分離カメラ画像の陰影による IKAROS の膜面形状推定^{*1}Shape Estimation of Membrane of IKAROS by Shape from Shading
Method of Images Taken with Separation Camera知 識 柔 一^{*2}・森 治^{*3}・澤 田 弘 崇^{*3}・白 澤 洋 次^{*3}
Yoshikazu CHISHIKI, Osamu MORI, Hirotaka SAWADA and Yoji SHIRASAWA

Key Words: IKAROS, Shape from Shading, Separation Camera

Abstract: IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun) is the world's first solar sail demonstration spacecraft. It was launched in May 2010 and has 14-m-square solar sail. Solar sail is a propulsion system which accelerates the spacecraft with the solar radiation pressure, and its performance is largely affected by its unevenness. In order to recover a shape of the sail in the space, pictures of IKAROS taken in the space with cameras separated from the main body are used because of its structural complexity. There are two types of image analysis method and in this paper shape from shading method, in which the brightness of pixels is focused on, is adopted. Since there are some causes of image degradation and they are difficult to model, some cases are verified to know the detail characteristics. This paper presents the approach for analyzing the pictures to obtain the shape of IKAROS sail, and compares the result with the one of another image analysis method and flight data of the attitude motion.

記 号 の 説 明

E : ピクセルの輝度
 R : 反射光量 ($= R_d + R_s + R_n$)
 k : 反射係数
 $\mathbf{n}$: 法線ベクトル
 $\mathbf{s}$: 光源方向ベクトル
 $\mathbf{c}$: 視線 (カメラ) 方向ベクトル
 $\mathbf{h}$: 光源方向と視線方向を二等分する方向ベクトル
 $\mathbf{N}$: 法線ベクトルの集合
 $\mathbf{I}$: 慣性モーメント
 ω : 機体固定座標系での角速度
 $\tilde{\omega}$: スピンフリー座標系での角速度
 $\mathbf{T}$: 外乱トルク

1. は じ め に

ソーラーセイルは薄く広い膜に太陽輻射圧を受けることにより推力を得る宇宙機である。2010 年 5 月に打ち上げられた世界初のソーラー電力セイル IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun) は、対角線の長さが約 20 m の正方形の膜を持ち、ソーラーセイルによる加速実証や航行技術の獲得などを行った。また、2010 年 6 月には本体から分離したカメラによる膜面全体の撮像に成功した (第 1 図)。これらの画像からは膜面上

の様々なしわが観察できる他、膜面全体が凸にたわんでいる (膜の角が奥にある) ような印象を受ける。

膜面形状は太陽輻射圧の大きさや向きに影響を与えるため、ソーラーセイルの性能を評価する上で形状を求めることは非常に重要となる。しかし、IKAROS はスピンをしており、膜面上には様々なデバイスを搭載しているため、構造的な解析により宇宙空間での局所的な形状を求めることは非常に難しい。分離カメラは本来膜の展帳を確認するための簡易的なカメラであるが、膜の詳細な形状まで撮影できていることから、これらの画像解析による形状推定はより有効であるといえる。

画像を用いた形状復元方法には大きく分けて 2 つの手法がある。三角測量法を利用した幾何学的手法と、物体の明暗や反射特性を利用した測光的手法である。本論文では測光的手法の 1 つである shape from shading¹⁾ を用い、分離カメラの画像から膜面の 3 次元形状を得ることを目的とする。また、幾何学的手法の 1 つであるステレオ法による解析結果²⁾ との比較、得られた形状から算出した姿勢運動と実際に得られたフライトデータとの比較により結果の妥当性についての考察を行う。

2. Shape from Shading (SFS)

SFS は画像の陰影情報から 3 次元形状を復元するアルゴリズムである。惑星探査や視覚の分野で 1970 年代に研究され、照明条件が単純で対象表面の反射特性が既知で一樣な場合に形状復元が可能となる。本研究で用いる分離カメラの画像は、照明となるものが太陽のみであり、膜面の反射特性も既知であるため SFS が適用できるといえる。

分離カメラ画像中の膜面の明るさは①太陽方向、②膜面

^{*1} © 2012 日本航空宇宙学会

平成 23 年 6 月 8 日, the 28th International Symposium on Space Technology and Science において発表。平成 23 年 12 月 20 日原稿受付

^{*2} 東京大学大学院

^{*3} 宇宙航空研究開発機構月・惑星探査グループ

第1図 分離カメラで撮った IKAROS の画像

の反射特性, ③膜面の法線ベクトル, ④カメラの位置, ⑤カメラの光学特性によって決まる. したがって, SFS は各ピクセルについて以下の式 (1) を満たす③法線ベクトル $\mathbf{n}$ を求める問題といえることができる. このとき①, ②, ④, ⑤は既知である必要がある.

