) 水平な平坦地の検出

SFS は形状を復元するアルゴリズムであるが、正確な形状復元は難しく、処理時間がかかる。月面着陸のミッションを成功させる為には、水平な平坦地を探し出すことが出来れば充分である。水平な平坦地の検出と目的を限定することにより、以下に述べる方法を併用した SFS は月平坦地の実時間抽出する現時点で最善のシステム構成案である。

#### (2) ステレオ法の併用

SFS を使って月着陸時に水平な平坦地を探す(形状を復元する)為には、月面の反射率特性が均一でなければならない。すなわち、月面を覆っているレゴリスの大きさと光学的特性が均一でなければならない。レゴリスの粒度が比較的均一として、粒度と解像度がどの程度まで SFS が有効かを調べることは価値があることかもしれない

い。

既に得られている月面の画像からも 100 m 以上の障害物は事前に知ることが出来るので、数十 m 以下の障害物、特に岩がある場合が問題である。数十 m から 1 m 位までの岩が密にあり、着陸可能な最小限の平坦地しか無い様な地形には SFS は有効には働かない。このような地形画像は画像的な特徴がありステレオ法が有効になるので、ステレオ法を併用するのが安全である。

#### (3) 着陸前の反射率特性測定

基礎方程式が1つに対して面の勾配には2方向(未知数が2つ)あるので、さらに反射率特性も未知数として解くことは事実上不可能である。また、Pentland 法では反射率特性は処理対象の画像領域で一定でなければならない。

現在得られている月面の反射率特性は km 程度の分解能である。また、反射率特性は面の勾配と光学的特性の関数であるが、反射率特性を求める前提として、地形は水平と仮定しているため、地形の影響が含まれている。反射率特性の値は月の明るい所と暗い所で3倍程度異なるので、月周回軌道上で着陸予定地点のカメラ特性を含めた反射率特性を測定することは有効である。周回軌道上での測定では、画面全体に含まれる地形は平均としてはほぼ水平と見なすことが出来、異なる時刻と軌道上からの測定により入射角、観測角の異なる反射率特性を求めることが出来る。3.7 のカメラシステムで高度 100 km の月周回軌道から直下の着陸予定地点を撮影した場合、解像度は 75 m となるので、月周回軌道上からの反射率特性の測定だけで充分と考えられるが、降下軌道上からの測定も可能である。

#### (4) Pentland 法の採用

解法としては安定性と高速性の点から現時点では Pentland 法が適している。月の場合、着陸可能な水平な平坦地が多いと考えられるので、SFS の適用は可能と考えられる。

月周回軌道上で得られる画像の解像度が 100 m 程度あるので、この画像に対して SFS を適用し水平で平坦な地点を抽出し、着陸予定地点を決めることが可能である。しかし、この作業は地球上に画像を伝送して、ヒトの目で判断するのが確実である。

降下開始する地点から着陸予定地点は見えないと予想されるが、見え始めれば、かなり斜めから撮影した着陸予定地点の画像からも地形形状の復元は可能である。解像度以下の大きさの岩が存在した場合、形状復元は正確ではなくなるが、高度が低下するに連れて解像度が上がるので、その時点で SFS による形状復元を行なうことにより、岩を避けることが出来る。岩または急な起伏の光学的特性が周囲のレゴリスと同じであっても、日陰を伴

う場合、日陰情報を使って障害物を排除することも可能である。

#### (5) 画像を分割し評価

Pentland 法は境界条件が不要なので、分割した領域ごとに水平度と平坦度を評価することが出来る。画像分割の仕方は固定し、最終的な判断をする低高度での着陸予定地点の画像を分割した領域が着陸可能な広さになる様にすれば良い。また、形状復元の過程で、地形をフーリエ変換した係数が得られるので、その値で平坦度を評価することが出来る。この2つを併用することにより、着陸可能な平坦地を高速にみつけ出すことが可能になる。この方法でFigure 12. のPtolemaeus 画像を16分割した領域(32 × 32 画素)の平坦度を評価した結果を Table 1. に示す。

Table 1. Regional roughness of Ptolemaeus  
(Standard deviation of relative elevations).

