

有孔膜面のスピン展開と事前データを用いた膜面の展開挙動計測

Deployment of perforated spin deployment membrane structure and deployment dynamics

measurement by using a prior learning data

宮崎・山崎研究室

Miyazaki・Yamazaki Laboratory

松崎 遥, 藤野 溪佑

Yo Matsuzaki, Keisuke Fujino

The deployment method and the folding method of the membrane of the solar sail "IKAROS" are being considered for future use. However, it was understood by the ground experiment that it is difficult to deploy because of the folds overlap part. The measurement of membrane deployment is performed by stereo vision using a high-speed camera. However, at the time of the measurement, marked points on the membrane are hard to scan because there are part of lack on the marked points by light or the deformation of membrane. Thus, it takes a lot of time in the usual automatic tracking software. Therefore, in this study, it is easy to deploy by using a membrane with holes, and we succeeded in improving accuracy by putting learning data in advance into marked point tracking software.

1. 緒言

1.1 背景・目的

昨今、数 μm 程度の厚さの膜面やケーブル等極めて柔軟な展開構造物と、人工衛星構体や展開支持機構等の剛性の高い構造から成る膜面宇宙構造物は、重量・体積に比べて大面積を確保する事が可能なため、大型通信アンテナやサンシールド、ソーラーセイル等の次世代の大型宇宙構造様式として注目されている。2010年には、JAXAから小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS が打ち上げられ、軌道上での膜面の展開、展張に成功した^[1]。

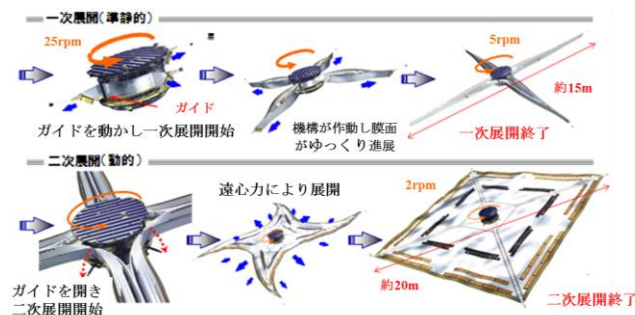


Fig. 1. IKAROS の展開方式^[2]

Fig. 1 に示した IKAROS で採用された膜面の展開方式 (十字状から手裏剣状を経て正方形に展開) や Fig. 2 に示した折り畳み方式は、製作の容易性や展開実績などの点から今後も利用が検討されている。しかしながら、Fig. 2 の赤枠で囲った部分に折り目が集中することにより、膜の折り目部の剛性や幾何学的な形状と遠心力の関係によっては展開が十分に行われないことが地上実験によりわかってきた。^[3]

このようなスピン展開型の膜面の展開実験では、高速カメラを用いたステレオ視撮影によって計測が行われているが、解析の際、膜面上の特徴点が照明光や展開中の膜面挙動の影響により変形・欠損してしまい、汎用の自動追尾ソフトが十分に機能せず、多数のデータの処理に膨大な時間がかかることが問題となっている。

そこで本研究では、①.膜面上の折り目が集中する箇所

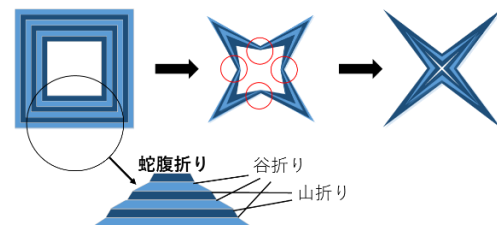


Fig. 2 IKAROS の膜の収納方式

に穴をあけ、変形し難さの軽減、②.地上実験により取得した多数のデータを従来より低負荷で処理可能にするため、あらかじめ学習した特徴点の変形データを用いた自動追尾ソフトウェアの開発を行った。

2. 折り目剛性を緩和する膜面について

2.1 正方形膜面における遠心展開

Fig. 2 に示したように、正方形膜の中央は切り抜かれている。ここに膜を収納するためのセンターハブ (以下ハブ) が位置し、テザーと呼ばれる糸で膜面と繋がれている。膜はスピンさせながら自身に働く遠心力により展開する。また、膜の先端 (正方形膜の四隅に相当) には錘がついており、その遠心力により展開をアシストしている。

Fig. 2 の赤丸で示した部分は、膜面を束ねてハブに収納されるので、折り目が重なる。この箇所は錘の遠心力によるアシストが作用しづらいので、展開しにくい傾向にある。そこで、折り目の重なる箇所に穴を開け、膜面の変形を許容することを試みた。穴は、正方形の4辺それぞれの中央の折り目上に設けた (Fig. 3)。

