

超小型飛翔体用姿勢制御装置 Control Moment Gyro (CMG)

東京電機大学 理工学部 電子工学系
准教授 田中 慶太

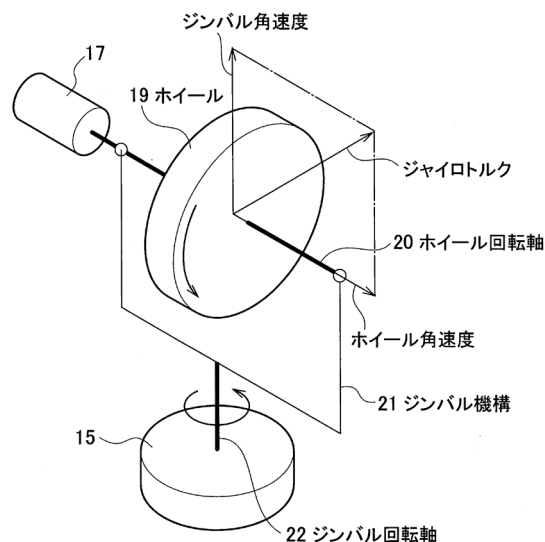
2019年10月24日

新技術概要

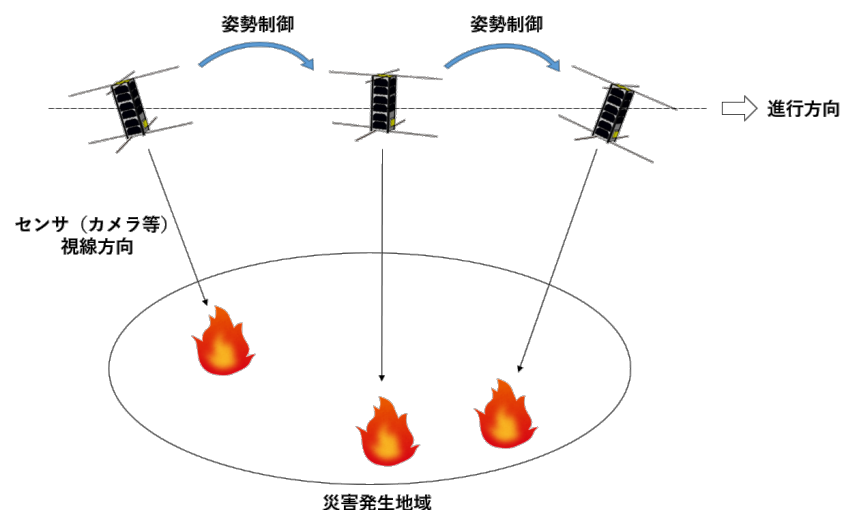
- 一般の人工衛星・大型の宇宙機には、Control Moment Gyro (CMG)が用いられることが多く超小型衛星に対しては、その機構の複雑さに起因する擾乱が原因によりトルク分解能が劣り、姿勢制御精度が低いという課題があった。
- 本技術は、CMGの課題であった特異点回避によって悪化する姿勢制御精度を補償する機能を発明した。

CMG(Control Moment Gyro)とは

- CMGとは、ジンバル軸の回転によってホイールの回転の向きを変更することにより得られるトルク（ジャイロ効果）により、姿勢を制御するアクチュエータ。
- 出力トルクが大きく、高速な姿勢制御が可能（ドローンに転用可能）。
- 軌道上での実証が成功すれば世界初の事例。
- 国際宇宙ステーション(ISS)で使用されている姿勢制御方法を超小型衛星に適用。
- 災害監視・安全保障の分野において、多地点観測に有効。
- 同一方向に視野を固定できることから、通信の回線保持に有効。