$s_{im}$	1	2	3	4
1	0.14	0.09	0.09	0.17
2	0.19	0.02	0.11	0.18
3	0.13	0.04	0.04	0.19
4	0.09	0.11	0.13	0.11

クレーターの縁 (Table 1. の周囲の12領域) に較べて平原 (Table 1. の中心の4領域) は平坦度が良いことが解かる。 $D_{23}$  には深さ 1.9 km の Ammonius クレーターがあるが、反射係数を1とした場合の深さは0.33 ~ 0.67である。解像度が1.4 km なので、深さは0.46 ~ 0.94 km となる。

反射率を0.5とした時、標準偏差は倍になり、解像度をかけ $D_{22}$ の標準偏差を地形に換算すると60 m (傾斜で2.5度)になる。約40万 km 離れた所から百 m 位 (距離の百万分の一以下) の起伏を検出することが出来る。月着陸船には天体望遠鏡を積むことは出来ないが、SFSの理論により解像度と検出可能な起伏の比は変わらないので、カメラ解像度の1/10以下の起伏を検出することは可能と考えられる。

Pentland 法では、形状復元する過程で形状をフーリエ変換した係数(式5))が得られる。このフーリエ係数は空間周波数に対する地形の振幅(高さ)を表わすものなので、これにより平坦度を判定することが出来る。最も

平らな $D_{22}$ と障害物の小クレーターが存在する $D_{23}$ の係数の小数点以下を切り捨てたものを Table 2. に示す。表の原点は左上にあり、原点に近い方が空間周波数が低い成分の係数である。空間周波数が高い係数は0が多い。物理的に地形の空間周波数の高い成分は地形高度に与える影響が少ないので、地形の平坦度は原点付近の係数だけで判定することが出来る。このことにより領域の平坦度の判定が高速に出来る。

#### 4.2 月表面の反射率特性

Shape from shading では一般的に反射率特性としてはランバート面が仮定されるが、月が平面的な円盤に見えることから解かる様に月面の反射率特性は

$$E = \frac{\cos \theta}{\cos e}$$

に近いことが知られている。垂直降下しながら着陸する場合は $e = 0$ 度なので、結果的にランバート面を仮定した場合と同じになる。

さらに詳細な反射率特性モデルがHapkeにより提案されている[19][20][21]。Hapke モデルを Appendix に紹介するが、レゴリスの反射率特性が入射角、観測角、位相角等によりどの様に变化するのかを理解する上では有用である。

反射率特性は入射光エネルギーに対する反射光エネルギーの比として定義されるが、測定を容易にする為にレゴリスの代わりに拡散反射板からの反射光を基準にしたり、月面上のある点を基準にしたりするので、公表されている反射率特性は大きく異なる場合がある[22][23]。さらに、カメラ画像から形状復元する場合、対象の輝度とデジタル画像の明るさを対応付けるカメラ特性が必要になる。

しかし、SFSの問題を平坦地の検出と単純化した場合、着陸時の水平面に対する入射角、観測角、位相角に対する反射率特性の値と水平面から傾いた場合の反射率の値の変化が重要になる。すなわち、ある入射角、観測角、位相角でテラー展開した/線型近似した反射率特性が解ければ充分である。あるいは、ある入射角、観測角、位相角の反射率特性にフィティングしたランバートモデルでも充分である。

#### 4.3 画像処理の信頼性

SELENE計画で画像情報により障害物を回避する方法の検討が始められたのは、月着陸地点のでこぼこにより着陸船が転倒する確率が5%程度有るので、これを少なくする為であった。障害物検出・回避システムは、例え



Table 2. Regional Fourier coefficients of Ptolemaeus.

$D_{22}$ : the relative flat domain.

0	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	7	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$D_{23}$ : the domain with a crater.