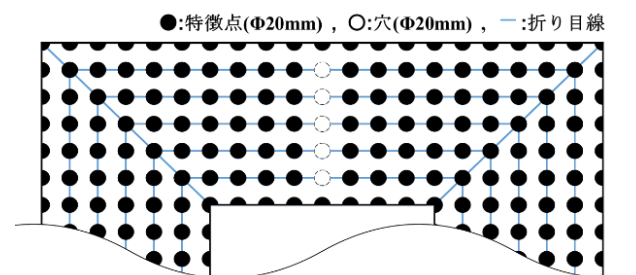


Fig. 3 膜面に穴を開けた位置

3. 無孔膜と有孔膜の比較

3.1 実験に用いる膜面

膜に穴を開けたことにより展開しやすくなることを検証する．穴の開いた膜と空いてない膜を用いて，真空槽を用いた展開実験とフォースゲージによる引張実験を行い，穴の有無による違いを評価する．実験に用いた膜の詳細を Fig. 4, Table 1 に示す．



Fig. 4 使用する膜面(左：無孔膜，右：有孔膜)

Table 1 使用する膜面の詳細

材質	ポリエステル
大きさ	700mm 四方
折り目の数	5
厚さ	23 μ m

3.2 展開挙動の比較

撮影には高速度カメラを2台使い1000fps,1024 $\times$ 1024pixelの撮影を行う．膜面の展開は赤外線照射装置から赤外線を受信し，展開機構が作動する．装置概略図を Fig. 5 に示す．空気による影響を減らすため，真空槽による減圧を50Paに統一し実験した．

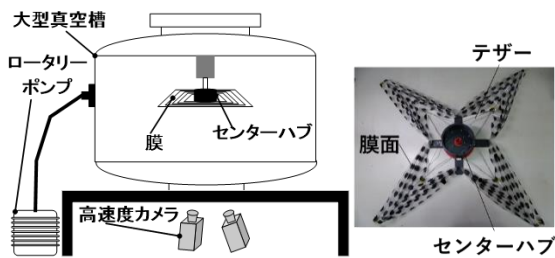


Fig. 5 展開実験の装置概略図

展開実験では，展開後のある時刻での展開面積や，展開する際の膜の挙動を比較した．展開する様子の比較を Fig. 6 に，展開面積(二次元画像平面上の投影面積)を Table 2 に示す．

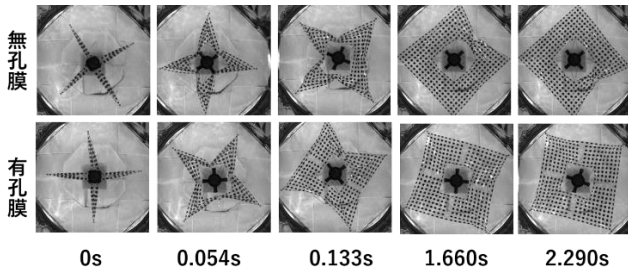


Fig. 6 展開する様子の比較

Table 2 展開面積の比較

時間[s]	0	0.054	0.133	1.660	2.290
無孔膜[pixel]	21938	47088	71566	134208	133786
有孔膜[pixel]	22001	54230	106989	143782	153425
面積比	1.003	1.152	1.495	1.071	1.147

Fig. 6 より，両膜を比較して，有孔膜の方が同時刻にお

いて展開面積が大きくなっていることがわかる．また，1.660s の時点で有孔膜はすでに展開が完了しているが，無孔膜は一部に折り目の集中部が形成され，2.290s まで経過しても依然展開が完了していない．このような折り目の集中部は一度形成されると，膜面自身と錘による遠心力だけでは展開されないことがわかる．また，面積比を見ると，0.133s でおおよそ 1.5 倍と最も大きく差が出た．このことから，手裏剣状から正方形への展開に際して，折り目の集中箇所の展開を妨げていることが考えられる．

3.3 展開に必要な力の比較

Fig. 4 に示した2枚の膜を用いて引張実験を行い，展開に必要な力を比較した．膜をつないだままハブをアクリル板上に固定し，膜の一边の中心をフォースゲージにつなげる．展開し始めの位置(90 度に手裏剣状に展開した状態)から 5mm 間隔で力を測定し，穴の有無による展開に必要な力を比較する．引っ張る距離が分かるように目盛りが印刷された用紙をアクリル板の下に敷く．実験の全体図とフォースゲージの接続法を Fig. 7 に，フォースゲージの移動距離と力の関係を Fig. 8 に示す．Fig. 8 には引っ張られた膜面が展開する様子の模式図を添えた．

