

小型人工衛星による膜面展開実験に向けた基礎技術の開発

中篠恭一*

Development of Key Technologies for Membrane Deployment Experiment Using Small Satellite

by

Kyoichi NAKASHINO*

(Received on Sep. 00, 0000 and accepted on Nov. 00, 0000)

Abstract

For the development of future Gossamer space structures, it is crucial to investigate the deployment behavior of large thin membranes under microgravity environment through both experimental and numerical approaches. For this purpose, we propose a membrane deployment experiment in space using a 10cm-class small satellite, a crude breadboard model of which was developed and manufactured as last year's results of student hands-on project in Tokai University. Along with this project, we investigate dynamical behaviors of large thin membranes using nonlinear finite element method. The present paper describes recent results obtained in this investigation. Focuses are on newly developed contact algorithm for large deformation problem of thin membranes. Numerical results show that the developed algorithm is numerically more stable than other existing algorithms.

Keywords: Small Satellite, Membrane Dynamics, Finite element analysis

1. はじめに

現在, 将来の大型柔軟宇宙構造物として膜面を主構造とする, いわゆる Gossamer Space Structure の研究が各国において進められている. 例としては, 100m クラスの大規模膜面を宇宙空間において展開し, 光子圧を推進力として利用するソーラーセイル, 膜面をガス圧等によりインフレートさせて大規模パラボラ鏡面を形成するインフレイタブル構造などが挙げられる. これらの宇宙構造物においては, 軌道上での大規模膜面展開が要求されるが, 宇宙空間における柔軟膜面のダイナミクス挙動は強度の非線形性を有しており, 実用化に向けて十分な軌道上検証を行う必要があると考えられる. 一方, 膜面の非線形ダイナミクスに関する数値解析技術も未だ十分には確立されているとは言えず, 軌道上での物理検証に加えて, 基盤技術の開発を進める必要がある.

以上の状況を踏まえ, 本研究では小型人工衛星による膜面の軌道上展開ミッションを想定し, ミッション達成に向けて必要とされる基盤技術の開発を進めている.

より具体的には,

- (1) 10cm クラスの小型人工衛星バス部およびミッション部の開発

- (2) 柔軟膜面の非線形ダイナミクス解析を可能とする数値解析コードの開発

の2つが本研究の目的となる. このうち上記(1)は, 学内教育プロジェクトとしての面を強く持っており, 学生を主体としたメンバーによって開発を進めている. このような学生主体による小型人工衛星開発は他大学機関において既に成功を収めており, 本学内においても十分可能であると考えられる. 一方, 上記(2)は新規アルゴリズムの開発まで視野に入れた学術研究であり, 教育的要素は含まれていない. 本報では, 上記(2)に関する研究の進捗報告として, 膜面接触問題に関する新規アルゴリズムの開発について述べる. なお, (1)に関する活動としては昨年度, 衛星ハードウェアの姿勢系・通信系・電源系・データ処理系のそれぞれについて BBM (機能検証モデル) を開発・製作し, 建学祭時に展示を行っている.

2. 解析モデル・解析結果

2.1 膜面のモデル化

一般に Gossamer Structure に利用される膜面は μm オーダーの薄膜であり, 曲げ剛性をほとんど持たない. さらに, このような薄膜が面内圧縮を受けた場合, その表面には容易にリンクル(しわ)が形成される. そこで本研究では, 非線形有限要素法に基づいて膜面の

*2 工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻講師

モデル化を行い、さらにリンクルの発生に伴う非線形性を考慮した膜要素を採用した¹⁾。

2.2 数値積分スキーム

運動方程式の求解にあたり、本研究では一般化 α 法を積分スキームとして採用した。解析結果の一例をFig.1に示す。膜面の左端を固定して一様な物体力を作用させた場合の解析結果であり、変形の時刻歴変化が安定的に求められていることが確認できる。

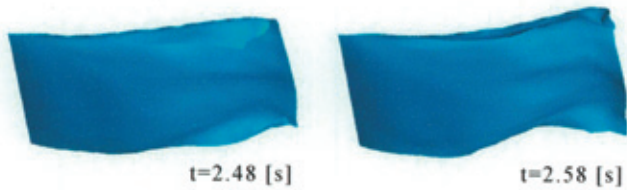


Fig. 1 Membrane Deformations subjected to Constant Body Forces

2.3 接触アルゴリズム

大変形を伴う膜面のダイナミクス解析においては、膜面同士の接触、すなわち self-contact のモデル化が必須となる。Fig.1に示した解析では self-contact が考慮されていないため、膜面同士のすり抜けが生じるなど、現実の物理現象を正しく再現するモデル化とはなっていない。そこで本研究では、新規に接触アルゴリズムを開発して数値計算コードへの組み込みを行った。以下にそのアルゴリズムを紹介する。