0	59	7	2	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	29	8	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	10	7	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ば 1000 kg の月着陸船の場合、成功確率を  $(95+t)\%$  とする ( $t$  % 上げる) のに使うことが出来るシステムと推進剤質量は  $10 \times t$  kg 以下とすることが出来れば、月面に送ることが出来る質量の期待値が増加するので経済的である。 $t < 5$  なので、システムは 50 kg 以下が望ましい。

転倒確率を 1% 未満にするのに必要な障害物検出の信頼性を計算することは可能である[24]。しかし、画像処理による障害物検出の信頼性は画像(写っている対象)

に応じて変化するので、画像処理の信頼性を求めるのは難しく[25][26]、事実上不可能である。

着陸予定地点の全ての障害物が写った高解像度の画像を事前に入手出来ないので、着陸地点の障害物を含めたモデルを考えなければならない。着陸地点は航法・誘導制御の誤差によりずれることも考慮すると、着陸予定地点のモデルはいくつかのケースとケースごとの出現確率を予想しなければならない。着陸予定地点のモデルは地

形モデルと反射率特性モデルの2つからなる。SFSの解法として唯一利用可能なPentland法では入射光線方向によって復元の信頼性が異なるので障害物配列の向きの影響も考慮しなければならない。現在まで入手された高解像(0.1 m位)の月面画像情報は限られているので、それ程多数の形状モデルは考えられないが、それでもそれらに対して解法の信頼性を求める手間は予想が出来ない。また、仮定するモデルの影響が大きいため、信頼性の数値は大きく変化するものと予想される。

#### 4.4 比較

##### (1) ステレオ法との比較

ステレオ法による距離分解能  $d$  は、対象が2台のカメラの正面にある場合は次式で計算することが出来る。

$$d = \frac{2d^2}{bf} s$$

ただし、 $d$  は対象までの距離、 $b$  はカメラ間距離、 $f$  はカメラレンズの焦点距離、 $s$  は解像度 (CCDの画素サイズ) である。3.7のカメラを2 m 離して配置した場合、対象までの距離に対する距離分解能を Table 3. に示す。

ステレオ法では高度30 m以下にならないと、障害物を充分検出することが出来ない。想定したカメラの視野角は約20度なので、高度30 mでは10 m × 10 m程度に視野が狭くなり、その中に着陸可能地点が無い可能性もある。サブ画素補間により1/10画素の誤差で対応点問題を解くのはかなり難しいが[27]、サブ画素補間により1/10画素の視差検出が可能になれば、高度100 mから障害物の検出が可能になる。しかし、それでも視野は30 m × 30 m程度にしかならない。焦点距離を50 mmとすると視野角は4度になり、カメラ光軸を平行にした場合、高度30 mで左右の画像の重なりはほとんどなくなり、距離測定が不可能になる。

1画素の分解能を確保する為には左右カメラ光軸のずれを0.7 m rad (1 mの距離での0.7 mm) にしなければならない。1/10画素の分解能にするには1 mの距離で0.1 mm以下の変位しか許されない。この位になると、衛星

の姿勢を3軸制御した場合、太陽光による熱変形が問題になるかもしれない。ステレオ高度計を地球上で組み立て後、打ち上げ、軌道変換、軌道離脱、動力降下時のロケットエンジンによる振動に対して、光軸の平行度を確保しなければならない。月周回軌道上からのカメラを月面に向けて充分遠い対象を撮影すれば、左右の光軸が平行であれば左右の画像は同じになる。左右の画像のずれが無くなる様にアフィン変換によりソフト的に光軸調整をすることが可能であるが、最後の動力降下時の振動に対して、光軸の平行度を確保しなければならない。

ステレオ法の適用範囲がせいぜい100 m程度なのでカメラの向きを変える要求は出て来ないと思われるが、左右カメラ光軸の平行度を維持しながらカメラの向きを変えることはさらに困難である。カメラ光軸を着陸船に対して固定し、着陸船の姿勢を変えてカメラの向きを変える方法が考えられる。SFSの場合、カメラの向きは着陸船の姿勢精度程度で良いが、質量と信頼性の点からカメラの向きは機体に固定される可能性が高い。