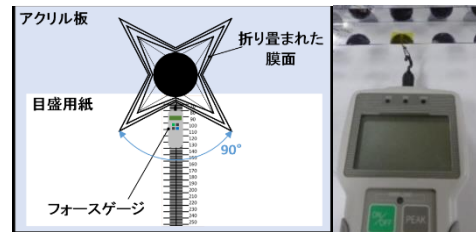


Fig. 7 引張実験全体図とフォースゲージの接続

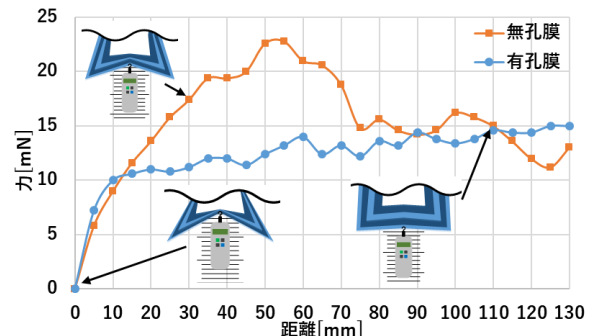


Fig. 8 展開に必要な力の比較

Fig. 8 から，無孔膜では 50mm 程展開させる時にピークがあり，その後は展開に必要な力は減少している．そのため無孔膜の場合には折り目の集中箇所にはある一定以上の力がかからないと展開しない．そのため，Fig. 6 のように，膜の厚さや折り目の強さなどの条件によっては展開しないことがあると言える．逆に有孔膜の場合には無孔膜と比べると小さな力で展開させることができることがわかる．

4. 学習データを用いた自動追尾ソフトウェアの開発

4.1 従来のソフトウェアと問題点

膜面上に取り付けられる特徴点は，膜の運動や幾何学的な形状を変化させないようにするため，平面形状かつ比較的柔軟な特徴点（例えば，塗料など）を用いることが多い．そのため，計測用の照明光だけではなく膜面そのものの変形の影響を受けて特徴点形状が変化してしまう．既存のソフトウェアでは，1 ステップ前の特徴点情報を用いたパターン認識アルゴリズムにより，特徴点位置

を推定していくため、次第に特徴点情報が本来の形から変化してき特徴点の追尾が十分に行えなくなることが起きる。Fig.9はその一例を示しており、膜のたわみやシワ、照明の影響により形状が変化し小さな点と同様になる、もしくは線状になってしまうという状況が数多く発生している。



Fig.9 左から本来の形状の特徴点, その2値化画像, 線と判別の難しい特徴点, 消失直前の特徴点

そこで、新しいソフトウェアでは予めデータベースに特徴点の変化パターンを格納し、それを元に特徴点を探索する。Fig.10の左側に従来のソフトウェア、右側に新しいソフトウェアのフローチャートを示す。破線で囲われた部分が今回提案するソフトウェアで追加する部分で、青色の部分メインとなる部分である。

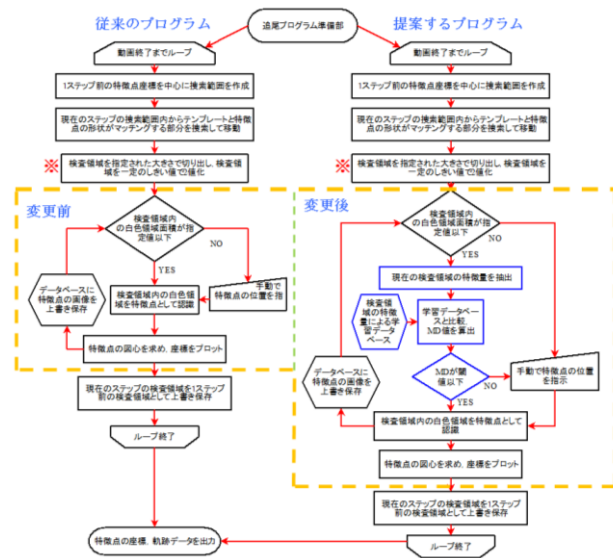


Fig.10 プログラムのフローチャート

Fig. 11 に、Fig. 10 の※部の検査領域の画像例を示す。画像は22pixel 平方の2値画像で構成されている。この検査領域の画像の特徴量が学習データベース内に格納される。