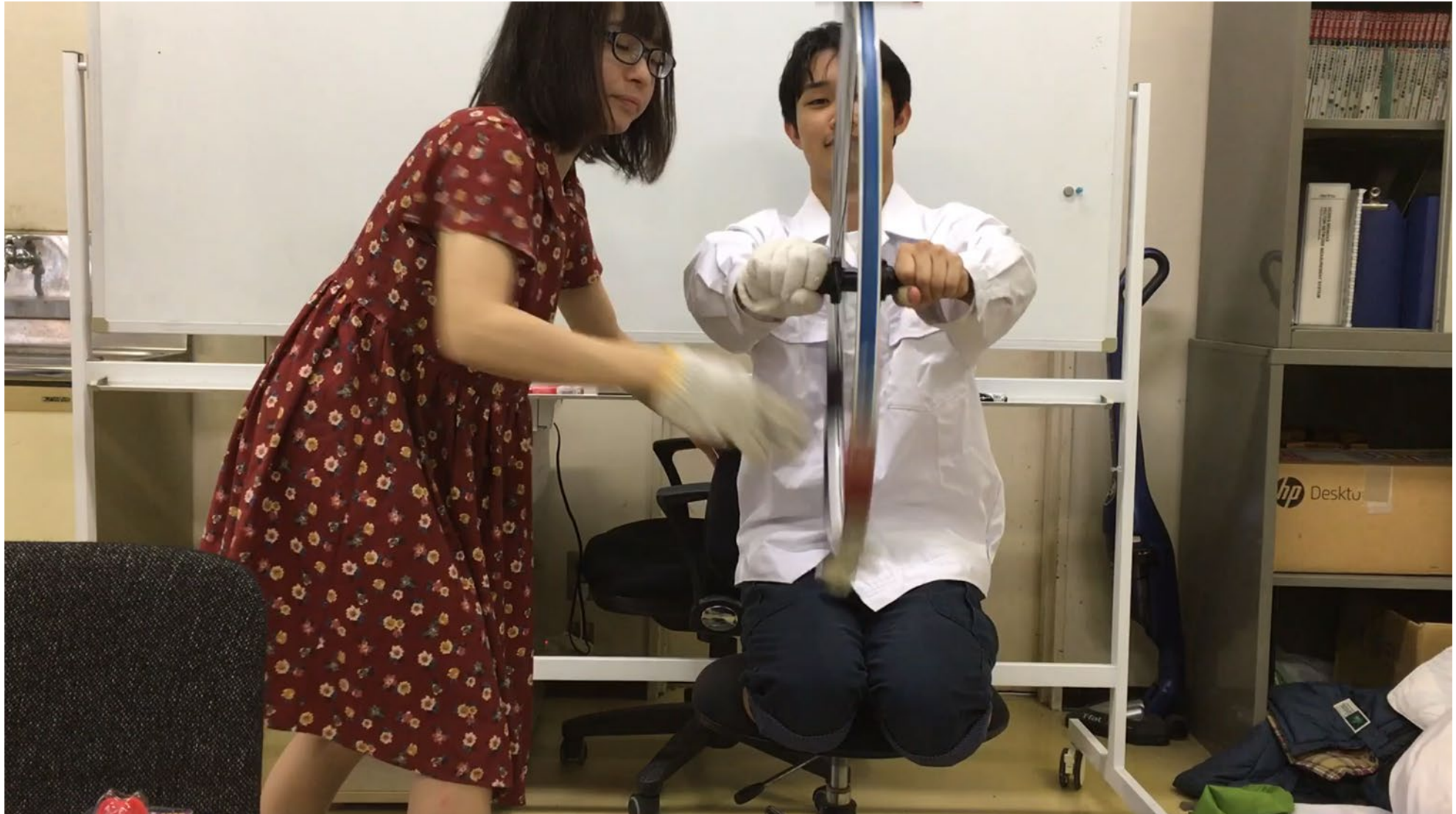


CMGの原理



出力トルク 大 . . . 高速な姿勢制御が可能. ト
トルク分解能 低 . . . 姿勢制御精度が低い.