ロケットエンジンからの排気ガスはほぼ透明で輝度妨害はなさそうだが、排気ガスの密度により光路が曲げられる可能性は残されている。光路が曲げられることによる画像の歪みはステレオ法の距離測定に大きな影響を与えるが、SFSでは復元される地形が歪む程度なので影響は少ない。光路が曲げられる影響を見積もる方法も考えられるが、簡単な方法は、ステレオ法による障害物計測の時、ロケットエンジンを停止することである。

ステレオ法により距離を測り、3次元形状を求め、障害物を求める方法の困難は、対応点探索に失敗し距離測定が出来ない場所の取り扱いである。特に、月面の様に画像的な特徴が無い対象ではかなりの割合で正しい距離測定が出来ないことが予想される。距離測定の信頼性を画像上の個々の場所で評価することが必要になる。信頼性の低い場所の距離データは使わないことにすると、その場所は安全と評価したことになり、信頼性の低い距離データを使うと、安全に着陸可能な領域が存在しない可能性がある。

したがって、距離分解能、視野、障害物判定の視点からステレオ法を主たる手段として障害物回避を行なうこ

Table 3. Distance resolution of a stereo method ( $b = 2$  m,  $f = 0.01$  m, 1 p.e. =  $7.4 \times 10^{-6}$  m).

	Distance	1000 m	100 m	30 m	10m
Distance resolution	Image resolution 1 p.e.	740 m	7.4 m	0.7 m	0.07 m
	Image resolution 1/10 p.e.	74 m	0.7 m	0.07m	0.001 m



とは難しい。

## (2) 2次モーメント法との比較

平坦地を検出するだけであれば、画像の明るさの分散が小さい所を探し出せば充分であり、この方法の1つとして西口らが2次モーメント法を提案している[28][33][34]。物理的解釈の明確さで、西口らの方法に較べてPentland法が優れている。

2次モーメント方法の有効性は、合成画像に対する2次モーメントの評価値と合成画像の元になった地形の水平で平坦な部分とが対応したシミュレーションが根拠であるが、2次モーメントの評価値と水平、平坦との関係は定性的な説明で終わっている。この節ではSFSの理論から西口らの2次モーメント法(以下では、単に2次モーメント法と呼ぶ)を物理的に解釈し、新しい方法を提案する。

### 傾きと高さ

2次モーメント法でも面の傾きにより面の明るさが変化し、画像全体の明るさの平均値/中央値が水平面に対応する明るさであると説明している。この点ではSFSと同様である。しかし、2次モーメント法では、面の傾きと傾きを積分して得られる高さ(面の高度)とを区別していない。また、面の傾きが水平面からずれた時、面の明るさの変化を定量的に検討していない。

### 平坦度と水平度

画像上のある小領域(局所と呼ぶ)の2次モーメント $V_{lm}$ は次式で定義される。

$$V_{lm} = \frac{1}{|D_{lm}|} \sum_{ij \in D_{lm}} (E_{ij} - \mu)^2 \\ = s_{lm}^2 + (\mu_{lm} - \mu)^2$$

ここで、 $|D_{lm}|$ は小領域( $l, m$ )に含まれる画素数、 $E_{ij}$ は画素の明るさ、 $s_{lm}^2$ は小領域の明るさの分散、 $\mu_{lm}$ は小領域の明るさの平均、 $\mu$ は画像全体の平均の明るさを表わす。局所2次モーメントは局所分散と、局所平均と画像全体の平均の差の2乗の和となる。画像の明るさの局所分散は小領域内のでこぼこ(平坦度)を、画像の明るさの局所平均と画像全体の平均との差の2乗は小領域の水平からのずれ(水平度)を表わすと解釈することにより、地形が着陸に適するかの判断の尺度とすることが出来るとしている。西口らは小領域として $15 \times 15$ 画素の大きさを採用したが、その根拠は示していない。

しかし、厳密には局所分散は小領域内の傾きの分散であり、局所平均と画像全体の明るさの差は小領域と画像全体の傾きの差である。すなわち、局所分散は画素単位の傾きに、局所平均は小領域単位(西口らのシミュレーションでは15画素単位)の傾きに関連している。2つの

