

第31回衛星設計コンテスト

アイデアの部 ミッション概要書

1. 作品情報・応募者情報

作品名 3次元可動型永久磁石姿勢制御衛星 GIMIC
副題 ジンバル構造を用いた3次元可動型永久磁石による新しい姿勢制御システム実証衛星 GIMIC (Gimbal style Magnetic attitude Control)
学校名 高知工業高等専門学校

2. ミッションの概要

超小型衛星に使える、新しい姿勢制御方式を提案する。この方式は、強力な磁場を持つ小型ネオジウム永久磁石を、ジンバル構造により衛星の構体の中で3次元的に動かし、地球磁場との相互作用で得られるトルクにより衛星の姿勢制御を行うものである。この永久磁石の方向を一度設定すると、衛星の構体の任意の方向を地球の磁力線に沿わせることが可能となり、その後の姿勢維持は無電力で行うことができるという大きなメリットがある。

3. ミッションの目的と意義

(a) 目的

CubeSatのような超小型衛星においては、姿勢制御をするのはスペースや電力の関係で極めて難しい。本ミッションでは、2UサイズのCubeSatとなる実証衛星GIMICを提案する。このGIMIC衛星は、ジンバル構造を用いた3次元可動型永久磁石による新しい姿勢制御システムということで、「Gimbal style Magnetic attitude Control」の略となる衛星名としており、巧妙な仕掛けという意味の「gimmick」の発音に似せて呼ぶことにしている。このGIMIC衛星の姿勢制御の仕組みは、衛星の構体の中で、強力な磁場を持つ小型ネオジウム永久磁石をジンバル構造により3次元的に動かし、地球磁場との相互作用で得られるトルクにより姿勢制御を行うものである。つまり、永久磁石のN極S極の方向は地球の磁力線に沿うという簡単な原理により、衛星の構体の中の永久磁石の方向を任意の方向に設定すると、永久磁石の軸方向が地球の磁力線方向に沿うことにより姿勢を変えることができ、その後の姿勢維持は無電力で行うことが可能になるという大きなメリットがある。本ミッションでは、GIMIC衛星によりこの新しい姿勢制御システムの実証実験を行う。

(b) 重要性・技術的、社会的意義等

永久磁石を衛星構体内で3次元的に動かすことができる仕組みを小さな容積で実現することができると、CubeSatのような超小型衛星でもアクティブな姿勢制御が可能となる。一般的には、コイルを巻いた電磁石を3軸で用意することにより姿勢制御を行う方法があるが、3軸のコイル電流の制御が複雑で容易ではない。また、姿勢制御がうまくいっていることを磁場センサやジャイロセンサ、そしてカメラ画像で確認する必要もある。これに対して、本ミッションの方式では、確実に衛星構体内の永久磁石の軸方向が、地球の磁力線に沿うことになるので、姿勢を安定にすることが短時間に実現できる。

応用例としては、(1)北極や南極の極域において、2U-CubeSatの長手方向(Z軸方向にカメラを搭載)に、永久磁石の軸方向を向けることにより、極域の地表画像やオーロラ画像を安定に撮影が可能となる。(2)中緯度の日本上空で衛星構体から出ているモノポールアンテナの軸を、衛星構体内の永久磁石の方向に合わせることで、アンテナの軸の直交方向となるアンテナの指向性を地上方向に常時向けることができ、安定な通信が可能となる。(3)赤道上空の地面と地球の磁力線が並行な場所では、スラスタをつけたCubeSatの場合、スラスタの噴射方向を地球の磁力線方向と合わせることができれば、進行方向への加速が可能となり、CubeSatの軌道寿命を伸ばすという新しい試みが可能となる等、様々な応用が考えられる。以上のことから、構体内の永久磁石の方向を動かす時以外は、消費電力がいらぬ方式であるために、CubeSatのような超小型衛星での実用的な姿勢制御方式として貢献できると考えている。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム

図1のように、3Dプリンタで作成した球の中に10×10×20mmの角形ネオジウム磁石（表面磁束密度が556mT）を埋め込み、この永久磁石が入った球形構造を垂直方向に180度、水平方向に360度動かす。このために、サーボモータを用いたジンバル構造を採用した。一般的なサーボモータは、180度までの精密な回転が可能であることから、垂直方向のギア比は1、水平方向のギア比を2にすることにより、それぞれ180度と360度の回転ができるようにした。このシンプルな仕組みにより、サーボモータの角度を制御するPWM信号などを、衛星に搭載されているマイコンから送ることにより、永久磁石を3次元的に動かすことが可能となる。この3次元可動型永久磁石モジュールを収納する箱のスペースは、48×40×77mmと小型化を実現している。