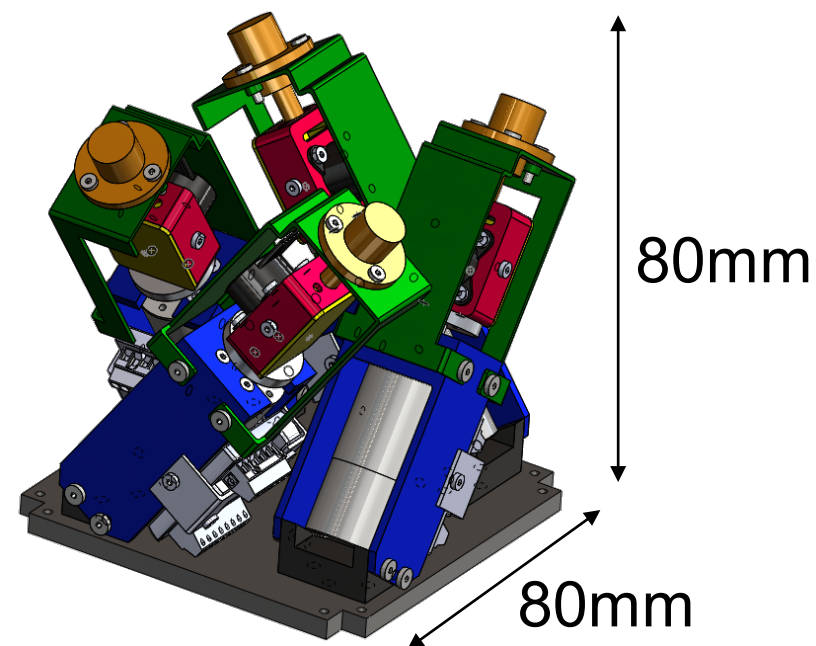
CMG(Control Moment Gyro)とは



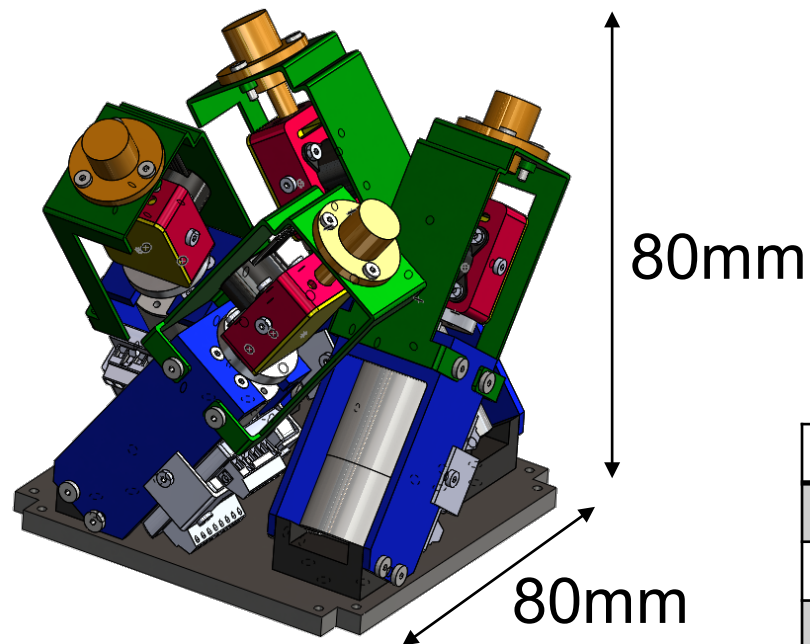
CMG(Control Moment Gyro)

4基のCMGをピラミッド型に配置する形を採用する.

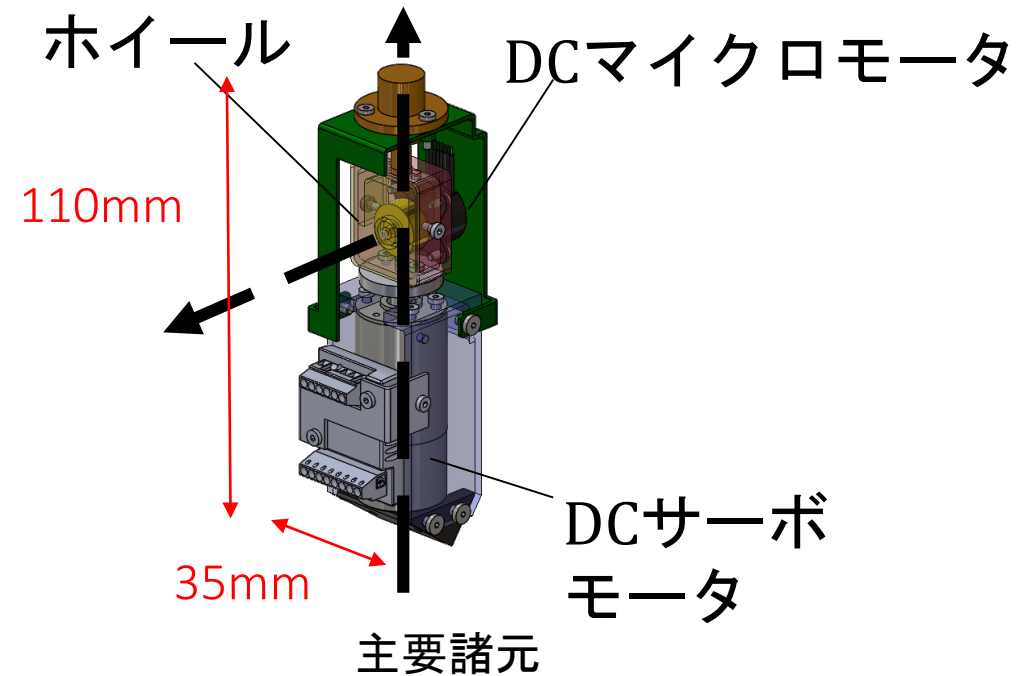
- 構造が比較的単純
- より高トルクが出力可能
- 冗長性の確保



CMG(Control Moment Gyro)

