

モジュール型自己展開膜面トラスで構成されるオカルタの構成

Configuration of Occulter Based on Modular Self-Deployable Membrane Truss

奥山・宮崎研究室

Okuyama-Miyazaki Laboratory

大森 凜太

Rinta Omori

Starshade system is one of the directly observe exoplanets methods that enables by blocking the light using a membrane shield called occulter set between the star and the telescope. The author has been researching on occulter using modular Self-Deployable Membrane Truss (SDMT) that deploys by self-extends booms and is highly storable. However, high accuracy is required for the outer shape of the occulter. This paper shows the Hold and Release Mechanism (HRM) and coupling mechanism for proper deployment of occulter using SDMT and the methods of attaching the membrane and storing and deploying the tip plate to maintain high shape accuracy.

1. 序論

1.1. 研究背景

1.1.1. スターシェードにおけるオカルタ

太陽系外惑星は 1995 年に初めて発見されて以降、数多く発見されている^[1]。それらの多くは主にトランジット法などの間接観測法を用いて発見されているが、惑星表層の情報をより詳細に取得するためには、惑星を直接撮像する必要がある^[2]。

太陽系外惑星を直接撮像する場合、恒星が惑星に比べて非常に明るいため、恒星の光によって観測がされるということが問題となる。この問題点を解決するために、Fig. 1 に示すようなオカルタと呼ばれる大型遮蔽物を恒星と宇宙望遠鏡の間に配置し、恒星の光を遮ることで、惑星の直接撮像を行うスターシェードシステムが提案されている^[3]。現在 NASA 等が提案しているスターシェードシステムでは、オカルタによる恒星の回折光を抑えるために、Fig. 1 に示された花卉型形状としている^[4]。しかし、花卉型形状は外形に曲線を有するため複雑な構造で高コストなものとなる^{[5]-[8]}。

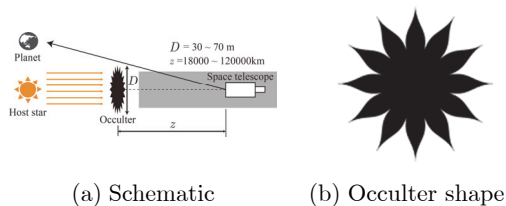


Fig. 1 Starshade system

1.1.2. 自己展開膜面トラス(SDMT)を用いたオカルタ

筆者らは自己伸展性を有するブームを用いた自己展開膜面トラス(Self-Deployable Membrane Truss : SDMT)に関する研究を行っている^[9]。SDMT とはノード内における円筒状のハブにブームを巻きつけて収納し、保持を解放すると直線状に進展する展開構造である(Fig. 2)。ノードは、適切に収納を保持し展開するために、ハブ、ブーム、ダンパ、ラッチ、保持解放機構で構成される。

SDMT はアクチュエータを用いず自らの伸展力のみ

によって展開する。よって構造の軽量化が期待できる。また、SDMT は収納効率が高いので、ロケットの制約に求められる高収納性にも優れる。筆者らはスターシェードシステムにおけるオカルタに SDMT を用いることを検討している。

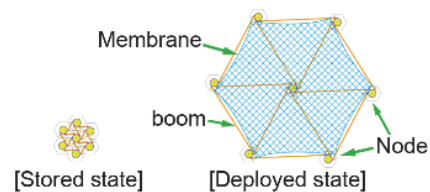


Fig. 2 SDMT

従来の花弁型オカルタ形状を SDMT で実現する際、周辺の曲線形状が問題となる。実際、SDMT を構成する部材は直線状に伸展するため、曲線形状を実現することが難しい。そこで Fig. 3 に示されるオカルタの形状が提案された。提案されたオカルタの形状は折れ線形状で、非透過な膜と透過性の高い膜が組み合わされており、数値計算により、従来の花弁型形状と同等の遮蔽性能を有することを確認されている^[10]。