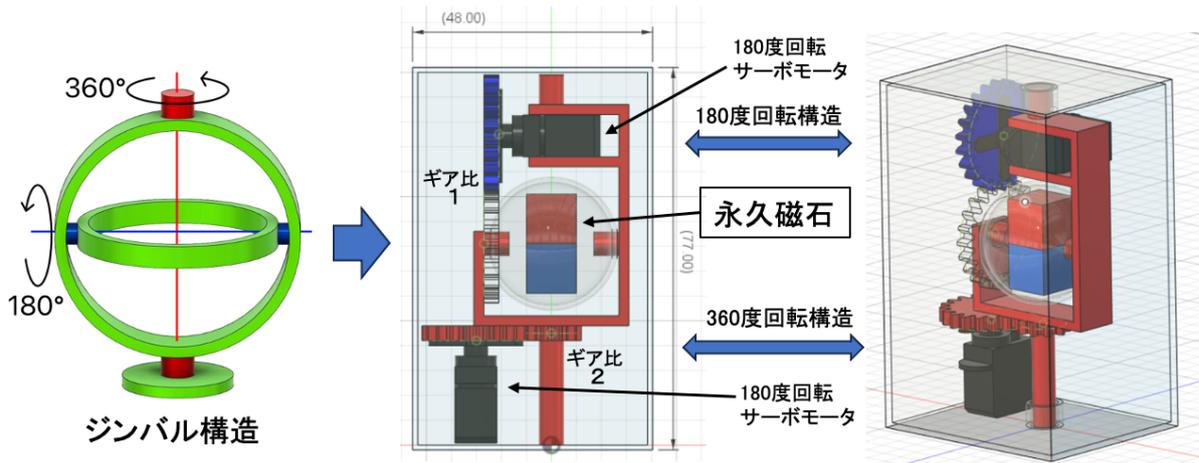


図1 3次元可動型永久磁石の構造図（2つのサーボモータを組み合わせたジンバル構造のもので球の中に埋め込まれている永久磁石を3次元的に動かすことが可能）

(b) 具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

図2は、GIMIC衛星（2U-CubeSat）に3次元可動型永久磁石モジュールを搭載した構造図である。衛星の構体の重心の位置に、3次元可動型永久磁石モジュールを配置しており、Z軸方向に永久磁石を向けると、図3のように、極軌道の場合に北極付近では、Z軸方向に向いているカメラ（図4、図5参照）で北極方向の撮影が可能である。また、南極付近では、永久磁石を180度回転することにより磁石の極性を反転させて同様の撮影が可能となる。また、カメラの部分の代わりに、Z軸方向に噴射するスラスタを搭載することにより、赤道付近を周回する時に噴射することにより、進行方向の加速が可能となり、軌道寿命の伸ばすことが可能となる。さらに、Y軸方向にモノポールアンテナを突き出す場合には、Y軸方向に永久磁石を向けることにより中緯度の日本上空でアンテナの指向性を確保することができ、地上との安定な通信の確保が可能となる。

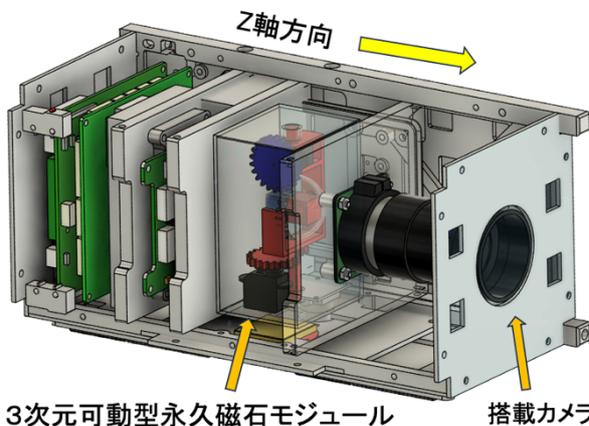


図2 GIMIC衛星に搭載された3次元可動型永久磁石

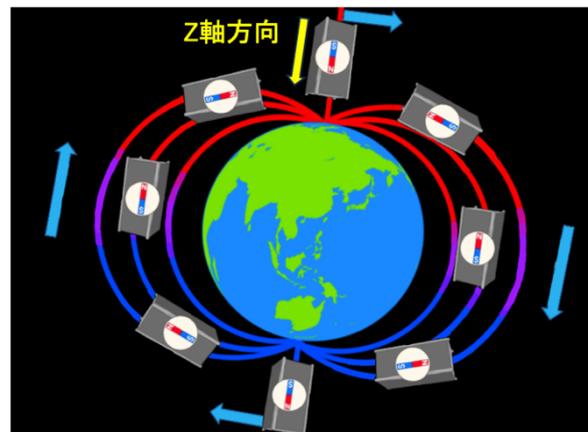


図3 極軌道の場合のGIMIC衛星の姿勢



図 4 GIMIC 衛星の外観

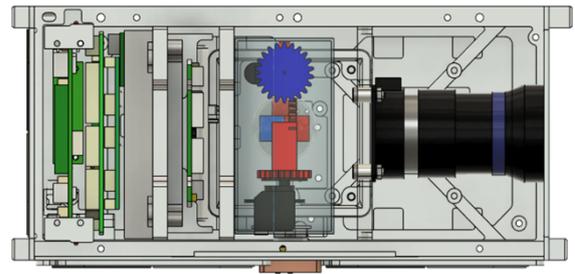


図 5 GIMIC 衛星の搭載カメラの位置

実現のための課題としては、この 3 次元可動型永久磁石モジュールの耐振動性、耐衝撃性を実際に打ち上げる衛星の仕様に合わせて、地上の環境試験で確認し、汎用的に使われる衛星搭載部品として確立させることがあげられる。また、この 3 次元可動型永久磁石モジュールだけでは難しい永久磁石の軸方向のスピンを完全に止めるためには、補助的にコイルによる 3 軸磁気トルカも併用が必要になるので、その制御方法の確立も重要であると考えている。

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

永久磁石の N 極が、地球の北磁極に向くというのは、地球の磁力線方向と永久磁石の軸方向が一致するように永久磁石にトルクが働くことによるものである。とても簡単な原理であるので、水槽に強力な磁場を発生する小型のネオジウム永久磁石を浮かべることにより、様々な実験を行って、その特性を調べてきた。図 6 は、水槽を使って 3 次元的に永久磁石を動かすための実験装置で、球形容器の中に永久磁石を入れて、バランスをとって沈めることにより、3 次元可動型永久磁石の基礎的な実験が可能であることを確認している。本ミッションで提案するモジュールも、図 7 のように 8cm の球形の中に、制御するマイコンやバッテリーを入れて、無線 LAN (WiFi) で外部制御する仕組みも考案し、今後、これを活用して各種姿勢制御の実験を行い実用化していく予定である。このように、多くの独創的なアイデアの組み合わせで 3 次元可動型永久磁石モジュールが生まれたことになる。

