

3次元自己展開トラスと網を用いたデブリ捕獲装置の提案及び 網とデブリの接触解析

Proposal of Debris Capture Device Using 3D Self-Deployable Truss with Net and Contact Analysis of Net and Debris

宮崎・山崎研究室

Miyazaki-Yamazaki Laboratory

松浦 颯

Hayate Matsuura

In order to solve the debris issue around the earth such as low earth orbit in recent years, the authors decided the object to be removed by analyzing orbital environment. In addition, we devised an active debris removal device using a 3D Self-Deployable Truss, made a simple modeling at the contact part of the net and target debris.

1. 序論

1.1. 軌道環境問題と能動的デブリ除去

近年、低軌道(LEO, 高度約1500km まで)や中軌道(MEO, 低軌道から高度約36000km まで)、静止軌道(GEO, 高度約36000km)などの地球周回軌道上の宇宙ゴミが放置され続ける事で、軌道上の宇宙機との衝突の危険性が高まる事が、世界中で危惧されている^[1]。

そのような状況がありつつも、宇宙開発に伴い、低軌道などのさらなる利用が考えられている。その中でも、衛星コンステレーションは、軌道上デブリの数に大きなインパクトを与える。これは主に、超小型人工衛星の商業的価値が高まる例として挙げられるが、特に、メガコンステレーションと呼ばれる膨大な数の人工衛星を利用したコンステレーション構想^[2]は、超小型衛星だけでなく、他のサイズの衛星も用いている。例として、Space X 社の将来、質量100-500kgの小型衛星を400機ほど高度650kmのLEOに配置する構想が挙げられる^[3]。

そこで、近年、能動的デブリ除去(Active Debris Removal; ADR)と称して、軌道環境修復のための多くの方法・技術が提案されている。

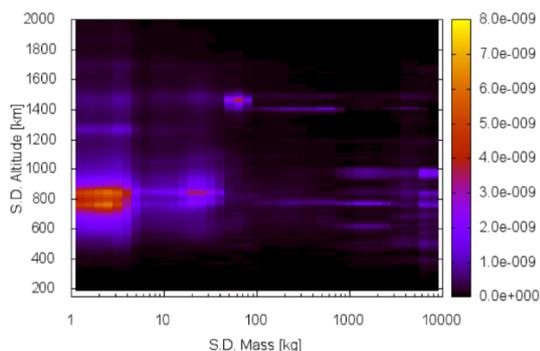


Fig.1 Mass and Altitude colored by 3D special density distribution in 2016 (ESA, MASTER v8.0)^[4]

ここで、筆者らが ADR を考える上で、軌道環境の定量的な理解のために、ESA によって作成された MASTER v8.0 を用いて解析した質量および高度ごとのデブリの密度分布(Fig.1)より、およそ高度400kmから1200kmの間に、およそ質量1kgから100kg、700kgから1000kg周辺に密集していることが分か

る。また、国や機関などの研究では、比較的大型の衛星やロケットの残骸をデブリ除去の対象としていることが多く、比較的小型・中型のデブリは取り上げられることは少ない。

1.2. 様々な能動的デブリ除去装置・技術

現在、ADR のための様々な方法・技術が研究・開発されているが、それぞれに長所・短所が見受けられる。その中でも、ネットを用いた捕獲方法(Net Capturing)の一般的な特徴は、Table 1 のように考えられている^[5]。

Table 1 Overview of Net Capturing^[5]

No.	Advantages	Disadvantages
1.	Large capturing distance is allowable.	It is heard to control the motion of the net.
2.	Requirements on precision are relatively lax.	There is a risk of critical oscillations
3.	The system is compatible with various size of debris	It is hard to test on ground

なお、これらの方法は、それぞれが開発途中であり、現状では、最善の方法・技術というものがない。

1.3. 自己展開構造と3次元自己展開構造トラス

筆者らは、Bi-convex Boom (Fig.2) などの自己伸展力を持つ部材を用いた自己展開トラスを有する宇宙構造物に関する研究を行っている。

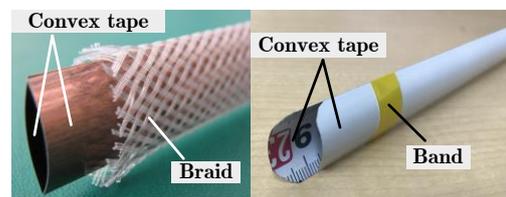
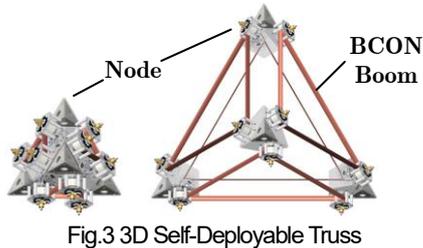