空間周波数での傾き、あるいは1画素または15画素で積分した傾き、すなわち高さである。2次モーメント法で地形が着陸に適しているかどうかを判断出来る為には、着陸船の大きさは1画素より大きく、15画素より小さくしなければならない。しかし、2つの空間周波数だけで地形が着陸に適しているかを判断するのは危険である。

平均的明るさと平均的な傾き

ランバート面を仮定した場合、面の明るさ $E_{ij}$ は(1)式で与えられる。西口らは、

$$\mu_{lm} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{n}_{lm} / |\mathbf{I}| |\mathbf{n}_{lm}| = \cos \theta_{lm} \\ \mathbf{n}_{lm} = \frac{1}{|D_{lm}|} \sum_{ij \in D_{lm}} \mathbf{n}_{ij}$$

と置いているが、これらの2つの式で定義された $\mathbf{n}_{lm}$ は両立しない。両立する為にはPentlandが仮定した様に傾きと明るさの間に線型性がなければならない。

安全な着陸が可能かの判定基準

西口らは

- i) 着陸可能な領域内にあるか。
- ii) 障害領域までの距離は規定値以上か。

の2段階で着陸目標地点を選んでいく。i)は上に説明した2次モーメント $V_{lm}$ によって行なっているが、画像情報から2次モーメント $V_{lm}$ がi)の条件を満足しても地形的には障害領域になる場所が、彼らのシミュレーションではかなり見られる。また、着陸目標地点付近の孤立した障害領域が安全領域と判定されているのは大変危険である。

西口らの方法では、i)では排除出来ない障害領域を、ii)で排除している。このことは彼らの文献[28]の第8図で横軸上に小領域があることから解かる。横軸上の小領域は、障害領域までの距離があると2次モーメント法で推定された(安全)領域で、障害領域までの実際の距離が0である(危険)領域である。すなわち、ii)は安全性を高める為に必要な規則である。

SFSからの説明

西口らの文献[28]の第5図から読み取った太陽入射角に対する $\mu$ (画像全体の明るさの中央値/平均値、ほぼ水平面の明るさ)と閾値 $\sqrt{V_{TH}}$ の値をTable 4.に示す。

$\mu / \cos \theta$ がほぼ一定なことから、ランバート面を仮定したことが確認出来る。また、 $\mu \pm \sqrt{V_{TH}}$ に対応した水平面からの許容出来る傾斜が約 $\pm 10$ 度になっていることが解かる。

簡易アルゴリズムの提案

局所2次モーメントではなく局所2次モーメントの平方根または局所1次モーメント(明るさの平均値からのずれの絶対値)の方が面の傾き/高さに関連付けら

Table 4. Explanation of the second-order-moment method by shape-from-shading.

Incident angle $\sigma$ (deg)	25	45	65	75
Mean brightness $\mu$	217	166	95	58
Threshold $\sqrt{V_{TH}}$	19.3	29.3	34.5	32.8
$\mu / \cos \sigma$	240	235	225	224
Allowable slant(deg)	-9 / +16	-9 / +10	-9 / +10	-9 / +9

れる。さらに、次の様な簡易なアルゴリズムが考えられる。

- i) 小領域は許容出来る最大の障害物の大きさとする。
- ii) 画像の中から明るさ  $\mu \pm \mu$  を満足する小領域（安全候補）を選ぶ。
- iii) 画像を着陸可能な広さの中領域に分割し、その中に含まれる安全小領域の数が最大のものを着陸予定地点とする。
- iv) 全ての小領域が安全な中領域が存在した場合は、8近傍中領域を含む領域に中領域を広げて、iii)の処理を行なう。

西口らの水平度と平坦度は曖昧なので、どちらか一方があれば良さそうである。その代わりに、小領域の大きさを許容出来る最大の障害物の大きさ程度とし、水平な面の明るさを持つ領域を選び出す。