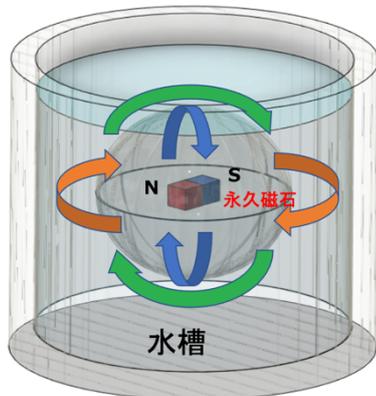


図 6 水槽の中に永久磁石の入った球体を沈める実験装置

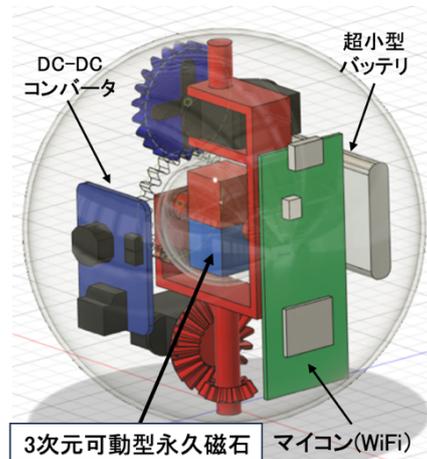


図 7 8cm の球形の中に入るモジュールを考案 (下の部分は小型化のため笠歯車を使用)

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

CubeSat のような超小型衛星でもアクティブな姿勢制御が、3 次元可動型永久磁石で可能となることを示した。また、姿勢制御を維持するだけの場合は、電力が全くいらぬというのは超小型衛星においては非常に大きなメリットとなる。提案する新しい姿勢制御システムは、非常に簡単な構造で実現できることから、今後、様々な超小型衛星に応用されていくと考えており、波及効果は大である。また、理科の永久磁石の実験でも、このような新しい実験装置を使うことにより、3 次元的な地球の磁力線を理解する上で貢献できるのではないかと考えている。

以上

第3 1回衛星設計コンテスト アイデアの部 解析書

3次元可動型永久磁石姿勢制御衛星 GIMIC

高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 2年
西岡美文、澤本蒼太、中川陽菜、福原颯馬、溝淵遥人

1. 背景

2021年11月9日に、国立高専10校により開発された国立高専初の2U-CubeSatとなるKOSEN-1衛星が打ち上げられた。この衛星には、姿勢制御に3軸磁気トルカと、衛星に搭載されるのは初めてとなるデュアルリアクションホイール（以下、DRW）が採用されている。この磁気トルカは、3軸のコイルに電流を流すことで磁気モーメントを発生し、その地球磁場との相互作用により、衛星にトルクを発生させ、姿勢を制御する仕組みである。図1は、KOSEN-1衛星の3軸磁気トルカ（3つの角形コイル）とDRWの配置について示している。

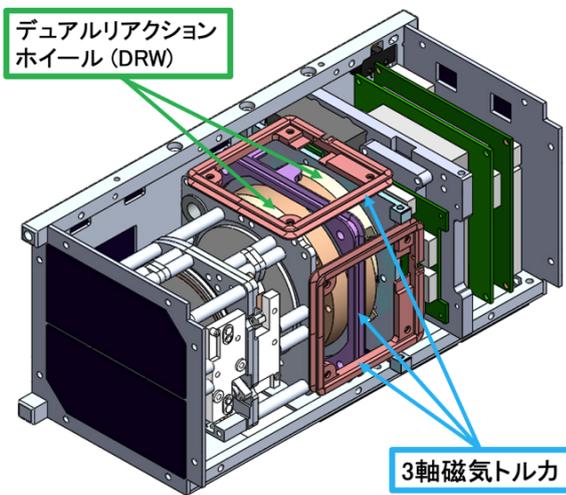


図1 KOSEN-1衛星搭載の3軸磁気トルカとデュアルリアクションホイール (DRW)

一方、この磁気トルカに挟まれた形で収納されているのがDRWで、平面モータを2つ組み合わせた構造になっている。DRWは、2つの平面モータを同時に逆回転させた場合、トルクが打ち消されるが、時間をずらして回転させることにより、先に回転した方向のトルクにより姿

勢角を変えることが可能で、実際のミッションとして、宇宙での実証実験にも成功している。

この2つの平面モータには、それぞれ8個の強力なネオジウム磁石がN極とS極を互い違いに配置されており、本来ならば、平面モータを構成するネオジウム磁石は、お互いにキャンセルするはずであったが、アンバランスがあり、DRW全体が一つの永久磁石になるような、残留磁気モーメント（数100 μ Tと想定）を持つことになった。つまり、DRWが停止している状態では、衛星の構体内のある方向に永久磁石が取り付けられて固定している状態が続いていることになる。図2は、衛星構体の短面方向に、永久磁石が固定されている場合に、極軌道の衛星が地球を一周した場合の地球磁場のトルクによる姿勢の変化を示したものである。