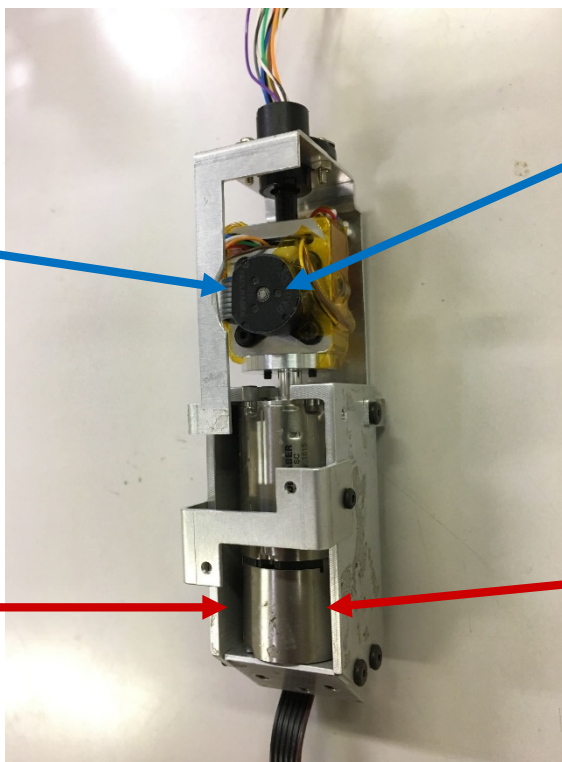
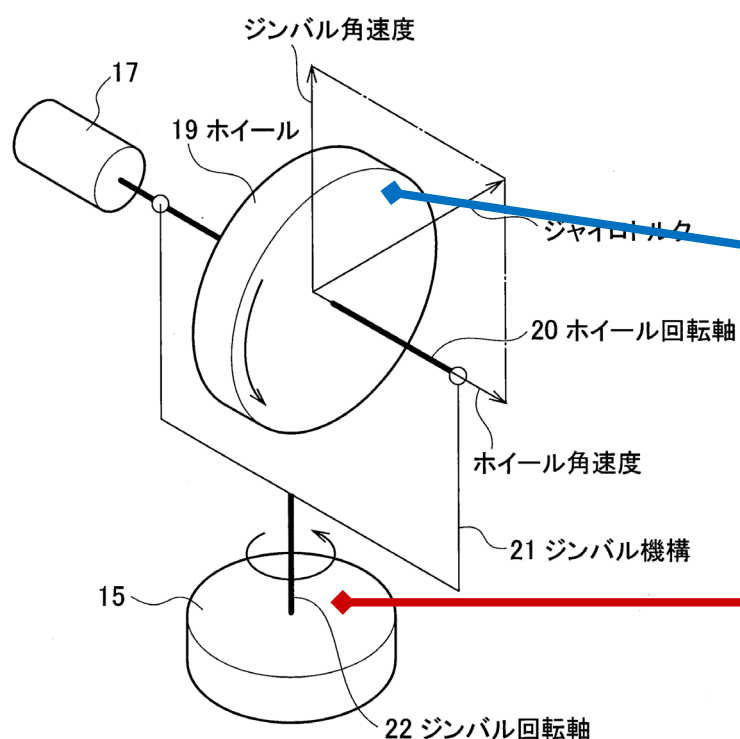


開発中のCMG



	Value	Unit
総重量（制御基板除く）	647	g
サイズ	80×80×80	mm
出力トルク	100	mNm
消費電力（定常）	16	W
消費電力（最大）	48	W

CMG(Control Moment Gyro)



Faulhaber製
ブラシレスフラットDCマイクロモータ
(1509-T-006-B)^[1]

ホイールモータ



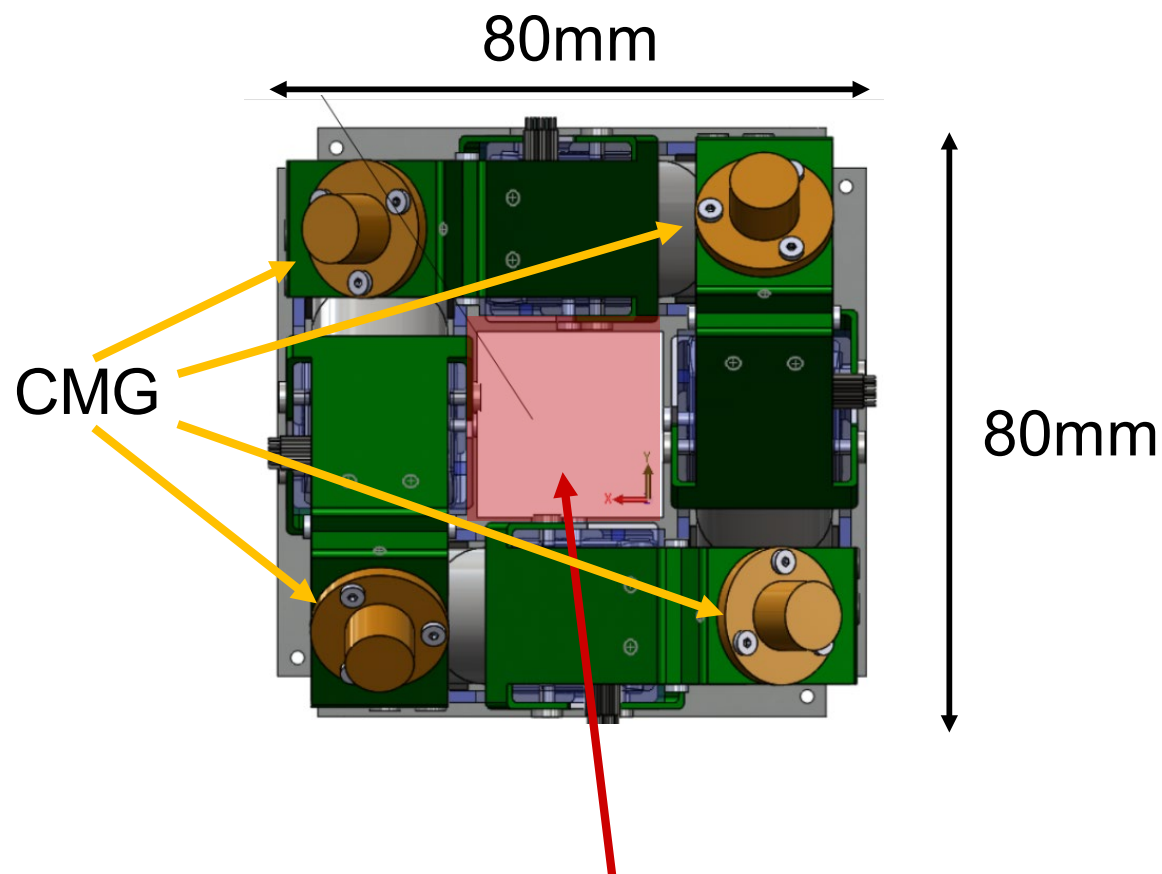
Faulhaber製
ブラシレスDCサーボモータ
(2232-S-012-BX4-SC)^[2]