西口らの報告では、SUN SPARC5 (SPECint95=1.3) を使って  $128 \times 128$  画素の画像を処理するのに、「安全候補領域の中から障害物（領域）までの距離が最大の領域を探す」処理に 0.31 秒かかっているの、iii) と iv) とのアルゴリズムで置き換える。

## 第5章 まとめ

この報告では、まえがきにした第1のレベルに関してはほとんど何もしていない。

第2のレベルに関しては、画像情報を使い月着陸時に障害物を避ける方法として、shape from shading について合成画像と実画像を使い再評価を行ない、以下のことを再認した。

- ・表面の反射率特性が一樣であれば、合成画像と実画像に対して形状復元が可能である。
- ・線型近似をしたPentland法では地形復元に歪みが見られるが、高速でロバストな復元が可能である。

第3のレベルの成果として、月着陸時に実時間で障害物を回避する次の要素からなるSFSシステムを提案する。

- ・水平な平坦地の検出
- ・ステレオ法の併用
- ・着陸前の反射率特性測定

- ・Pentland法の採用
- ・画像を分割し評価

残されたことは画像処理システムの信頼を求めることである。これは適用範囲を月面に限定した第3の課題としても難しく、本質的に視覚/画像処理が持つ第1のレベルの課題である。

## Appendix Hapke モデル

月着陸時に画像を使った障害物回避の研究で、月表面の反射率特性を表わすものとしてHapkeモデルがしばしば出てくるので、調査をした。

### A1. 粒子による光散乱

天文では惑星表面・大気または星間物質の観測、化学では成分濃度測定、工業炉では放射熱伝達、原子炉では中性子・線の遮蔽の問題などがあり、散乱の理論は対象とする問題に応じてそれぞれ独立に発達してきた[29]。

粒子の形状が球であり、粒子とその周囲媒質がそれぞれ光学的に等方的で、球に光の平面波が入射する場合の解析が、Clebsh、Lorenz、Debye、Rayleigh、Mieらにより行なわれた。解析では、球の中心を原点とする極座標を採用し、変数分離を行ない、Maxwellの式に対する無限級数の一般解を求める。入射平面波、散乱波、内部波が境界条件を満足する様に無限級数の係数を決定する。この解析は多くの場合、Mie理論と呼ばれることが多いが、理論に誰の名前を付けるのかは難しい問題である[30]。

粒子形状の球からのずれ、粒子径の分布、光学的特性の非一樣性、光の多重散乱などの影響を考慮すると、Maxwellの式を解くことは出来ないので、測定結果を表わす実験式/半理論モデルが提案されている。Hapkeモデルは月・惑星表面の反射率特性を表わす1つの半理論モデルである。

### A2. 参考文献

Hapke自身が1993年に書いたtext[19]が詳しいが、400頁以上もある。また、表題が“Theory of .....”となつて

いることから推測出来るが、具体的な反射率特性の数値に関する検討が行なわれていない。

亀井&中村[21]は2000年の日本リモートセンシング学会誌に Hapke モデルの解説を書いているが、「小惑星の光散乱特性」の表題に忠実に月の反射率特性に関しては省略している。

月の反射率特性を表す Hapke モデルのパラメータは亀井らが神戸大学太陽系物理学研究室 Home page [20] で整理し公開しているが、将来、削除される可能性がある。

以下の Hapke モデルの説明は主としてこれらの3つに依っているが、個々には出典を明示しない。

A3. Hapke モデル

反射率特性は面への入射光エネルギーに対するその面からの放射光エネルギーの比として定義される。測光学的には、光の平行度と観測系の視野角により、入射光と放射光のエネルギーの測定値はそれぞれ directional、conical、hemispherical の3種類考えられている。‘directional-conical reflectance’の様に反射率特性の前に2つの形容詞を付ける。初めの形容詞は入射光に対して、2番目の形容詞は観測系に対するものである。2つの形容詞が同じ場合、‘bi-directional’、その訳の「双方向性」または「二方向性」の様に表現するが、混乱の原因になり易い。