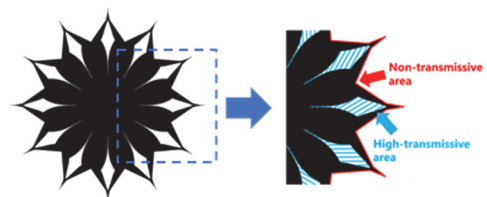


Fig. 3 Polygonal shape of occulter

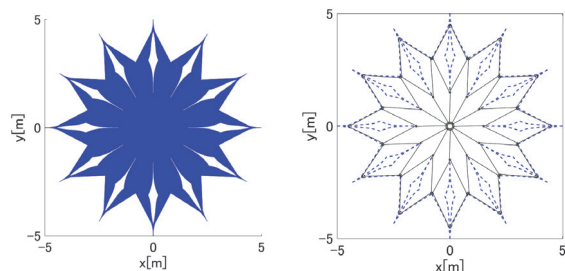
また、オカルタのような大型の構造物を製作する場合、構造全体を一度に組み立てることは、広大な空間と多くの人員を必要とするため難しい。そこで、構造全体をいくつかのモジュールに分割し、各モジュールを結合して構造全体を構築することを提案している^[11]。

1.1.3. スターシェード技術実証衛星「Euryops」

以上の背景から、軌道上における SDMT を用いたスターシェードの基礎技術実証ミッション Euryops

(Exozodiacal disc survey using occulter composed of SDMT)を検討している^[12]. Euryops では、望遠鏡衛星と SDMT で構成される直径 10m のオカルタ衛星を用いてデブリ円盤の観測を行う予定である。

Euryops のオカルタの外形は Fig. 4 の通りであり、オカルタは Fig. 5 の通り、5つのノードと5つのブームを1モジュールとし、12個のモジュールを結合することで構成される^[13].



(a) Membrane (b) Truss layout
Fig. 4 Configuration of occulter in Euryops

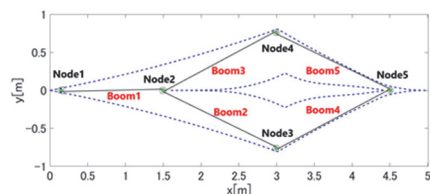
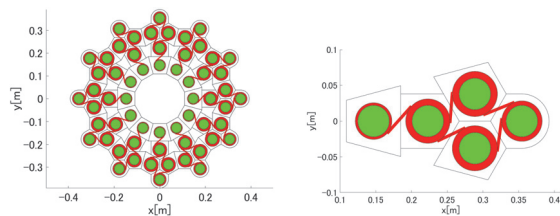


Fig. 5 Constitution of a module

収納したオカルタは Fig. 6 に示されるようになり、 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ 以内に収納される。緑円がハブ、赤線がブーム、黒線がノード形状を表している。



(a) Whole truss (b) Modular truss
Fig. 6 Stored Truss

モジュールの先端には、Fig. 7 に示すように薄い先端プレートを取り付ける。先端プレートを取り付けることで、モジュールの先端の形状を保つことが出来る。



Fig. 7 Tip plate

膜は Fig. 8 に示すように取り付け、Fig. 9 に示すように収納することが提案されている^[14].

ここまでのこれまで検討してきた内容である。この通り、オカルタの構成方法について、その概念は検討できているが、細部の具体的な設計はなされていなかった。

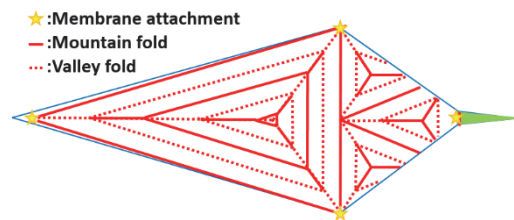


Fig. 8 Folding membrane

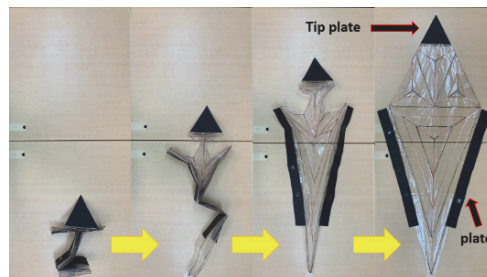


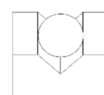
Fig. 9 Deployment flow of stored membrane