ジンバルモータ

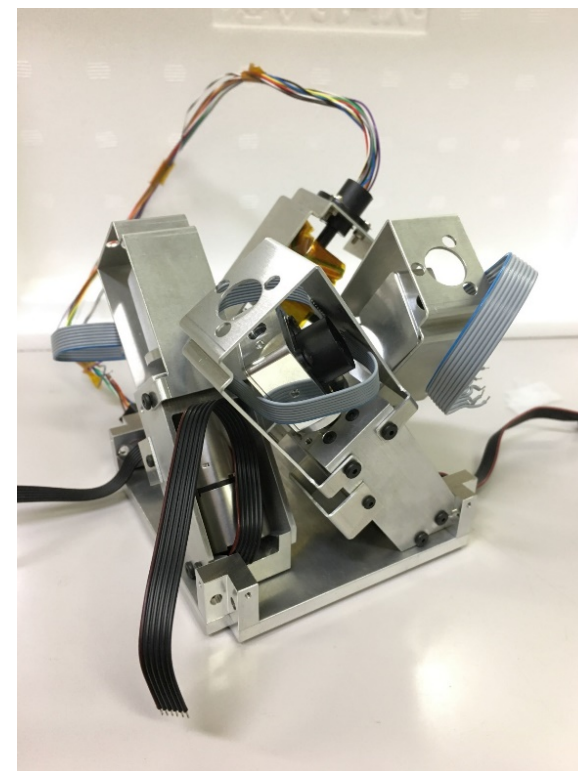
[1]Faulhaber, Brushless Flat DC-Micromotors Series 1509 ... B,
<https://www.faulhaber.com/en/products/series/1509b/>

[2]Faulhaber, Brushless DC-Servomotors Series 2232 ... BX4 SC,
<https://www.faulhaber.com/en/products/series/2232bx4-sc/>