$$E = R(\mathbf{n}, \mathbf{s}, \mathbf{c}). \quad (1)$$

実際には SFS の基礎方程式 (1) を満たす法線ベクトルは無数に存在するため, 面がなめらかで連続的に変化するという制約を付加した次の評価関数 J を最小化する問題を考える.

$$J(\mathbf{N}) = \iint \left(\left\| \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial x} \right\|^2 + \left\| \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial y} \right\|^2 + \lambda (E - R)^2 \right) dx dy \quad (2)$$

ここで, x と y はピクセルの位置を表す座標であり, λ は正則化項の重み係数である. 安定した解を得るには λ は大きくなければならず, 一般に 10^3 程度である³⁾.

以下, 本研究で SFS を適用する際に必要なパラメータやモデルについて説明し, 評価関数 J の最小化の手法については次節で述べる.

2.1 ピクセルの輝度 分離カメラの画像は 8 ビットのカラー画像である. これは各ピクセルの色情報が R (Red), G (Green), B (Blue) の 3 つの要素からなるベクトルであり, 要素の値が 0~255 の範囲にあることを意味する. ピクセルの色情報を表すベクトルから明るさを表す輝度値 (スカラー) への変換は式 (3) で与えられる.

$$E = 0.2989R + 0.5866G + 0.1144B \quad (3)$$

2.2 反射モデル 物体表面における反射は拡散反射と鏡面反射の 2 つの反射の重ね合わせで考えることができる. 反射光量の算出には光源 (太陽) の方向とカメラの位置が必要であるが, 前者はサンセンサにより得られたデータ, 後者は北村ら⁴⁾ の推定結果を用いた.

➤ 拡散反射: 拡散反射は等方的に広がる反射である (第 2 図 (a)). その強さは面の法線ベクトルと光源方向のなす角のみで決まり, 式 (4) で表される (Lambert の余弦則).

$$R_d = k_d \mathbf{n} \cdot \mathbf{s} \quad (4)$$

➤ 鏡面反射: 鏡面反射は正反射方向に最も強く反射し, その周りにある程度広がりを持つ反射である (第 2 図 (b)).

第2図 2種類の反射モデル

第3図 膜面上のデバイスの位置

第1表 膜面上のデバイスの反射特性

	Specular k_s	Diffuse k_d	Absorption k_a
①	0.882	0.065	0.053
②	0.089	0.471	0.44
③	0.086	0.06	0.854
④	0.357	0.255	0.37

鏡面反射はいくつかのモデル化がなされているが, 本研究では物体表面の物理モデルを正確に表すことができる式 (5) の Torrance-Sparrow モデルを用いている.

$$R_s = k_s \exp \left(\left(\frac{\cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})}{m} \right)^2 \right) \quad (5)$$

ここで, m は表面の粗さを表すパラメータである.

2.3 膜面の反射特性 IKAROS の膜には様々なデバイスがあり, それぞれ異なった反射特性を持っている. 第 3 図は各デバイスの位置を, 第 1 表はそれぞれの反射係数を表している. これらのデータは打ち上げ前の実験により得られたものである.

2.4 画質の低下 第 4 図は第 1 図左の画像のデバイスごとの輝度のヒストグラムである. 分離カメラの画像はカメラの光学特性やレンズ面での反射などの影響により画質が低下し, 以下の点で理想的な環境で撮られた画像のヒストグラムとは異なる特徴が見られる.

➤ 背景の輝度ノイズ: 本来, 光が存在しない背景 (宇宙空間) の輝度は 0 であるはずであるが, 第 4 図では輝度 25 付近にピークを持つ分布になっている. これは画角内に極めて明るい部分が存在する場合に暗部へ光が漏れる, フレアやゴーストと呼ばれる現象が原因である. 膜面には非常に明るく反射している部分があるため, 暗部である背景にも光が漏れてしまったと考えられる. この現象はランダムな要素も多くモデリングが困難であるため, 本研究では輝度に加わる一定値のノイズ R_n でこの現象を仮定し, その値を変化させることで膜面形状との相関を確認した.