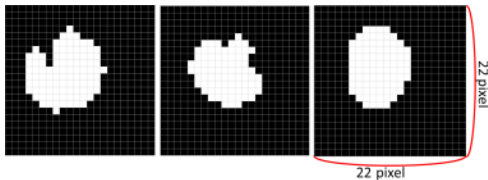


Fig.11 検査領域内の特徴点サンプルの1例

4.2 アプローチ: 学習データを用いたパターン認識推定

本研究では特徴点の誤追尾を防ぎ、特徴点追跡精度の向上を実現するために、複数の特徴点の形状パターンをデータベース(Fig.10 に示した学習データベースに相当)に保存し、そのデータベース内の画像を元に予め設定した閾値を基準として特徴点の判別を行うパターン認識の手法を提案する。今回の実験では Fig.11 に示した様な画像を検査領域として抜き出し、パターン認識を行う。学習データベース内に格納するサンプルデータは従属関係を持たないよう自動的に選別されるが、サンプルデータ

内のデータに Fig. 9 の右2つの様なパターンが混入していないかは手動で確認する必要がある。

パターン認識では、判別対象の特徴を抽出する必要がある。今回の実験では膜面上の特徴点の変形パターンを考え、検査領域の各列にいくつ白色の領域が存在しているかで22個(画像の各列で数値が算出されるためこの1項目で22個の特徴量がある)、2値化後の画像の白色の総面積で1個の、3×3ピクセル以上等の一定の大きさ以上の白色領域が幾つ存在するかで1個の特徴量の計24個の特徴量が有用であると考えた。これらの数値を特徴量として用いる場合、それぞれの特徴量の次元が[個], [pixel²], [個]と異なるため、このまま同時に特徴量を評価することは困難である。そこで、次元の異なる特徴量を同時に、かつ容易に評価することができるMT法(Mahalanobis-Taguchi method)^[4]を用いた。MT法はマハラノビスの距離(MD: Mahalanobis's Distance)というデータベース内の全ての特徴量の相関に基づいて算出される数値によってデータベースによる基準からどれほど検査領域の画像が異なっているかを調べる事が出来る方法である。MD値に閾値を設ける事で画像の分別が可能である。

MT法では、特徴量を数項目設定し行列として作成した学習データベースが必要である。Fig.11に示した様な22pixel四方の24個の特徴量を持つ画像をn個データベースへ格納する時、(1)式のように行列を作る事が出来る。

$$A = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{124} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{n24} \end{bmatrix} \quad (1)$$

次に行列 A を列ごとの平均値と標準偏差を用いて規準化し、行列 B を求める。

$$B = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{124} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{n24} \end{bmatrix} \quad (2)$$

相関行列 R の各要素は B を用いて式(3)のように表すことができる。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{p=1}^n Y_{pi} Y_{pj}}{n} \quad (3)$$

この際、相関行列 R の主対角要素は全て1になる。相関行列 R は(4)式ようになる。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{124} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & & r_{224} \\ r_{31} & r_{32} & 1 & & r_{324} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{241} & r_{242} & r_{243} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

さらに相関行列 R の逆行列 R^{-1} を求める事でデータベース作成は完了である。次にMDを算出する。検査領域の画像から k 個の特徴量を抽出し、 A の各列の平均値と標準偏差を用いて規準化し(5)式を用意する。

$$U = U_1, U_2, \dots, U_k \quad (5)$$

この行ベクトル U とその転置行列 U^T を作成することで、MD は(6)式で求められる。

$$MD = \frac{1}{k} UR^{-1}U^T \quad (6)$$

この MD の数値が大きいほど基準（データベース）から遠い事を表す。

5. 提案する自動追尾ソフトウェアの評価

5.1 評価項目

1. 半径 200pixel の円周上を 5[pixel/step]で 5×5 pixel の正方形の追尾対象が移動する動画を作成し、正常に追尾できるか評価する。その際、追尾点の図心座標をプロットしプログラムの精度を見る。
2. 実際の膜面で発生する不規則な変化に対応できるかを確認するため、3 項に示した膜面で展開実験を行い、提案する新しいソフトウェアを用いて追尾の可・不可を調べる。

データベースは、特徴量の線形従属性を判断し自動でデータ作成した後、実際に人が特徴点として認識できる特徴点画像を選定し作成した、MD 値の閾値の決定は、作成したデータベースから $MD=21.3$ となったため今回の閾値は $MD=20$ とし、これを超えた MD 値を算出した場合特徴点の異常とした。