Fig.2 Bi-convex Boom

自己展開構造は、ロケットの打ち上げ時に収納状態をとることで、より小さい体積で輸送できることに加え、展開のためのアクチュエータが不要であるという展開方式の簡素さ、収納されていた部材が展開後にある程度の剛性を保つことから、宇宙構造物への適用が考えられる構造様式である。自己展開構造を ADR に適用する場合、対象のデブリを捕獲した際、部材のブ

ームが座屈などの変形を引き起こす事はあっても、部材の破壊までは起こしにくいことなど、構造上のメリットが大きい。

その中でも、3次元自己展開トラス構造(3DSDT, Fig.3)という構造様式は、高い空間的収納効率をもつことが、他の自己展開構造に比べて優れていると考えられる^[6]。



2. 3次元自己展開トラスと網を用いたデブリ捕獲装置の提案

2.1. 目的

これらの背景から、本研究は、現在、低軌道に存在するミッションを終了した質量 700kg 以下の衛星を能動的に除去するに十分な 3次元自己展開トラス構造を用いたデブリ除去装置(Debris Capture Device using 3D Self-Deployable Truss; DCD-3DSDT)を提案し、その設計を行うことを目的とする。

2.2. 3次元自己展開トラスを用いたデブリ除去装置の提案

3次元自己展開トラス構造を適用したデブリ除去装置では、部材の1つとして、網を採用する。選定理由としては、軽量かつ、収納のしやすさ、対象デブリの動きに対して柔軟に変形できること、膜とは違い、せん断が加わり裂かれてしまっても節点の間で収まることなどが挙げられる。

これらの理由より、筆者らは、Fig.4 に示すような網と3次元自己展開トラス構造を適用したデブリ除去装置を検討している。

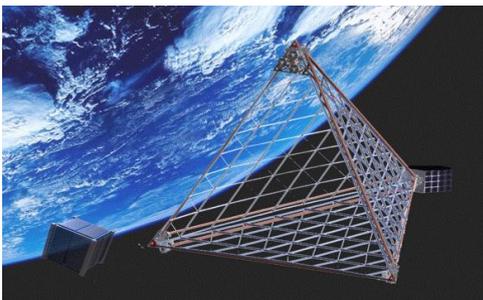


Fig.4 Debris Capture Device using 3D Self-Deployable Truss

Table 1 と比較すると、この DCD の特徴としては、前述の構造としての利点の他に、例として、近接距離での捕獲のため、対象のデブリの状態を捕獲直前まで近距離で判断できること、それにより、無理な捕獲を行うことを避けることが出来る点、DCD 自体の軽量性・収納効率により、複数の DCD さえあれば、複数のターゲットを一回の打ち上げで除去することが可能でコストを抑えることが出来る点、などが挙げられる。

2.3. 現状のDCD-3DSDTIによるADRの流れ

現在、筆者らは、以下(Fig.5)のように ADR を行うことを考えている。まず、打ち上げられた軌道(①Launch Phase)から、

対象のデブリの存在する軌道まで遷移(①Chaser Transfer Orbit Phase)し、対象に近づいたら相手の状態を観察して、適切な条件で接近(②Rendezvous Phase)する。開口部を対象デブリに向けながら、適切な相対速度(相対加速度)で、DCD 内に対象を取り込む。対象全体が DCD 内に収まったと判別後、DCD 開口部を締める操作に移る(②Capturing Phase)。デブリとチェイサー衛星の振舞いが安定したことをカメラやセンサなどで確認後、デオービット操作(③De-orbit / Re-entry Phase)を行う。