4基のCMGの配置

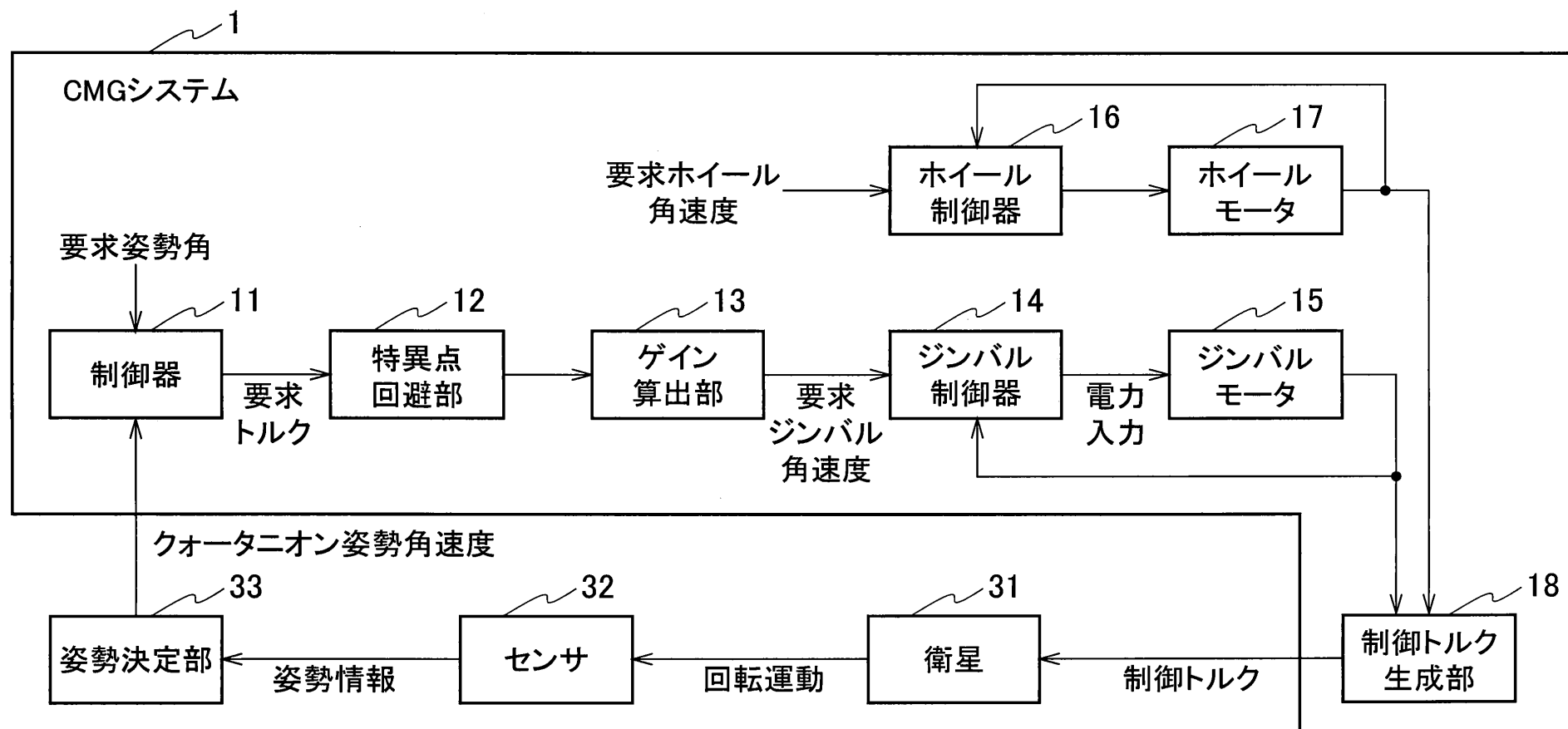


PCM(Phase Change Material)材
温度上昇を抑制するとともに伝熱経路



実際のCMG

CMGの構成



CMGの目標性能

- 機械的制約 : 100×100×100 mm 以内, 1,000g 以内
- 姿勢制御精度 : 1.0 deg 以下
→ 地上通信用アンテナの回線確保
- 姿勢変更能力 (Agility) : 3.0 deg/s 以上
→ 地球観測衛星World Viewと同程度

従来技術の問題点 (1/2)

人工衛星や無人飛翔体の姿勢制御においてCMGを適用したとき一つの軸におけるトルクが発生できなくなる特異点が存在する.

特異点とは



CMGによる姿勢制御ではジンバル角の組み合わせによってはトルクを出力できない方向が存在し, この点を特異点と呼ぶ.

特異点は制御の観点上好ましくなく, これらの特異点を回避・通過するような制御則を構築する必要がある.

従来技術の問題点 (2/2)

具体的には，従来のこの種の技術として，以下のような姿勢制御装置が知られている．

1. 4台のコントロールモーメントジャイロ（CMG）を配置した人工衛星用姿勢制御に関し，ジンバル角速度から姿勢制御トルクを出力し，CMGから出力されるトルクの大きさが特異点に近づくに従って小さくなるように制御．
2. 人工衛星上のシングルジンバルCMGを4台搭載し，CMGの欠点である特異点近傍で大きな出力トルクが得られない点を，異方性重み付け傾斜法で改善．
3. 数台のCMGにより構成され，ジンバル角速度を目標値としてフィードバックループを組むことにより，人工衛星の姿勢制御トルクを発生する．また，目標ジンバル角にフィードバック項を追加することにより，特異点近傍にCMGが停留してしまうことを回避．

特異点状態に陥った場合には，ジンバル角速度指令値が大きくなることもあり，急激な角速度変化や外乱が発生する．その結果，ジンバル追従性が悪化し，制御性能が低下するおそれがある．