5.2 評価結果

1. 理論値との誤差は 0 pixel となり、提案したプログラムが特徴点追尾において問題がないことを確認した。
2. 今回提案したソフトウェアとこれまでのソフトウェアで同一の特徴点を追尾しその誤追尾回数(特徴点ではなく線や影等を追ってしまった回数)、特徴点遷移回数(追尾中の特徴点から他の特徴点へ追尾対象が変わってしまった回数)、処理時間(特徴点 1 点の追尾に要した時間)、手動切り替え回数(特徴点の追尾に失敗し手動で座標指定した回数)及びデータベース作成時間を Table 3 に示す。

Table 3 従来と新しいソフトウェアの比較

	従来のソフトウェア	提案するソフトウェア
誤追尾回数	4	0
特徴点遷移回数	1	0
処理時間	1分56秒	1分45秒
手動切り替え回数	6	3
データベース作成時間	-	約10分

誤追尾回数は従来のソフトウェアでは4回程あったが、提案したソフトウェアでは 0 回にすることが出来た。これは Fig. 10 に示した学習データベースにより、従来のソフトウェアでは単に追尾成功と判断されたパターンでも、MD を計算し閾値と比較する事でより正確に判断できるようになったためである。従来のソフトウェアでは膜面の变形や照明の影響により特徴点が変形し次のステップで元の形状へ戻った場合、もしくは線状まで変化した場合に 4.1 項にて説明した従来のソフトウェアのアルゴリズムでは誤追尾が発生する。しかし、提案したソフトウェアでは、本来の特徴点パターンに加え、変形時のパターンを学習データベース中に特徴量として格納する事で、誤追尾を防ぎつつ膜変形中に起こり得る多彩な特徴点の

変形パターンに対応できるため、従来の物に比べ誤追尾が軽減されたと考えられる。また、Fig. 12 に 4 回の誤追尾の内 1 回発生した特徴点遷移が発生した際の探索領域の画像を示す。

従来のソフトウェアでは領域内に Fig. 12 のように島が 2 つある場合は面積の大きい方を追尾対象として認識するため、プログラムが途中で中断されず誤った点を追尾し始めてしまう。

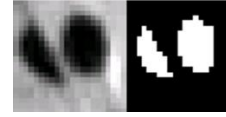


Fig.12 膜面がたわんだ際の特徴点(左が追尾中の特徴点 22pixel 平方)

提案したソフトウェアでは Fig. 12 の特徴点について、前述したように Fig. 10 に示した学習データベースとの比較によって、 $MD=60.4$ という数値が算出され、あらかじめ設定した閾値の $MD=20$ という値より大きいため、追尾点座標をマニュアルで指定するよう切り替わり誤追尾を防いだ。また、誤追尾が減少したため特徴点座標指定が手動へ切り替わる回数も減少した。手動へ切り替わる回数が減少したため、処理時間は従来のソフトウェアと比べ提案したソフトウェアでは 10 秒程軽減することが出来た。実際には、従来のソフトウェアでは特徴点と線の誤認に加え、隣の特徴点へ追尾対象が移ったまま追尾を継続してしまうということも起こる。この場合、追尾中の特徴点のデータとしては不適切であり、誤追尾の回数分だけ計測データの修正する必要があり多くのコストがかかることが予想される。

提案したソフトウェアは半自動化されてはいるものの、データベース作成に 10 分程の作業を要するが、データベース作成は一連の実験データ（パラメータを変更した実験データ）に対して 1 度実施するだけでよいため、誤追尾率を低下させることが出来る提案ソフトウェアの使用価値は十分にあると考えている。

以上より、学習データを用いた自動追尾ソフトウェアの使用が、膜面上の特徴点を認識し追尾する上では有効であると言える。データベースに格納するサンプルパターンの選定は半自動状態であるため、今後の改良点として、ソフトウェア実行中に格納すべきデータを自動で選別・格納するアルゴリズムの追加を検討したい。

7. 結言

- ①. 有孔膜を用いることで膜面の展開面積の増加し、展開に要する力が減少され、展開が容易である。
- ②. 提案する学習データを用いた特徴点追尾ソフトウェアは従来のソフトウェアに比べ誤追尾率を抑え、膜面の挙動把握作業において時間的コストの削減と取得するデータの精度向上をすることが出来た。

参考文献

- [1] 橋口総太郎：数値解析によるスピン展開膜面の折り畳み法の比較，日本大学大学院修士論文，2006 年。
- [2] 宇宙航空研究開発機構 月・惑星探査プログラムグループ「小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS 飛翔実験報告書」，P81. 2014 年。
- [3] 鈴木智大：遠心展開を用いた膜面展開の挙動における相似則に関する研究，日本大学卒業論文，2016 年。
- [4] 日科技連出版社：MT システムのはなし，2004 年。