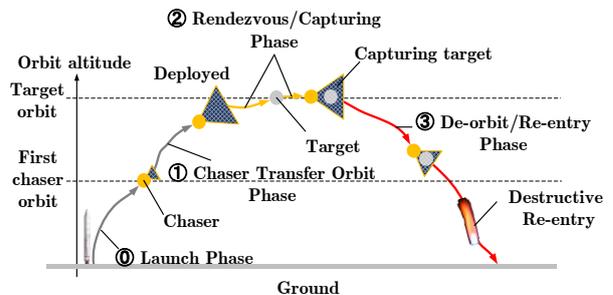


Fig.5 ADR Frigate Sequence of DCD using 3D-SDT

上記のような ADR を行うに当たっては、対象デブリまでの最適な軌道の決定、それに伴う必要な推進系燃料の見積もり等も併せて検討する必要がある。

3. 網とデブリの接触解析

3.1. 目的

Fig.5 で示したようなミッションを満たす DCD-3DSDT の構造を考える上で、対象のデブリとキャプチャーの摩擦や衝突といった運動を理解する必要がある。デブリ捕獲運動時の接触に関する運動により、部材がどれだけ変形するか、変形が構造全体にどのように影響を与えるか、どのような構造パラメータが効いてくるかなどを考えるため、網やブーム・ノードを含む DCD-3DSDT と対象デブリの接触部のモデル化をはじめとした接触解析を行う必要がある。

したがって、デブリとキャプチャーの運動を理解・予測する必要があり、本研究の目的は、DCD-3DSDT について、部材(網、ブーム等)とデブリの接触部のモデル化を行い、その接触解析をすることである。

3.2. 理論

本節では、開発中のデブリ捕獲運動の解析コードについて説明する。簡単のため、対象デブリの形状を剛体の直方体とする。なお、接触については網の節点でのみ考えるが、網自体はケーブル要素(分布質量)で考える。解析に当たり、記号を Table 2 のように定義する。

Table 2 Nomenclature

\mathbf{x}_1	デブリ剛体の位置ベクトル $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_d$
\mathbf{x}_3	質点の位置ベクトル $\mathbf{x}_3 = \mathbf{x}$
\mathbf{R}	絶対座標系での姿勢マトリクス
\mathbf{R}_d	物体座標系での姿勢マトリクス
a	デブリ剛体の1辺の長さの半値
\mathbf{S}	デブリ剛体の回転増分マトリクス
$\boldsymbol{\alpha}$	デブリ剛体の回転増分の修正ロドリゲスベクトル
β	修正ロドリゲスベクトル $\boldsymbol{\alpha}$ の半値
γ	質点とデブリ剛体が衝突する際の減衰係数
k	質点が剛体に接触する時のバネ定数
\mathbf{K}	ヤコビアン
\mathbf{F}	接触力
\mathbf{u}^h	変位の半値

剛体と質点の位置関係を Fig.6 に示す。

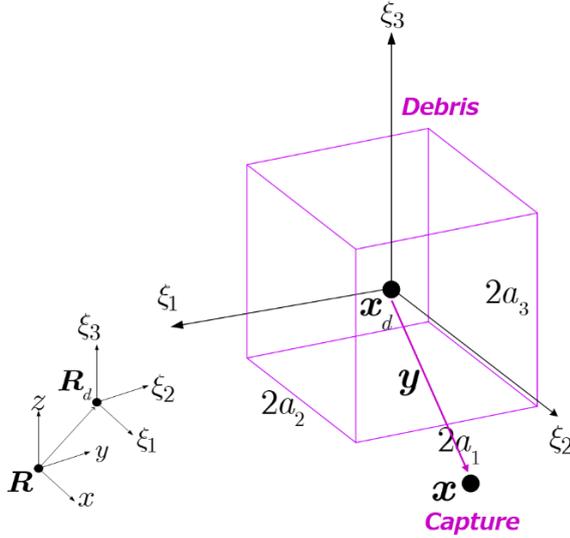


Fig.6 Simple Model for Contact Section

このとき、物体座標系(Debris)から見た質点(Capture)の位置ベクトルは、

$$\mathbf{y} = \mathbf{R}^T \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1 = \mathbf{R}_o^T \mathbf{S} \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。

次に、質点が剛体に接触するとき、すなわち、質点が剛体の面に接触し、剛体内部の領域に入り込もうとするとき(Fig.7), 接触面への質点の侵入距離に対して、ペナルティ・ポテンシャルを設定する。

$$V = \frac{\eta_i k}{2} y_i - \alpha^2 \quad (2)$$

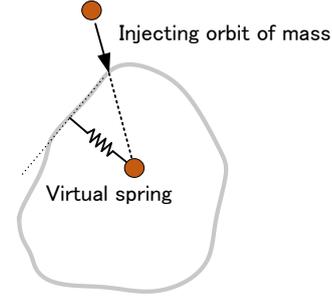


Fig.7 The virtual spring force that works when the mass point touches the rigid body

ただし、 α は次式で表される。

$$\alpha = \begin{cases} -\alpha_i & \text{if surface} : -i \\ +\alpha_i & \text{otherwise surface} : +i \end{cases} \quad (3)$$