➤ 擬似ピーク: 理想的な環境で撮られた平面の画像のヒ

第4図 デバイスごとの輝度のヒストグラム

ストグラムは拡散反射により低輝度領域にピークを持ち、高輝度領域はなだらかな分布となる。しかし、分離カメラの画像では多くのデバイスのヒストグラムが輝度 0.9 付近にピークを持っている。これは反射光量がカメラのダイナミックレンジを超えたピクセルでは、飽和により本来の輝度よりも小さい値となってしまうことを意味している。しかし、これらのピクセルは強い鏡面反射を示しているため、実際の計算の中では正反射方向を向いているとみなし、SFS の境界条件として用いている。

3. 最適化アルゴリズム

本研究で用いた画像は縦 528 ピクセル、横 788 ピクセルであり、最大で $528 \times 788 = 416,064$ 組の法線ベクトルを求める必要がある。これらすべての法線ベクトルについて評価関数 J の最小化を考えるような大規模な最適化問題では計算コストの観点から共役勾配法⁵⁾が有効である。非線形最適化問題でよく用いられるニュートン法が変数の 2 乗のオーダーの計算コストを必要とするのに対し、共役勾配法は 1 乗のオーダーである。

共役勾配法は繰り返し計算であり、探索方向とステップ幅によって推定解を更新していくことで解を得る。 k ステップ目の探索方向 $\mathbf{s}_k$ とステップ幅 t_k を求め、推定解 $\mathbf{N}_k$ を以下の式 (6) によって更新する。

$$\mathbf{N}_{k+1} = \mathbf{N}_k + t_k \mathbf{s}_k \quad (6)$$

3.1 探索方向 共役勾配法における探索方向 $\mathbf{s}$ は次の式で定義される。

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{k+1} &= -\mathbf{g}_k + u_k \mathbf{s}_k \\ \mathbf{s}_0 &= -\mathbf{g}_0 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{g}_k = \nabla J(\mathbf{n}_k)^T$ である。係数 u_k の選び方により様々な手法が存在するが、本研究では Fletcher-Reeves の手法である式 (8) を用いた。

$$u_k^{\text{FR}} = \frac{\|\mathbf{g}_{k+1}\|^2}{\|\mathbf{g}_k\|^2} \quad (8)$$

3.2 ステップ幅 ステップ幅は探索方向に沿った、推定解から局所最適解までの距離として定義される。局所最適

第5図 ステップ幅決定アルゴリズム

化が含まれる領域を直線探索 (第5図 (a)) により求め、黄金分割法 (第5図 (b)) によりステップ幅を決定する。

➤ 直線探索: τ を微小な値として式 (9) で示される変数 $M_{k,i}$ について $J(M_{k,i})$ を計算し、 $J(M_{k,i}) < J(M_{k,i+1})$ となった時点で $M_{k,i} = \mathbf{N}_a$ 、 $M_{k,i+1} = \mathbf{N}_b$ として黄金分割法に進む。

$$M_{k,i} = \mathbf{N}_k + 2^i \tau \mathbf{s}_k \quad (i = 0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

➤ 黄金分割法: $\mathbf{N}_a$ と $\mathbf{N}_b$ の距離を δ として新たに

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_c &= \mathbf{N}_a + \frac{\rho - 1}{\rho} \delta \\ \mathbf{N}_d &= \mathbf{N}_a + \frac{1}{\rho} \delta \end{aligned} \quad (10)$$

を求める。ここで ρ は黄金比である。 $J(\mathbf{N}_c) < J(\mathbf{N}_d)$ ならば $\mathbf{N}_b = \mathbf{N}_d$ とし、 $J(\mathbf{N}_d) < J(\mathbf{N}_c)$ ならば $\mathbf{N}_a = \mathbf{N}_c$ とする。これを繰り返し、あらかじめ定めた ε に対し $\delta < \varepsilon$ が成り立てばその時点で打ち切る。

4. 法線マップの可視化

ピクセルの画像上での位置は焦点から見た方向 (以下視線方向) に対応している。SFS で得られた法線マップを用いてこの視線方向の奥行きを求めることで形状の可視化を行うことができる。

カメラの画角が小さい場合には画像は平行投影されるとみなすことができるため、視線方向はピクセル位置によらずすべて画像平面に垂直であるという仮定のもと可視化を行うのが一般的である⁶⁾。しかし、分離カメラの画角は垂直方向 76.7° 、水平方向 99.5° と大きく、隣り合うピクセルは約 $0.1 [\text{deg}]$ 視線方向が異なるため、より厳密なモデルを用いる必要がある。