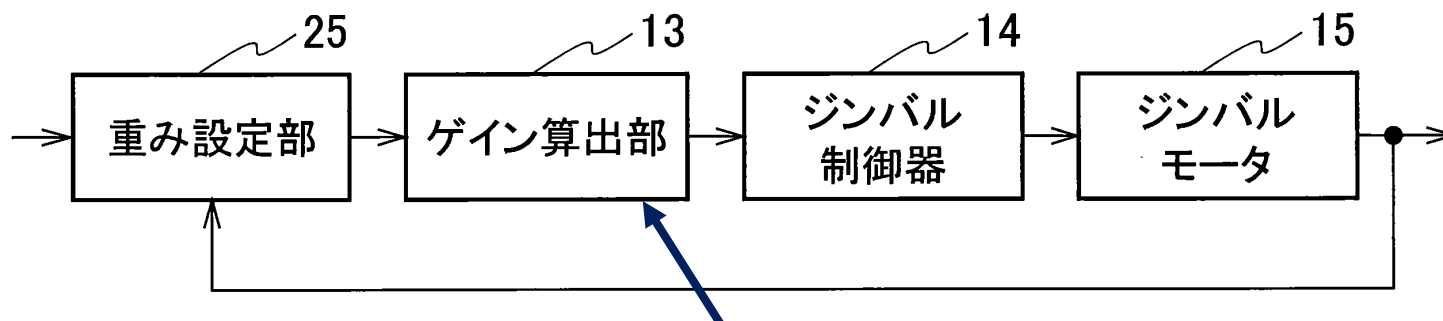
新技術の特徴 (1/2)

- 本技術は、計算負荷が小さい制御によって特異点状態においてもジンバル追従性を良好にすることができる姿勢制御装置を提供する。
- 本技術は、この特異点回避手法の一つであり、従来技術と比べて軽量小型かつ計算量を少なくすることが可能。
- この技術により、高速な姿勢制御が可能

新技術の特徴 (2/2)

- ① 各々のCMGは、ホイール回転軸を中心にホイールを回転させるホイール制御器と、ホイールを支持し、且つ、ホイール回転軸に対して直交するジンバル回転軸を中心にジンバル機構を回転させるジンバル制御器と、要求ジンバル角速度に基づきリッカチ方程式（Riccati Equation）解を算出。
- ② 算出された解を線形近似したフィードバック関数を予め設定する線形近似部と、CMGが特定方向の姿勢制御トルクを出力できなくなる特異点又は特異点近傍において、前記線形近似部で設定された前記フィードバック関数により前記ジンバル制御器のゲインを算出するゲイン算出部と、前記ゲイン算出部で算出されたゲインに基づく前記ジンバルモータの回転トルクと、ホイールモータの回転トルクとに基づき前記姿勢制御トルクを生成する制御トルク生成部とを備えることを特徴とする。

リッカチ方程式の計算



制御周期毎に解くのは計算量が多い！

$$J = \int_0^{\infty} (q_{11}e(t)^2 + q_{22}\tilde{w}(t)^2 + (r_e + f)\tilde{u}(t)^2)dt$$