である。

運動解析には、EMM(Energy Momentum Method)を用いる。この場合、ペナルティ・ポテンシャルの増分 ΔV は

$$\begin{aligned} \Delta V &= \begin{bmatrix} \frac{3\eta_i + \eta_{oi}}{8} k y_i - \alpha \\ \frac{3\eta_{oi} + \eta_o}{8} k y_{oi} - \alpha \\ \frac{\eta_i - \eta_{oi}}{8} k y_i + y_{oi} - 2\alpha^2 \end{bmatrix} y_i - y_{oi} \\ &= \tilde{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{y} \end{aligned} \quad (4)$$

と書けて、

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{y} &= \Delta \mathbf{R}^T \bar{\mathbf{x}}_3 - \bar{\mathbf{x}}_1 + \bar{\mathbf{R}}^T \Delta \mathbf{x}_3 - \Delta \mathbf{x}_1 \\ &= -\bar{\mathbf{R}}^T \Delta \boldsymbol{\alpha} \bar{\mathbf{x}}_3 - \bar{\mathbf{x}}_1 + \bar{\mathbf{R}}^T \Delta \mathbf{x}_3 - \Delta \mathbf{x}_1 \\ &= -\bar{\mathbf{R}}^T \Delta \mathbf{x}_1 + \bar{\mathbf{R}}^T \bar{\mathbf{x}}_3 - \bar{\mathbf{x}}_1 \Delta \boldsymbol{\alpha} + \bar{\mathbf{R}}^T \Delta \mathbf{x}_3 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{i}_i^T \Delta \mathbf{y} \equiv \Delta \mathbf{z}_m^T \left(\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{z}_m} \right)^T \quad (6)$$

であることから、以下ようになる。

$$\Delta V = \Delta \mathbf{z}_m^T \left(\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{z}_m} \right)^T \tilde{\mathbf{F}} \equiv \Delta \mathbf{z}_m^T \mathbf{F}_m \quad (7)$$

次に、EMMを用いる際、減衰を加えることで、運動を減衰することが出来て、エネルギーは確実に減少する。いま、減衰を、

$$\gamma y_i - y_{oi} \quad (8)$$

とすると、減衰を考慮した場合は、

$$\tilde{\mathbf{F}}_i^* = \tilde{\mathbf{F}}_i + \gamma y_i - y_{oi} \quad (9)$$

より、

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_m^* &= \left(\frac{\partial y_i}{\partial \mathbf{z}_m} \right)^T \tilde{\mathbf{F}}_i^* = \left(\frac{\partial y_i}{\partial \mathbf{z}_m} \right)^T \tilde{\mathbf{F}}_i + \gamma y_i - y_{oi} \\ &= \mathbf{F}_m + \left(\frac{\partial y_i}{\partial \mathbf{z}_m} \right)^T \gamma y_i - y_{oi} \end{aligned} \quad (10)$$

となり、離散運動方程式は、慣性力 \mathbf{F}_m^I を用いて、

$$\mathbf{F}_m^I + \mathbf{F}_m^* = \mathbf{F}_m^I + \mathbf{F}_m + \left(\frac{\partial y_i}{\partial \mathbf{z}_m} \right)^T \gamma y_i - y_{oi} = \mathbf{0} \quad (11)$$

であり、エネルギー増分は、

$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta \mathbf{z}_m^T \mathbf{F}_m^I + \mathbf{F}_m = -\Delta \mathbf{z}_m^T \left(\frac{\partial y_i}{\partial \mathbf{z}_m} \right) \gamma y_i - y_{oi} \quad (12) \\ &= -\Delta y_i \cdot \gamma \Delta y_i = -\gamma \Delta y_i^2 < 0 \end{aligned}$$

となり、エネルギー増分が負であるから、運動は減衰することが分かる。

4. 結果

減衰項を加えていない場合、すなわち、力学的エネルギーが保存されていることを確認する。このときのグラフを Fig.8 に示す。

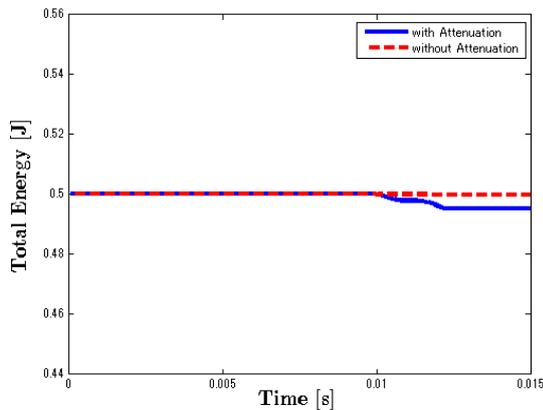


Fig.8 Total Energy (with or without Attenuation)