入射角  $\mu$ 、観測角(放射角)  $e$ 、位相角(入射光と観測光軸の成す角)  $\alpha$  の時、Hapke モデルは ‘directional-directional reflectance’ を次式で与える。

$$r(\mu, e, \alpha) = \frac{\omega}{4} \frac{\cos \mu}{\cos \mu + \cos e} \{ [1 + B(\mu)] p(\alpha) + H(\cos \mu) H(\cos e) - 1 \} S(\mu, e, \alpha)$$

ただし、

$\omega$  : 単散乱の反射係数

$B$  : opposition surge 効果または hot spot 効果の補正

$p$  : 単散乱の位相函数

$H$  : 多重散乱の補正

$S$  : 巨視的荒さ

である。すなわち、Hapke モデルは反射面を構成する粒子による単散乱を基本とし、多重散乱等の各種の補正を行ない反射率特性を与える実験式である。

$\cos \mu / (\cos \mu + \cos e)$  は Lommel-Seeliger の散乱則と呼ばれ、入射光が反射される時、面を構成する粒子層に光がある程度の深さまで侵入して、粒子により単散乱されるとして、光が粒子層内で減衰することを考えたモデルである。

$B$  は入射角と観測角が共に小さい場所の表面が明るく見える(表面の反射率が大きくなる)効果を補正するものであり、Hapke モデルでは次式で与えている。

$$B(\mu) = \frac{B_0}{1 + h \tan^2 \mu}$$

$p$  は単散乱の場合の位相角に対する反射光強度変化を表すもので、種々の位相函数が提案されているが、Heney-Greensteinの位相函数の実験式は次式で与えられる。

$$p(\alpha) = \frac{1 - g^2}{(1 + 2g \cos \alpha + g^2)^{3/2}}$$

$H$  は多重散乱の効果を表すのもので、例えば、次式で与えられる。

$$H(x) = \frac{1 + 2x}{1 + 2x \sqrt{1 - x}}$$

$S$  は画像からは知ることの出来ないカメラ解像度以下

Table 5. Hapke parameters of the moon [20][31].

	Single scattering albedo $\omega$	Opposition surge		Asymmetry parameter $\xi$	Macroscopic roughness $\bar{\theta}$
		width $h$	amplitude $B_0$		
Disk-integrated	0.21	0.07	2.01	-0.10	20.0 deg
Dark terrains	0.12	0.12	1.16	-0.14	8.1 deg
Average terrains	0.25	0.06	1.84	-0.11	20.6 deg
Bright terrains	0.33	0.05	1.83	-0.09	24.0 deg

から粒子径以上の面の傾きの影響を表わすものである。この大きさの面の平均的な傾きを  $\theta$  として傾きの影響のモデルが考えられている。サブミリメートルの  $\lambda$  が大きな影響を与えると報告がある。スムーズな面では  $S = 1$  である。