有限要素法における接触解析では、ある有限要素の表面を他要素の節点が貫通した場合に接触が発生したと判断し、貫通量 g に応じた接触力を導入して解析を行う (Fig.2)。接触力の算出には、(i)penalty 法に基づくモデル、(ii)Lagrange 未定乗数に基づくモデル等があり、いずれのモデルに関しても、幾何学的非線形性を厳密に考慮した接線剛性が導出できる²⁾。

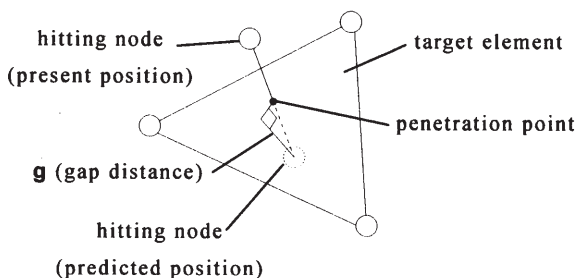


Fig. 2 Relation between Hitting Node and Target Element

しかしながら、上記のモデルを用いて、本研究で扱うような膜面の有限要素解析を行った場合、反復計算の収束解が得られないという問題が発生した。膜面の面外剛性は一般の剛な構造物に比べて極めて小さいため、面外方向の接触力の導入により力学的平衡が大

きく変化してしまうことに、その原因があると考えられる。そこで本研究では、貫通と判断された hitting node に関しては、その現在位置を penetration point に引き戻し、以後は hitting node の変位を一時的に全体自由度から削除する、という手法に基づいて接触のモデル化を行った。

以下に、上記モデルの有効性を確認するために行ったベンチマーク解析の結果を示す。Fig.3 左図のように初期状態で V 字型に折られた矩形膜面を考え、外力条件として左右から圧力を加えて変形後の形状を解析した。Fig.3 右図が本研究で提案する接触モデルに基づいて得られた変形形状であり、膜面の接触が正しく再現されていることが確認できる。また、同問題における計算反復回数と残差の関係を Fig.4 に示す。従来法 (penalty 法, Lagrange 未定乗数法) と比較して十分な収束性が確保できていることが確認できる。本手法をダイナミクス解析へ拡張することが今後の課題である。

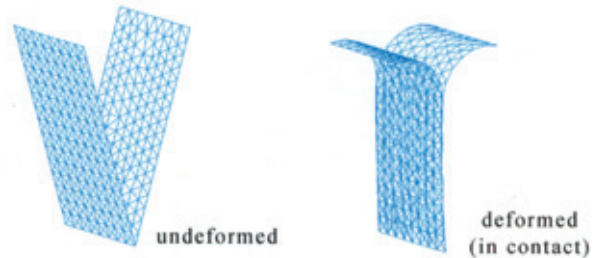


Fig. 3 Finite Element Model for Contact Benchmark

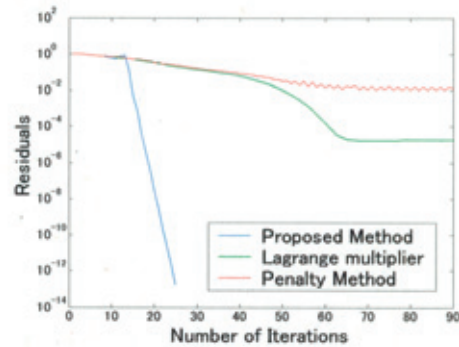


Fig. 4 Comparison of Convergence Rate

謝辞

本研究は、東海大学工学部 2009 年度学部等研究教育補助金の援助を得て行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Nakashino, K., Natori, M.C., "Efficient Modification Scheme of Stress-Strain Tensor for Wrinkled Membranes," AIAA Journal, Vol.43, No.1, pp.206-215, 2005.
- 2) Wriggers, P., "Computational Contact Mechanics, second edition," Springer, 2006.