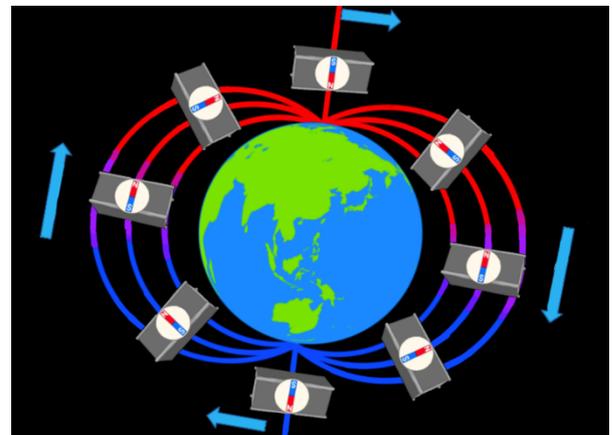


図2 KOSEN-1衛星の周回のイメージ

図3は、KOSEN-1衛星の磁場センサーとジャイロ（回転角）センサーにより、地球を一周（96分）した時間の磁場変化（単位は μ T）と回転角（単位は1秒あたりの回転角度 deg）の変化を示している。(a)の磁場変化を見ると、全磁場強度となる B_{tot} が北極と南極付近で60 μ T

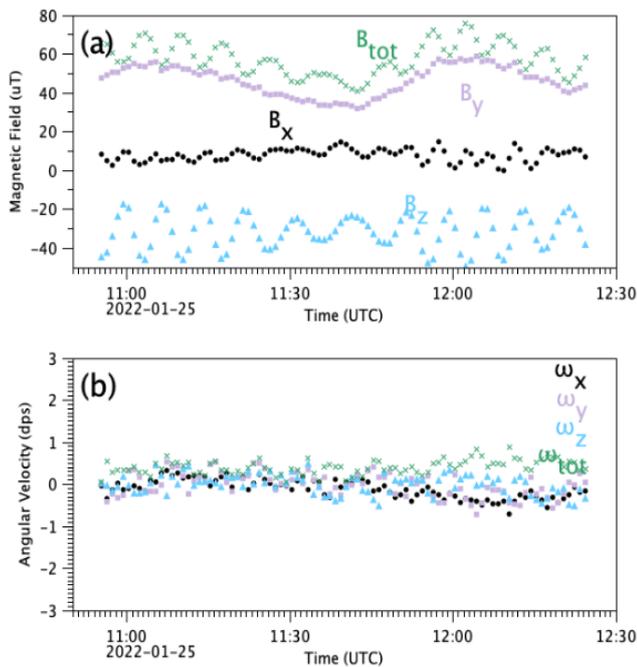


図3 KOSEN-1衛星での地球1周(96分)の間
の(a)磁場の変化、(b)回転角の変化

と大きくなっているパターンが、磁場の y 成分 (B_y) の変化パターンによく似ていることがわかる。また、(b) の回転角のデータによると回転角 (ω) は、1 秒あたり 1 度以下ということがわかる。また、磁場の z 成分 (B_z) や x 成分 (B_x) が 7 分ほどの周期性を持っていることもわかる。

以上のことから、図 2 のように Y 軸方向に、永久磁石となる磁石の軸方向が向いており、Y 軸を中心として XZ 面内で 7 分位でゆっくりと回転 (約 420 秒程で 1 回転) していると解釈することができる。

このように、永久磁石を搭載した衛星は、永久磁石の軸方向が、地球の磁力線に沿うようにトルクを受けながら移動することになるので、永久磁石の方向を 3 次元的に積極的に動かすことにより、CubeSat のような超小型衛星の姿勢制御に使えるのではないかと考えた。

一方、従来の 3 軸磁気トルカ方式は、コイルを巻いた電磁石を 3 軸で用意することにより姿勢制御を行う方式であるが、3 軸のコイル電流の制御が複雑で容易ではない。また、姿勢制御がうまくいっていることを磁場センサやジャイロセンサ、そしてカメラ画像で確認する必要も

ある。これに対して、本提案の方式では、確実に衛星構体内の永久磁石の軸方向が、地球の磁力線に沿うことになるので、姿勢を安定にすることが短時間に実現できる。

2. 目的と意義

CubeSat のような超小型衛星においては、姿勢制御をするのはスペースや電力の関係で極めて難しい。本ミッションでは、2U サイズの CubeSat となる実証衛星 GIMIC を提案する。この GIMIC 衛星は、ジンバル構造を用いた 3 次元可動型永久磁石による新しい姿勢制御システムということで、「GImbal style Magnetic attItude Control」の略となる衛星名としており、巧みな仕掛けという意味の「gimmick」の発音に似せて呼ぶことにしている。この GIMIC 衛星の姿勢制御の仕組みは、衛星の構体の中で、強力な磁場を持つ小型ネオジウム永久磁石をジンバル構造により 3 次元的に動かし、地球磁場との相互作用で得られるトルクにより姿勢制御を行うものである。つまり、永久磁石の N 極 S 極の方向は地球の磁力線に沿うという簡単な原理により、衛星の構体の中の永久磁石の方向を任意の方向に設定すると、永久磁石の軸方向が地球の磁力線方向に沿うことにより姿勢を変えることができる。そして、その姿勢維持は無電力で行うことが可能になるという大きなメリットがある。本ミッションでは、GIMIC 衛星によりこの新しい姿勢制御システムの実証実験を行う。

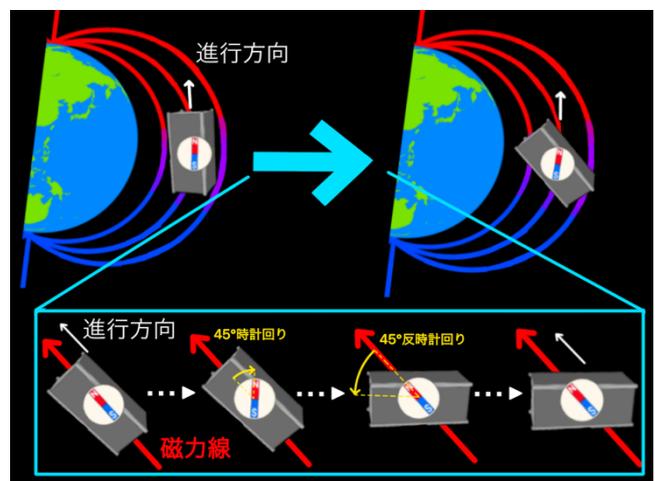


図4 GIMIC衛星の姿勢制御のイメージ

図 4 は、地球の赤道面付近で地球の磁力線が地面と並行になっている位置で、衛星の構体内の永久磁石を 45 度傾けた場合の、構体の動きを示したものである。ここで注意しなくてはならないのは、永久磁石の軸方向は定まるが、軸方向での回転の制御はできないことである。