1.2. 研究目的

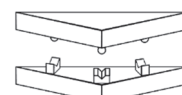
以上を踏まえ、本研究では、スターシェード技術実証ミッション「Euryops」に用いるモジュール型 SDMT を用いたオカルタが宇宙空間で適切に展開するための、各機構の構築方法を明らかにすることを目的とする。本稿では特に、オカルタの形状を保つために必要な膜取り付けの手法や先端プレートの収納展開法、オカルタが適切に展開するために構築される保持解放機構、モジュール結合機構について述べる。

2. 膜取り付け機構

Euryops では、オカルタの外形形状を理想形状から $\pm 1\text{mm}$ 以内にすることがミッション解析から分かっており、この形状精度の確保が重要な課題となっている。ここで、膜の形状精度には個々の部品の製造精度の他に、膜とノードの取り付け精度が大きな影響を与える。そこで、高い取り付け精度を達成するため、膜の取り付け部にキネマティックカップリングを用いる。これは二剛体間の 6 自由度を適切に拘束する技術であり、代表的なものとして、球と V 溝からなる 2 自由度拘束を 3 つ有する Maxwell/Boyes clamp が挙げられる(Fig. 10)。この場合、各ラッチで球が V 溝に沿って動くことが出来るので、ラッチ部の熱応力の発生を避けることができ、高精度な位置決めが可能であるため、宇宙展開構造物の高精度位置決め技術として研究が進められている^[15]。



(a) Sphere and V-shaped groove



(b) Maxwell/Boyes clamp

Fig. 10 Kinematic coupling

Euryops に用いる膜取り付け機構を Fig. 11 に示す。上部に取り付けられているナットの締め付けを調整す

ることで、膜取り付け部の押しつけ力を定め、高精度に位置決めすることが出来る。この取り付け機構を1モジュールのうち4か所のノードに取り付ける。

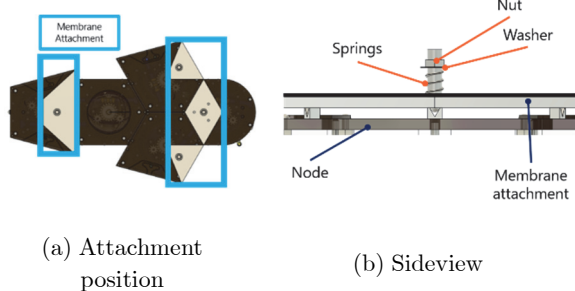


Fig. 11 Kinematic coupling of membrane attachment

3. 先端プレートの収納、展開方法

先端プレートの収納法を Fig. 12 に示す。先端プレートを2つに分け、折り曲げるように取り付け、紐で先端プレートを巻きつけることで収納する。これは、先端プレートがオカルタ衛星のバス部に干渉しないようにするためである。また、収納を保持する紐の張力を調整できるように、紐の固定部にターンバックルを取り付ける(Fig. 13)。ヒートカッターによって紐を溶断することで、先端プレートを展開させる。