Fig.8 より、全体の力学的エネルギーは、時間変化に対し、一定であることが分かる。また、時刻 0.01[s] 付近に着目すると、減衰項を加えた場合の力学的エネルギーは、時間変化に対して、減衰していることが分かる。

5. 考察

Fig.8 より、力学的エネルギーの時間変化が一定であるから、力学的エネルギーが保存されていることが分かる。さらに、エネルギーがデブリとキャプチャーが衝突するごとに、力学的エネルギーが減少していることが分かる。よって、減衰項の有無により、衝突による力学的エネルギーの減少を確認できることが分かった。また、本来、衝突する時の食い込み量は 0 であるならば、衝突時の運動は、完全弾性反発と仮定することが出来て、このとき、力学的エネルギーは保存される、しかし、実際には、完全弾性衝突であることはなく、先述のような減衰を引き起こす、すなわち、物体に多少の食い込みなどが生じていることが考えられる。

また、質点が剛体に接触する時のペナルティ・ポテンシャルにおけるバネ定数 k の値によって、力学的エネルギーの振舞いどのように変化するかを Fig.8 に示す。バネ定数 k の値を大きくすると、減衰の影響は小さくなり、逆に小さくすると、減衰の速さと大きさの影響が大きくなる。これは、バネ定数 k が与えるポテンシャル・エネルギーに比例することが式

から容易に分かるが、物理的には、仮想的なバネの剛性が強いほど、衝突時の食い込み量が大きく、そのときに生じるエネルギーも大きくなることで、減衰が大きくなったと考えられる。

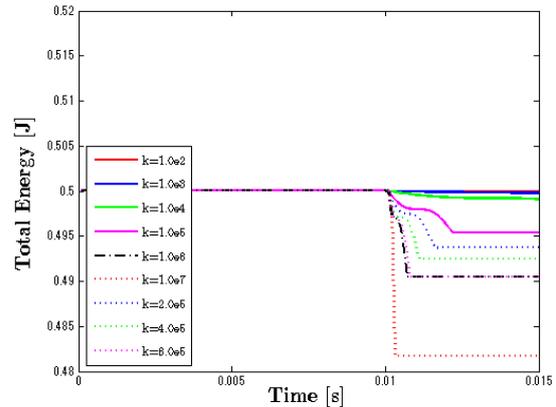


Fig.9 Difference of Total Energy in attenuation by Spring Constant k

6. 結論

軌道上サービスの動向などの背景や軌道環境の解析などから、除去対象のデブリを決定し、それに対する現状の 3 次元自己展開トラス構造と網を用いたデブリ捕獲装置を提案した。また、それに伴い、網とデブリの簡単なモデル化、及び、衝突時の減衰などを考慮した接触解析を行い、バネ定数などの観点から力学的エネルギーの振舞いについて考察した。今後は、網のモデル化を質点からケーブル要素(分布質量)に発展させるなど、開発中のデブリ捕獲運動の解析コードを完成させたいと考えている。

謝辞

本研究は文科省・科研費 18H03817 の補助を受けて行われました。

参考文献

- [1] Kessler, D. J. and Burton G. Cour-Palais, Collision Frequency of Artificial Satellites, The Creation of a Debris belt, Journal of Geophysical Research, 83, 1978.
- [2] Shiki Kitajima, Shuji Abe, Toshiya Hanada, Satomi Kawamoto, Influences of MEGA Constellations on the Orbital Environment, The 7th JAXA Space Debris Work Shop, 2016.
- [3] 趙孟佑, 超小型人工衛星の現状と将来, 九州工業大学 超小型衛星試験センター, 2015 年.
- [4] Sven K. Flegel, Johannes Gelhaus, Marek Mockel, Carsten Wiedemann, Holger Krag, Heiner Klinkrad, Peter Vorsmann, Multi-Layer Insulation Model for MASTER-2009, Acta Astronautica, 2009
- [5] Minghe Shan, Jian Guo, Eberhard Gill, Review and comparison of active space debris capturing and removal methods, Progress in Aerospace Sciences, 80, pp.18-32, 2016.
- [6] Marco M. Castronuovo, Active space debris removal-A preliminary mission analysis and design, Acta Astronautica, 69, pp.848-859, 2011.
- [7] 河原林大思, 宮崎康行, 三次元自己展開トラスの概念と微小重力下における展開特性, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4286, 2016 年.