この 3 次元可動型永久磁石による姿勢制御の応用例としては、(1)北極や南極の極域において、2U-CubeSat の長手方向 (Z 軸方向にカメラを搭載) に、永久磁石の軸方向を向けることにより、極域の地表画像やオーロラ画像を安定に撮影が可能となる。(2) 中緯度の日本上空で衛星構体から出ているモノポールアンテナの軸を、衛星構体内の永久磁石の方向に合わせることで、アンテナの軸の直交方向となるアンテナの指向性を地上方向に常時向けることができ、安定な通信が可能となる。(3) 赤道上空の地面と地球の磁力線が並行な場所では、スラスタをつけた CubeSat の場合、スラスタの噴射方向を地球の磁力線方向と合わせることができれば、進行方向への加速が可能となり、CubeSat の軌道寿命を伸ばすという新しい試みが可能となる等、様々な応用が考えられる。さらに、構体内の永久磁石の方向を動かす時以外は、消費電力がいらぬ方式であることから、CubeSat のような超小型衛星での実用的な姿勢制御方式として貢献できると考えている。

3. 3次元可動型永久磁石の実験

3次元可動型永久磁石を実現するために、地上での実験を行った。実験に使用する永久磁石は、10mm×10mm×20mm の角形ネオジウム磁石で、表面磁束密度が 556mT と入手できるものとしては最も強力なものである。このように強力な磁石を用いたのは、地球の磁場との相互作用によるトルクを大きくすることにより、応答速度を早くして実験を行いたいからである。

また、3次元的に永久磁石を動かすための実験装置として、図 5 のような水槽を使って、球形容器の中に永久磁石を入れて、バランスをとって沈めることにより、3次元的に自由に動か

せるものを考えた。また、図 6、図 7 のような 8cm の球の容器内に収納できる 3次元可動型永久磁石実験モジュールを考案した。

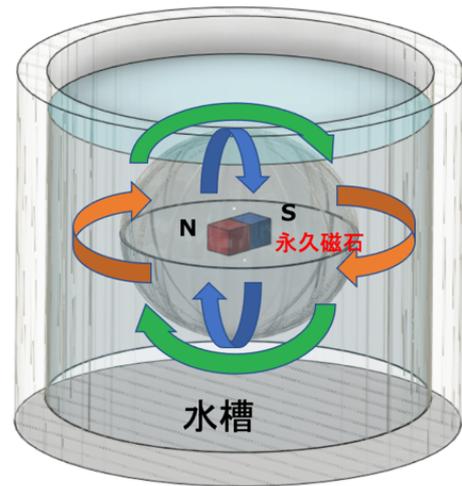


図 5 水槽の中に永久磁石の入った球を沈める実験装置

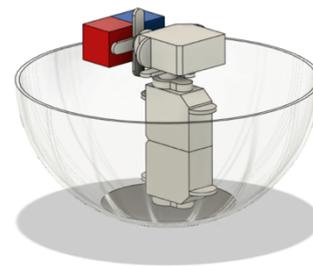


図 6 180度可動サーボモータ 3個を使った 3次元可動型永久磁石の半球モデル

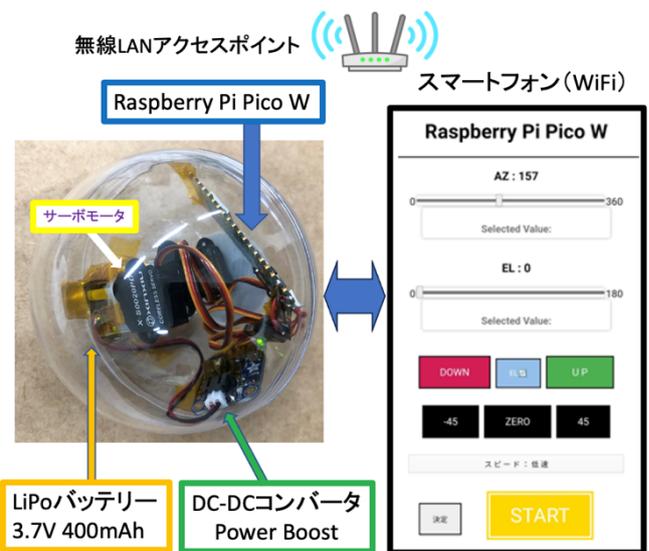


図 7 実際に図 6 のモデルを実装したもの

図 6 で示すように、永久磁石を動かすために使用するサーボモータは、180 度までしか精密に動かすことができないので、3 つのサーボモータを使って、図 7 のように実装した。この球形の容器に入れたサーボモータの制御には、Raspberry Pi Pico W を使用し、無線 LAN を経由して Web サーバ上に仮想コントローラを構成し、スマートフォンのブラウザ上で操作できるようにした。永久磁石の動かす方向は、Azimuth(方位角)は 360°、Elevation(仰角)は 180°の可動範囲で、全方向への正確な方向制御が実現できるようにした。実際の実験では、磁石が北の方向を維持しながら、球体の姿勢が 3 次的に動くことを確認した。また、重心を変えずに永久磁石が回転することが姿勢制御の上で重要であることもわかった。図 8 は、後述の 3 次元可動型永久磁石モジュールの入った水槽での実験用の最新のモデルとなっている。