月の測光観測データにHapkeモデルを適用することにより求めた  $B_0$ 、 $h$ 、 $\theta$  の値を Table 5. に示す。

### 参考文献

- [1] <http://mars.jpl.nasa.gov/>
- [2] [http://www.planetary.or.jp/Hot\\_Topics/topics-001108\\_1.html](http://www.planetary.or.jp/Hot_Topics/topics-001108_1.html)
- [3] Horn, B. K. P.; Robot vision, MIT Press (1986). または、NTT HI 研究所P RVT 訳、ロボットビジョン、朝倉書店 (1993)。
- [4] Horn, B. K. P. and Brooks, M. J.(eds.); Shape from shading, MIT Press (1989).
- [5] 木下貴博、齊藤浩明、足立忠司; ジオラマモデルによる地形認識手法の評価、第42回宇宙科学技術連合講演会講演集 661-666 (1998)。
- [6] Zhang, R., Tsai P.-S., Cryer, J. E. and Shah, M.; Shape from shading: A survey, IEEE Trans. PAMI 21, 690-706 (1999).
- [7] Pentland, A. P.; Local shading analysis, IEEE Trans. PAMI 6, 170-187 (1984).
- [8] Pentland, A. P.; Shape information from shading: A theory about human perception, Proc. 2nd int. conf. comp. vision, Dec. 5th-8th, 1988, Tampa, Florida, 404-413 (1988).
- [9] Pentland, A. P.; Linear shape from shading, Int. J. Comp. Vision 4, 153-162 (1990).
- [10] Tsai, P.-S. and Shah, M.; Shape from shading using linear approximation, Image and Vision Computing 12, 487-498, (1994).
- [11] 五味広美; 視覚センサーとしてのビデオカメラ(その2) 航空宇宙技術研究所報告 TR-1231 (1994)。
- [12] Kuehnel, H. A.; Apollo experience report - Photographic equipment and operations during manned space-flight programs, NASA TN D-6972 (1972).
- [13] <http://home.pacificer.com/garyn/>
- [14] [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo\\_25th.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_25th.html)
- [15] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/lunarorb.html>
- [16] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/clementine1.html>
- [17] <http://www.nao.ac.jp/pio/SolSys/Moon/>
- [18] A. ルークル著、山田 卓 訳; 月面ウォッチング、地人書館 (1997)。
- [19] Hapke, B.; Theory of reflectance and emittance spectroscopy, Cambridge Univ. Press (1993).
- [20] [http://komadori.planet.kobe-u.ac.jp/kamei/Global\\_Mapping/](http://komadori.planet.kobe-u.ac.jp/kamei/Global_Mapping/)
- [21] 亀井秋秀、中村良介; 小惑星の光散乱特性 - 模擬室内実験から表面の組成と物理状態を探る -、日本リモートセンシング学会誌 20、73-85 (2000)。
- [22] <http://rimrpost.rimr.akita-u.ac.jp/ksaiiki/luna.html>
- [23] <http://www.nrl.navy.mil/clementine/albedo.html>
- [24] 佐々修一、二宮哲次郎、濱田吉郎、藤原健、片山保宏、松本甲太郎; 月面軟着陸における障害物検出に関する検討、第45回宇宙科学技術連合講演会講演集 985-990 (2001)。
- [25] Christensen, H. I. and Förstner, W.; Performance characteristics of vision algorithms, Machine Vision and Applications 9, 215-218 (1997).
- [26] Jain, R. C. and Binford, T. O.; DIALOGUE Ignorance, Myopia, and naivete in computer vision systems, CVGIP: Image understanding 53, 112-117 (1991).
- [27] 五味広美; テンプレート・マッチング法による実時間動き検出、航空宇宙技術研究所報告 TR-1358 (1998)。
- [28] 西口憲一、吉河章二、木下貴博; 月面軟着陸のための障害物検出方式、日本航空宇宙学会論文集 48、55-60 (2000)。
- [29] 五味広美; 回折法による粒子径と数濃度測定に対する光多重散乱の補正、航空宇宙技術研究所報告 TR-960 (1988)。
- [30] Kerker, M.; The scattering of light, Academic Press, New York (1969).
- [31] Helfenstein, P. and Veverka, J.; Photometric properties of lunar terrains derived from Hapke's equation, ICARUS 72, 342-357 (1987).
- [32] 五味広美、佐々修一、山口 功、山本浩通、二宮哲次郎、濱田吉郎; 陰影画像からの平坦地検出方法、特許出願番号 2002-76802 (2002)。
- [33] 西口憲一; 画像を用いた月惑星軟着陸のための障害物検出と回避、計測自動制御学会論文集38、395-403 (2002)。
- [34] 西口憲一、吉河章二; 月面軟着陸における画像からの障害物検出法のジオラマによる検証、計測自動制御学会論文集 38、404-410 (2002)。

---

## 独立行政法人航空宇宙技術研究所報告 1447 号

平成 14 年 8 月発行

発行所 独立行政法人 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町 7・44・1  
電話 (0422) 40・3935 〒182・8522  
印刷所 株式会社 実業公報社  
東京都千代田区九段北 1・7・8

---

© 2002 独立行政法人 航空宇宙技術研究所

本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、情報技術課資料係にご連絡下さい。  
本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