第6図のような隣り合うピクセル p_1 と p_2 において、それぞれの法線ベクトル $\mathbf{n}_1$ 、 $\mathbf{n}_2$ および p_1 の奥行き (d_1) が既知の場合、 p_2 の奥行き (d_2) を算出することを考える。このときの p_1 と p_2 の関係は第7図のようになり、幾何学的関係から次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} d_m &= d_1 / \left\{ \sin \alpha \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta_1} \right) \right\} \\ d_2 &= d_m / \left\{ \sin \alpha \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta_2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、第 7 図の $\mathbf{n}'$ は法線ベクトル $\mathbf{n}$ の平面 $f-p_1-p_2$ へ投影、 α は視線方向のなす角の半角、 β_1 と β_2 は法線ベクトルと視線方向により決まる角である。式 (12) の関係を用いることにより、奥行き既知のピクセルが少なくとも 1 つあれば画像全体の奥行きが復元できる。実際の手順としては以下になる。

- ① IKAROS 本体中心部は分離カメラからの距離が既知⁴⁾であるため奥行き既知のピクセルとして設定する。
- ② 奥行き既知のピクセルと隣り合うピクセルの奥行きを計算する。
- ③ 周囲に複数の奥行き既知のピクセルがある場合、算出した奥行きの平均をとる。

第 6 図 法線マップ可視化の計算面

第 7 図 透視投影における計算面の定義

(a) オリジナルの画像

(b) アルミ蒸着面

(c) FSA

(d) 端面処理

(e) RCD

5. 解析結果

5.1 ピクセルの分類 前述のように IKAROS の膜には異なる反射特性を持つ様々なデバイスがあるため、画像上の領域が属するデバイスごとに分類する必要がある。その結果の一例を第 8 図に示す。本研究では最も領域が大きく、形状の変化が見やすいアルミ蒸着面のみに着目し解析を行った。その際、他のデバイスの領域は平面と仮定した。

5.2 形状推定結果 第 1 図の 2 枚の画像についての解析結果を第 9 図、第 10 図に示す。(a) はピクセル分類後の入力画像、(b) は法線マップ可視化により得られたピクセルの 3 次元プロット図、(c) はプロット図の形状をもとに復元した CG 画像である。ただし、ここでは輝度ノイズについては考慮していない。CG 画像は 2 枚の画像とも得られた膜面形状によって、細かなしわなどを含め入力画像を十分再現できていることがわかる。第 11 図は第 9 図と第 10 図の (b) の断面を示したものである。膜の外側ほど +z 方向 (カメラ側) に変位しており、すり鉢状の形状をしていることがわかる。この結果は分離カメラの画像を複数枚用いてステレオ法の観点から行われた解析²⁾とも定性的に一致している。

分離カメラの画像を見たときに感じる印象は“膜の角が奥にいつている”というものであった。これは推定された形状とは逆であるが、それを元に復元された CG 画像でも

(a) 入力画像

(b) 膜面形状プロット図

(c) 復元した CG 画像

第 9 図 膜面形状推定結果 (第 1 図左の画像)

第 10 図 膜面形状推定結果 (第 1 図右の画像)

第 11 図 膜面の変位

第 12 図 輝度ノイズと膜面変位

同様の印象を受けることから、人間の目の錯覚によるものであるということが出来る。

IKAROS の膜の角には先端マスと呼ばれる重りがついており、そこに働く遠心力と太陽輻射圧、そして膜の剛性がつり合うところで展張状態は保たれる。柔軟な膜は剛性を持たないため、遠心力が支配的であれば対角線方向 (第 11 図の c-d, g-h) の z 方向変位は 0 となり、太陽輻射圧が支配的であれば負となる。しかし、IKAROS の膜は強い剛性を持っているため、今回得られたような対角線方向に正の変位を持つ形状も十分考えられる。

5.3 輝度ノイズの影響 輝度ノイズとして画像全体の輝度に一定のオフセットがかかっていると仮定し、シミュレーションを行った。 $R_n = 0.02, 0.05$ の場合の対角線方

向の膜面変位について第 12 図に示す。ただし、対角線の名称については第 11 図のものをを用いている。

(a) では輝度ノイズが大きくなるにつれ z 方向変位は小さくなっているが、(b) ではほとんど変化が見られない。これは、もともとの輝度分布により輝度ノイズの影響が変化するためである。今回の輝度ノイズのモデリング誤差は膜面のたわみの方向には影響しないものの、 z 方向変位についての定量的な評価は困難であるといえる。