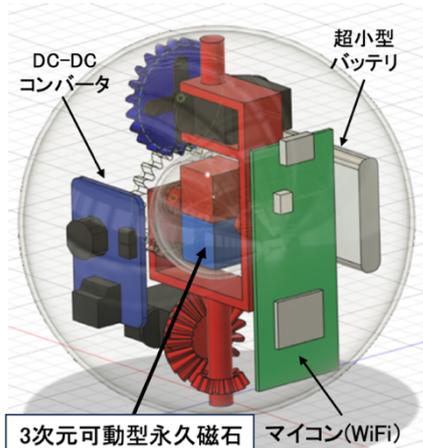


図 8 8cm の球形の中に入るモジュール
(下の部分は小型化のため笠歯車を使用)

4. GIMIC 衛星の概要

4.1 3 次元可動型永久磁石モジュール

実際に衛星に搭載する 3 次元可動型永久磁石モジュールの構造は、3D プリンタで製作する球形に永久磁石を入れ、それらを外側からジンバル構造により回転させることで、機械やほかの部位への永久磁石による影響を軽減させている。

ジンバルとは、1 つの軸を中心として物体を回転させる回転台の一種で、本モジュールでは図 9 のような 2 軸のジンバルを使用している。

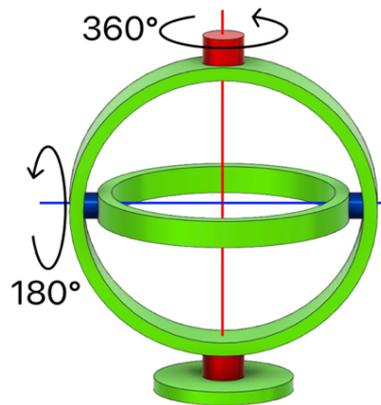


図 9 ジンバル構造

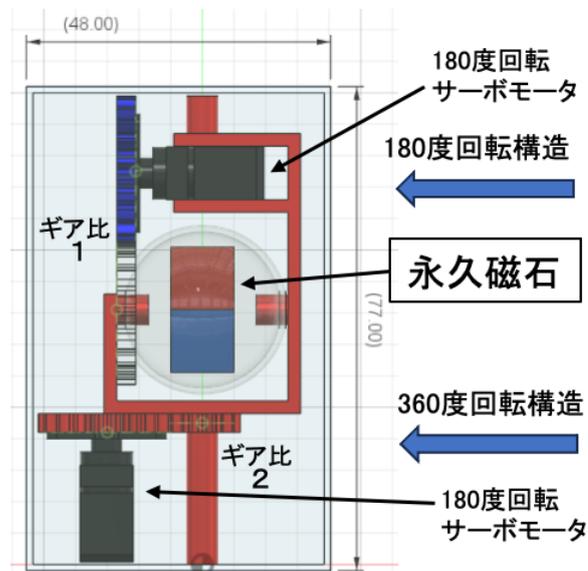


図 10 3 次元可動型永久磁石モジュールの構造

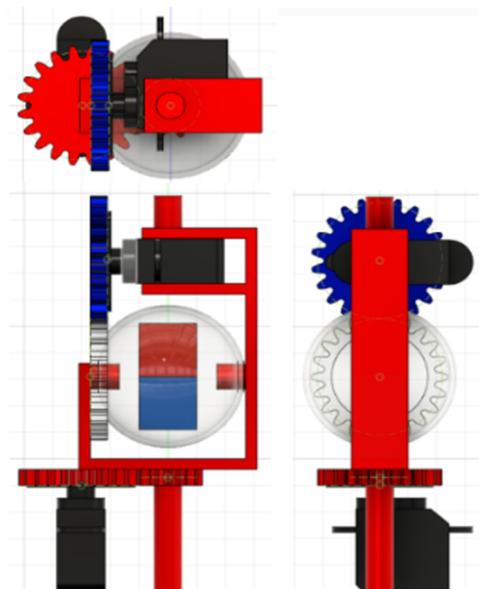


図 11 モジュールの三面図
(正面図・平面図・右側面図)

図 10 と 11 は、3次元可動型永久磁石モジュールの構造と三面図で、赤の部品は縦軸、青の部品は横軸に関連している。黒の部品はサーボモータで、球体の中心に永久磁石を取り付けている。この球体には、片方の側面を歯車と一体化することで、余分なスペースを省いている。また、サーボモータは 180° しか回転しないため、 180° の回転のみ必要とする横軸は歯車の比（ギア比）を 1:1 にし、縦軸は 360° を必要とするため、2:1 に設計している。

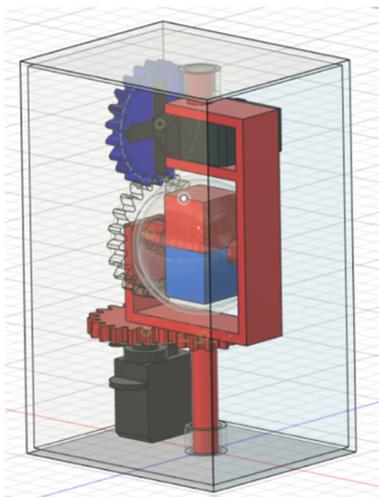


図 12 モジュールを収納するケースの構造

今回設計した 3次元可動型永久磁石モジュールを収納するケースのサイズは、図 12 のような $40\text{mm} \times 48\text{mm} \times 79\text{mm}$ の直方体である。それぞれの部品の大さは、中の球体が半径 12.5mm 、横軸の歯車の大さがどちらも半径 11mm 、縦軸の歯車は、本体側の歯車の半径が 5mm 、モータ側の歯車の半径が 10mm となっており、歯車のモジュールは全て 1mm 、厚さは 3mm となっている。使用する永久磁石は、 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 20\text{mm}$ の角形ネオジウム磁石で、表面磁束密度が 556mT のものである。