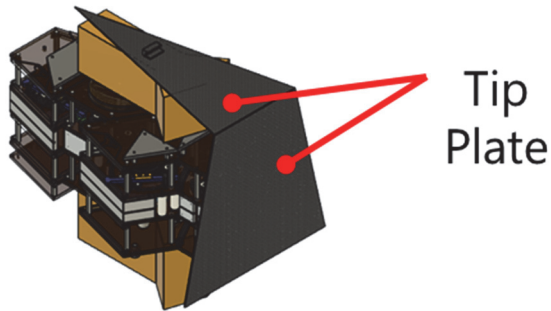


Fig. 12 Stored tip plate

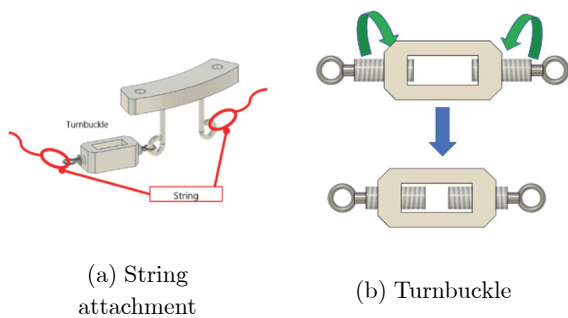


Fig. 13 String attachment and tension adjustment

オカルタには高い形状精度が求められるため、膜の取り付けと同様に、先端プレートの展開後の取り付け位置も高い精度が求められる。よって、膜の取り付けと同様に、先端プレートの展開後の取り付けにキネマティックカップリングを用いる。先端プレートを展開させ、ばねヒンジによる押しつけ力で、先端プレートの位置を高精度に決める(Fig. 15)。

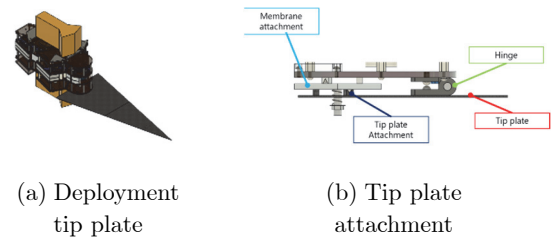


Fig. 14 Deployment tip plate

4. 保持解放機構

これまでに提案されたトラスの保持解放機構を Fig. 15 に示す^[13]。この保持解放機構は、根本部分を紐で固定し、ノードに取り付ける。この時、軸から伸びているアームに保持部の突起が引っかかることで、ハブの回転を保持する。開放する際、根本の紐を溶断し、保持解放機構に搭載されたバネによって保持部は押し上げられ、アームの固定が解放され、展開する。

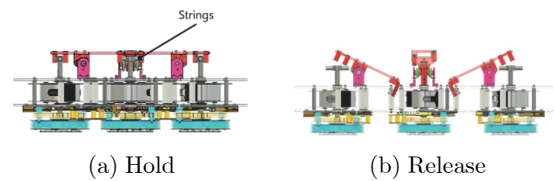


Fig. 15 Previous Hold and Release Mechanism

この保持解放機構の問題点として、保持を開放した際の、高さ方向の空間を確保しなければならない、結果的にノードないしは構造の高さが大きくなってしまいうということが挙げられる。

また、ロケットの振動などにより、保持部がアームから外れてしまう可能性がある。

そこで、Fig. 16, Fig. 17 エラー! 参照元が見つかりません。に示す通り、紐をガイドブロックに巻き付けることでノードを保持するタイプの保持解放機構を Euryops では採用する。また、地上で紐の張力を調整できるように、紐固定部にターンバックルを取り付ける。軌道上では展開時にヒートカッターを用いて紐を溶断する。紐を溶断すると歯車の回転に合わせて、バーが進展し、展開する(Fig. 17)。

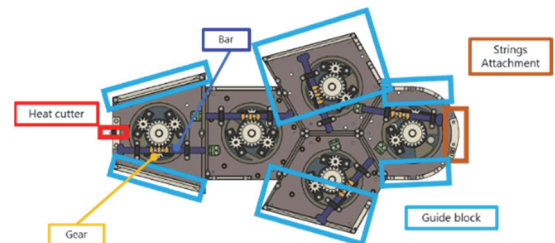


Fig. 16 HRM parts

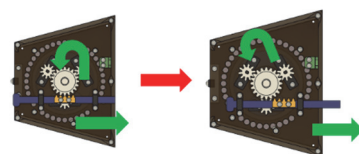


Fig. 17 Release phase

これまでの保持解放機構と異なり、ノードを高くする必要が無く、振動による影響もこれまでの保持解放機構に比べて少ないと考えられる。ただし、溶断後の紐がブームと干渉し、展開の影響を与える可能性があるため、ガイドブロックや壁を用いて、ハブ、ブームに紐が干渉しないように設計した。

5. モジュール間結合機構

各モジュールを用いて、オカルタ全体を構築するためには、各モジュール間を結合する必要がある。Fig. 18 に示す通り隣り合うモジュール間を結合することで、オカルタ全体を構築する。