6. 姿勢運動との比較

スピンの衛星の姿勢の運動方程式は以下の式で表される。

$$I\dot{\omega} + \tilde{\omega} \times I\omega = T \quad (12)$$

慣性モーメント $\mathbf{I}$, 機体固定座標系での角速度 $\boldsymbol{\omega}$, スピンフリー座標系での角速度 $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ を式 (13) のように定義する.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_T & & \\ & I_T & \\ & & I_s \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \Omega \end{bmatrix}, \quad \tilde{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式 (12), (13) とスピン軸の軌道面内方向角度 α , 軌道面外方向角度 δ を用いると姿勢運動は以下のように書くことができる.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \tilde{\Omega} \\ \alpha \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{\Omega}\omega_y + \tilde{T}_x \\ \tilde{\Omega}\omega_x + \tilde{T}_y \\ \tilde{T}_z \\ \omega_y/\cos\alpha \\ -\omega_x \end{bmatrix} \quad \left(\tilde{T} = \frac{\mathbf{T}}{I_T}, \quad \tilde{\Omega} = \frac{I_s\Omega}{I_T} \right) \quad (14)$$

外乱トルクとして太陽輻射圧のみを考えると, スピン軸方向は太陽近傍の方向を中心とした円運動に近い周期的な運動をすることが知られている^{7,8)}. 第13図は2010年9月から11月までのIKAROSのスピン軸方向の履歴であり, らせん運動をしていることがわかる. この運動の向きは膜面の z 方向変位の符号に, 周期は主に膜面の z 方向

第13図 IKAROSの姿勢運動履歴 (2010.9.11~11.30)

第14図 先端マスの位置と姿勢運動の周期の関係

変位の大きさに支配されるため, 本研究では膜面が動径方向に1次的な変形をしていると仮定し, 式 (15) を数値的に解くことで膜面形状と姿勢運動の周期の関係についての解析を行った. 先端マスの変位と姿勢運動の周期の関係を第14図に示す. IKAROSの姿勢運動のフライトデータは約2カ月の周期であることから, 先端マスの変位は z 方向に+20 cm程度となることがわかる.

SFSにより得られた形状では先端マスの変位が z 方向に約+40 cmであったので, 姿勢運動から得られた形状に近い傾向を示しているといえる.

7. ま と め

本論文では, IKAROSの分離カメラ画像を用いて, 膜面の形状推定を行った. 画像を用いた形状推定にはいくつかの手法がある中で, 測光的手法の一つであり, 画像の陰影情報を利用する shape from shading を用いて解析を行った. その結果, 膜の外側ほどカメラ側に変位しているすり鉢状の形状が得られ, ステレオ法により求められた形状と一致した. これは画像を見たときに感じる印象とは逆であるが, この形状を元に復元したCG画像からも同様の印象を受けることから, 人間の目による画像上での判断は難しいということがわかった. 画像に含まれるノイズなどの様々な画質低下要因の正確なモデリングは困難であるが, 適当な仮定のもとで解析を行い, それを元に軌道上の姿勢運動をシミュレーションすると, 実際のフライトデータと定性的に一致した結果を得ることができた. 展開を確認するための簡易的なカメラで膜面の局所的な形状まで推定できたことは大きな成果であるが, より精度よく推定を行うためには高性能のカメラが必要である.

参 考 文 献

- 1) Horn, B. K. P. and Brooks, M. J. (eds.): Shape from Shading, MIT Press, Cambridge, 1989.
- 2) Matunaga, S., Inagawa, S., Nishihara, T., Kimura, S., Sawada, H., Mori, O., Kitamura, K. and Structure Team IKAROS: On-Orbit Demonstration of Deployable Camera System for Solar Sail IKAROS, 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011-o-4-07v, 2011.
- 3) Worthington, P. L. and Hancock, E. R.: New Constraints on Data-Closeness and Needle Map Consistency for Shape-from-Shading, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intel., **21**, 1 (1999).
- 4) 北村憲司, 澤田弘崇, 川口淳一郎: IKAROS 分離カメラの飛翔軌道と姿勢に関する初期解析, アストロダイナミクスシンポジウム, A-11, 2010.
- 5) Fletcher, R. and Reeves, C.: Function Minimization by Conjugate Gradients, Comput. J., **7** (1964), pp. 149–154.
- 6) 森 義仁, 安村禎明, 上原邦昭: 領域分割に基づく回帰による三次元形状復元, 情報処理学会関西支部大会, 2009.
- 7) Tsuda, Y., Saiki, T., Mimasu, Y. and Funase, R.: Modeling of Attitude Dynamics for IKAROS Solar Sail Demonstrator, AAS 11-112, 2011.
- 8) Okano, Y., Tsuda, Y., Funase, R., Sahara, H. and Mimasu, Y.: FEM-Based Evaluation of Solar Radiation Pressure Effect for Spinning Space Craft, 62nd International Astronautical Congress, 11-C1.5.11, 2011.