このシンプルな構造により、サーボモータの角度を制御する PWM 信号などを、衛星に搭載されているマイコンから送ることにより、永久磁石を 3 次的に動かすことが可能となる。このモジュールの実際の製作には、3D プリンタを使って行うことになるが、すでに水槽での実験装置の製作で実績がある。

4.2 GIMIC 衛星の構造

図 13 は、GIMIC 衛星の構造で、2U-CubeSat の重心の位置に 3次元可動型永久磁石モジュールが搭載されている。例えば、この図の Z 軸方向に、永久磁石の N 極を向けているとすると、図 14 のように極周回軌道を衛星が移動している場合は、地球の磁力線に沿った方向に姿勢を変えていくことがわかる。

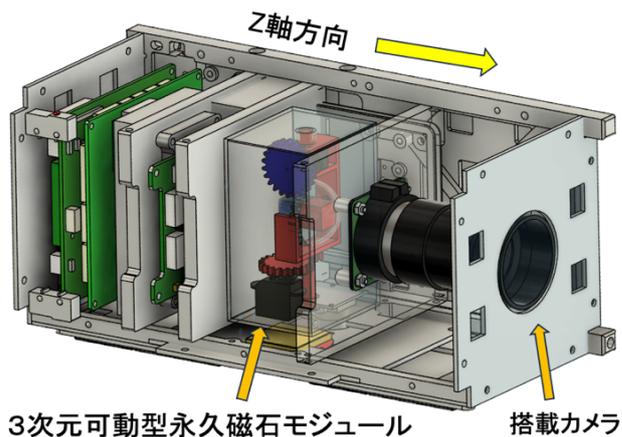


図 13 GIMIC 衛星の構造

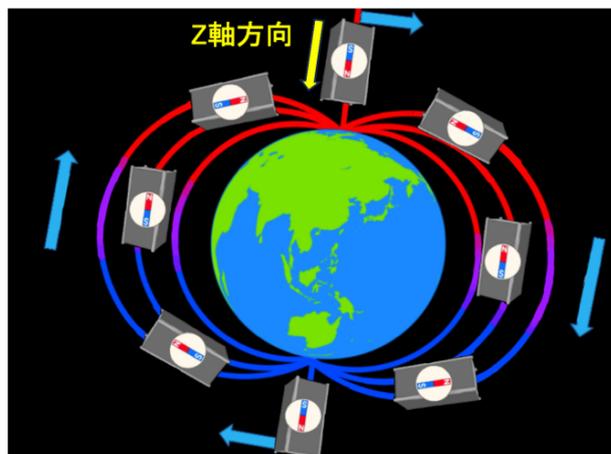


図 14 GIMIC 衛星の姿勢

例えば、地球の北極付近に GIMIC 衛星が位置する場合は、図 14 のように Z 軸方向が地球の北磁極を向くことになる。GIMIC 衛星は、図 15 のように、Z 軸方向に望遠カメラを搭載する構造となっており、北極付近での地表の撮影や、オーロラなどの現象の撮影が周回軌道を一周する度に行うことができる。また、南極付近での

カメラ撮影の場合は、永久磁石の方向を 180 度反転することにより向けることが可能となる。

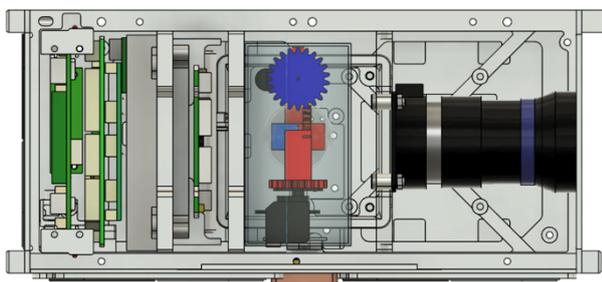
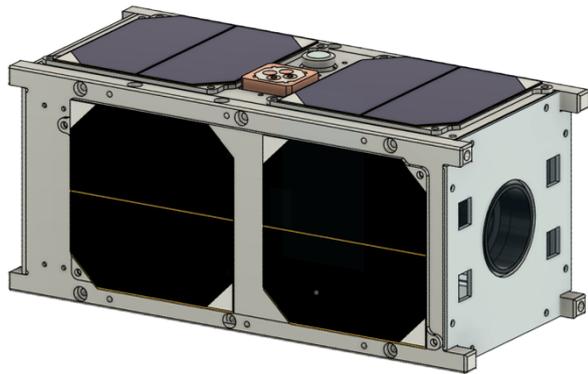


図 15 GIMIC 衛星の外観と搭載カメラの位置

GIMIC 衛星に搭載するカメラは、OBC が Raspberry Pi であることから、次の仕様の Raspberry Pi HQ カメラ (図 16) を使用する。

【Raspberry Pi HQ カメラの仕様】

- Sony IMX477R、積層型裏面照射型センサ、12.3 メガピクセル、対角長 7.9 mm センサ、画素サイズ：1.55 μm \times 1.55 μm
- 出力：RAW12/10/8、COMP8
- バックフォーカス：2.5 mm–22.4 mm
- レンズ規格：C マウント、CS マウント