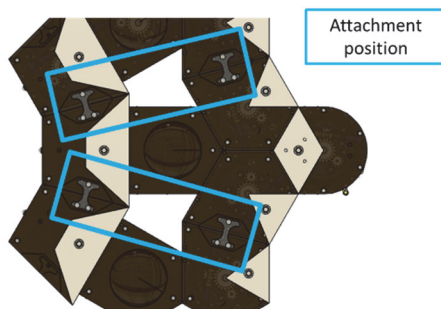


Fig. 18 Module attachment position

オカルタは高い形状精度が求められ、膜面はノードに取り付けられるため、結合部の誤差が大きく影響する。ノードに結合部品をはめ込むための溝があり、そこに結合部品をはめ、ネジ止めを行う。結合部品はFig. 19に示すようにH型になっている。この形状にしたのは、展開時に、モジュール間に作用する応力を低減するためである。



Fig. 19 Module attachment parts

6. 結論

本稿では、スターシェード技術実証ミッション「Euryops」に用いるモジュール型SDMTを用いたオカルタの各機構の構築する方法を示した。具体的には、軌道上で実現可能性が高い膜取り付け機構、先端プレート、保持解放機構、モジュール間結合機構を検討した。今後は、提案した機構を用いて、地上や微小重力下において展開実験を行うとともに、設計パラメータが鏡面制度に与える影響の感度解析を行うことで、提案した機構の妥当性を示す。

参考文献

[1] S. Seager, The Search for Extrasolar Earth-like Planets, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 208, 2003, pp.113-124

[2] C.M.A. Deccia, et.al: Surfing the L2 Gradient with The Starshade in Search of Extraterrestrial Life. AIAA-2016-5666, 2016.

[3] W. Cash: Detection of Earth-like planets around nearby stars using a petal-shaped occulter. Nature, Vol. 442, 2006, pp.51-53.

[4] R. J. Vanderbei, et.al.: Optimal Occulter Design for Finding Extrasolar Planets. The Astrophysical Journal, Vol. 665, No.1, 2007, pp.794-798.

[5] The Probe Scale Science and Technology Definition Teams of NASA's Astrophysics Division: Exo-S: Starshade Probe-Class Exoplanet Direct Imaging Mission Concept, Final Report. 2015
https://exoplanets.nasa.gov/internal_resources/788/.

[6] The Probe Scale Science and Technology Definition Teams of NASA's Astrophysics Division: Exo-S: Starshade Probe-Class Exoplanet Direct Imaging Mission Concept, Final Report. 2015.

[7] NASA Jet Propulsion Laboratory: HabEx Final Report. 2019. <https://www.jpl.nasa.gov/habex/pdf/HabEx-Final-Report-Public-Release-LINKED-0924.pdf>

[8] W. Cash, et.al.: The New Worlds Observer: The Astrophysics Strategic Mission Concept Study. Proc. the SPIE, Vol. 7436, 2009, pp. 743606-743606-14.

[9] J. Kolmas, et.al.: System design of a miniaturized distributed occulter/telescope for direct imaging of star vicinity. IEEE Aerospace Conference, 2016, pp.1-11.

[10] M. Fukunaga, et. al.: Application of Self-Deployable Truss to Starshade, 69th International Astronautical Congress, IAC-18-C2.2.2, 2018.

[11] S. Shitara, S. Kataoka, A. Kawashita, Y. Miyazaki, Concept Design of Occulter Using Modular Self-Deployable Membrane Truss, AIAA 2020-1182, 2020.

[12] 中村壮児, スターシェード技術実証衛星「Euryops」のミッション検討, 第20回宇宙科学シンポジウム, p1.70, 2020, .

[13] 設楽翔一, モジュール型自己展開膜面トラスを用いたオカルタの概念設計, 令和元年度日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2020, p36-p50, p70-71.

[14] 川下彩夏, 自己展開構造で構成されるオカルタに用いる膜とその収納方法の検討, 令和元年度日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業論文, 2020, p16-18.

[15] 田中宏明他: キネマティックカップリングを用いたアンテナ鏡面の高精度設置と位置姿勢調整, 第31回宇宙構造・材料シンポジウム講演集, A07, 2015.