図 16 Raspberry Pi HQ カメラの外観

GIMIC 衛星では、Z 軸方向に向けた望遠カメラを搭載しているが、望遠カメラの部分を PPT (Pulsed Plasma Thruster) 推進システムにすることも考えられる。これは、図 17 のような独自開発の超小型ローコスト PPT 推進システムにより軌道寿命の長期化を可能とする次世代 CubeSat 実証衛星 (KOSEN-3) の計画が進んでいるからである。この場合、Z 軸方向に噴射するスラスタを搭載し、赤道付近を周回する時に噴射することにより、進行方向の加速が可能となり、軌道寿命の伸ばすことが可能となる。

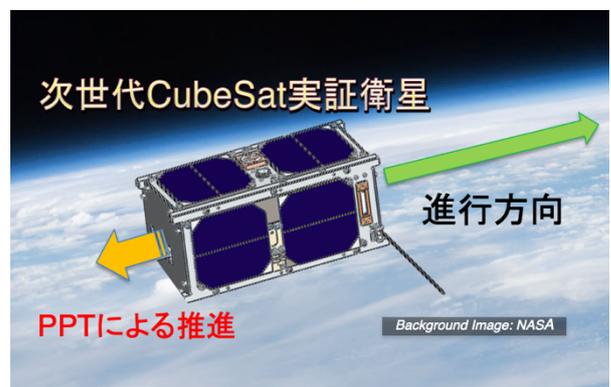


図 17 PPT (Pulsed Plasma Thruster) 推進システムを搭載予定の KOSEN-3 衛星

5. 今後の課題

本ミッションでは、姿勢制御のために強力な永久磁石であるネオジウム磁石を使用している。これはトルクを大きくできること、消費電力が削減できること、制御が行いやすいというメリットがある反面、永久磁石であるがゆえに衛星に搭載されている他の機器への影響も考えられる。解決策としては、問題のある機器を磁気遮断シートで覆うなどの方法があげられる。

また、永久磁石の強度によって姿勢の単振動が起こる場合がある。これは、衛星の構造や重量に関係しており、実際に 3 次元可動型永久磁石を搭載する場合は、様々なシミュレーションが必要になると考えている。前述の水槽に浮かべた実験では、数十秒で磁力線に沿うことが確認できているが、実際の衛星に 3 次元可動型永久磁石を搭載する場合、衛星の重心の位置にう

まく合わせることができるかが重要なポイントで、さらに大きな水槽を使って、CubeSat のサイズの実験装置を作って実験を行っていくことにより、より高度な姿勢制御も可能になっていくと考えている。それから、永久磁石の軸方向は定まるが、軸方向での回転の制御はできない点については、コイル方式の 3 軸磁気トルカを併用することにより、より細かな姿勢制御を行うことができると考えている。

実用化の課題としては、この 3 次元可動型永久磁石モジュールの耐振動性、耐衝撃性を実際に打ち上げる衛星の仕様に合わせて、地上の環境試験で確認し、汎用的に使われる衛星搭載部品として確立させることがあげられる。

応用例としてあげられている、「(1)北極や南極の極域において、極域の地表画像やオーロラ画像を安定に撮影が可能となる。」については、磁極が北と南に一つあるというユニーク性をうまく使ったもので、極域の科学に役に立てるのではないかと考えている。また、「(2) 中緯度の日本上空で衛星構体から出ているモノポールアンテナの軸を、衛星構体内の永久磁石の方向に合わせることで、安定な通信が可能となる。」については、超小型衛星の地上との通信を安定化する一つ的手段として、いろいろな活用ができるのではないかと考えている。さらに、「(3) 赤道上空の地面と地球の磁力線が並行な場所では、スラスタをつけた CubeSat の場合、スラスタの噴射方向を地球の磁力線方向と合わせることができれば、進行方向への加速が可能となり、CubeSat の軌道寿命を伸ばすという新しい試みが可能となる。」については、GIMIC 衛星の実証実験の結果が重要なポイントになると考えている。

6. まとめ

CubeSat のような超小型衛星でもアクティブな姿勢制御が、3 次元可動型永久磁石で可能となることを示した。また、姿勢制御を維持するだけの場合は、電力が全くいらぬというのは超小型衛星においては非常に大きなメリットとな

る。提案する新しい姿勢制御システムは、非常に簡単な構造で実現できることから、今後、様々な超小型衛星に応用されていくと考えており、波及効果は大である。また、理科の永久磁石の実験でも、本提案の新しい実験装置を使うことにより、3 次元的な地球の磁力線を理解する上で貢献ができるのではないかと考えている。

7. 参考文献

- [1] ジンバル (Wiki)
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ジンバル>
- [2] 磁気トルカを用いた小型衛星の姿勢制御の可制御性について
<https://miyazaki-u.repo.nii.ac.jp/record/2946/files/KJ00005630139.pdf>
- [3] 小型衛星の 1 軸磁気トルカによるダンピング制御と重力傾度姿勢安定システム
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsass/53/616/53_616_224/_pdf
- [4] 【Raspberry Pi Pico W】無線 LAN 機能の使い方完全ガイド
<https://sozorablog.com/raspberry-pi-pico-w-review/>
- [5] Raspberry Pi HQ Camera
<https://www.switch-science.com/products/8128>
- [6] 高専衛星プロジェクト
<http://space.kochi-ct.jp/kosen-sat/>
- [7] 高専生たちが生んだ衛星 KOSEN-1 宇宙へ
<https://wedge.ismedia.jp/articles/-/26784>
- [8] 革新的衛星技術実証 2 号機 実証テーマ KOSEN-1
<https://www.kenkai.jaxa.jp/kakushin/kakushin02.html#kosen1>
- [9] 高専衛星 KOSEN-1 宇宙技術実証に成功！
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000148.000075419.html>
- [10] 超小型衛星「KOSEN-3」、JAXA の革新的衛星技術実証 5 号機の実証テーマに決定
<https://spacemedia.jp/news/730>