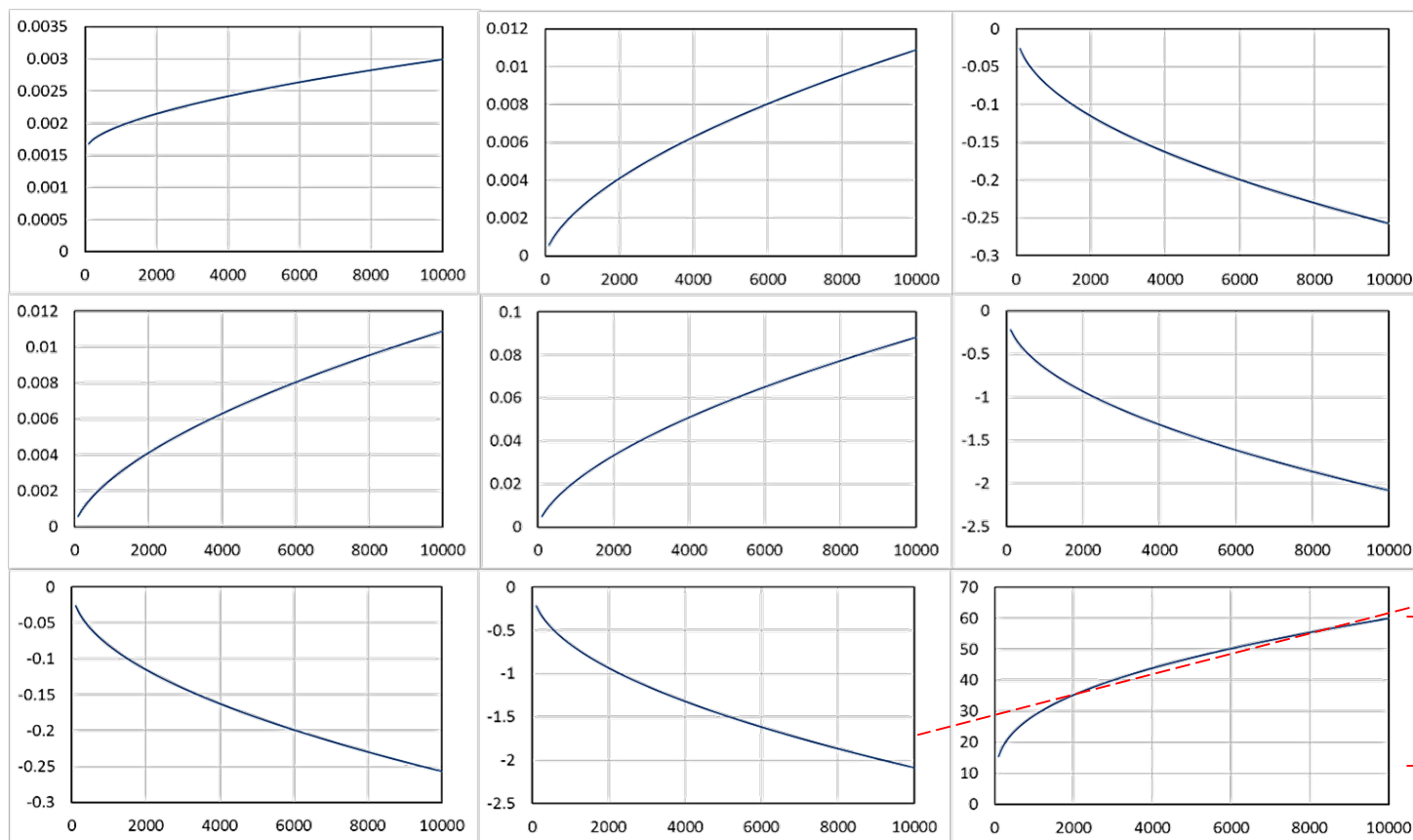


$R_e + f$ を0~10000まで変えたときのRiccati方程式の解構造を調べる

$$P = \begin{bmatrix} 2.90767266e-03 & 1.02444208e-02 & -2.43951840e-01 \\ 1.02444208e-02 & 8.29515315e-02 & -1.97566029e+00 \\ -2.43951840e-01 & -1.97566029e+00 & 5.76700931e+01 \end{bmatrix}$$

リッカチ方程式の解構造

$P =$



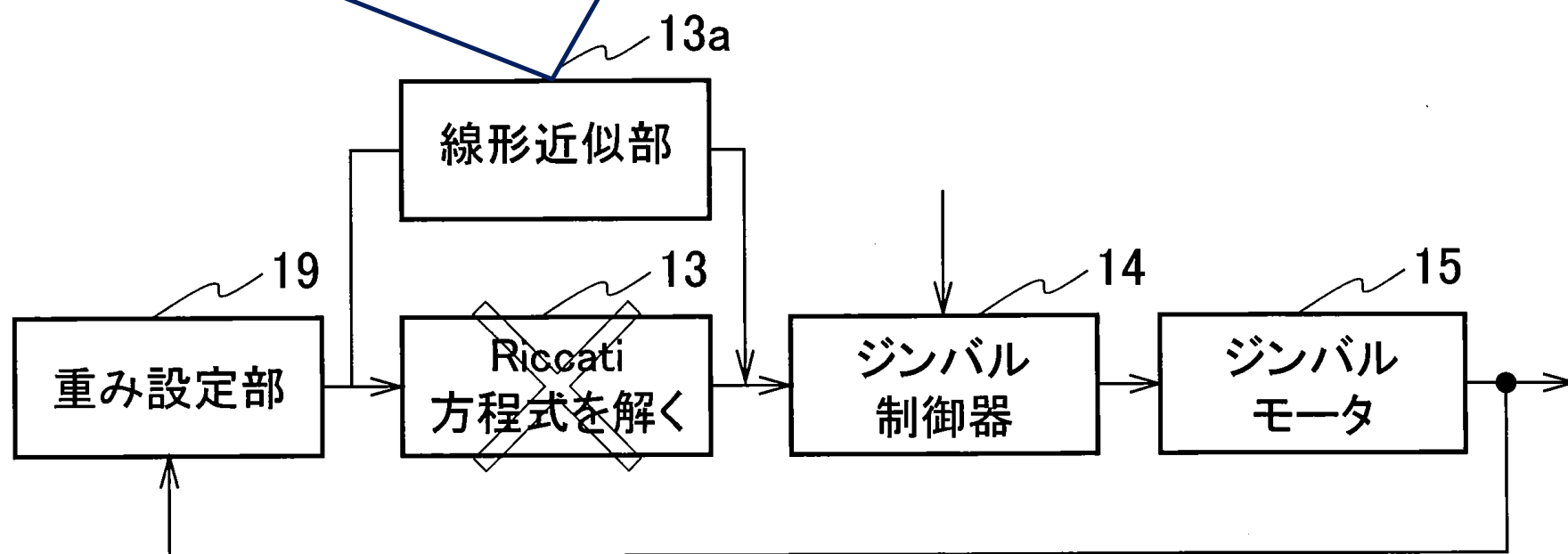
直線近似できる！

$$y = ar_e + b$$

ここの変化が大きい！

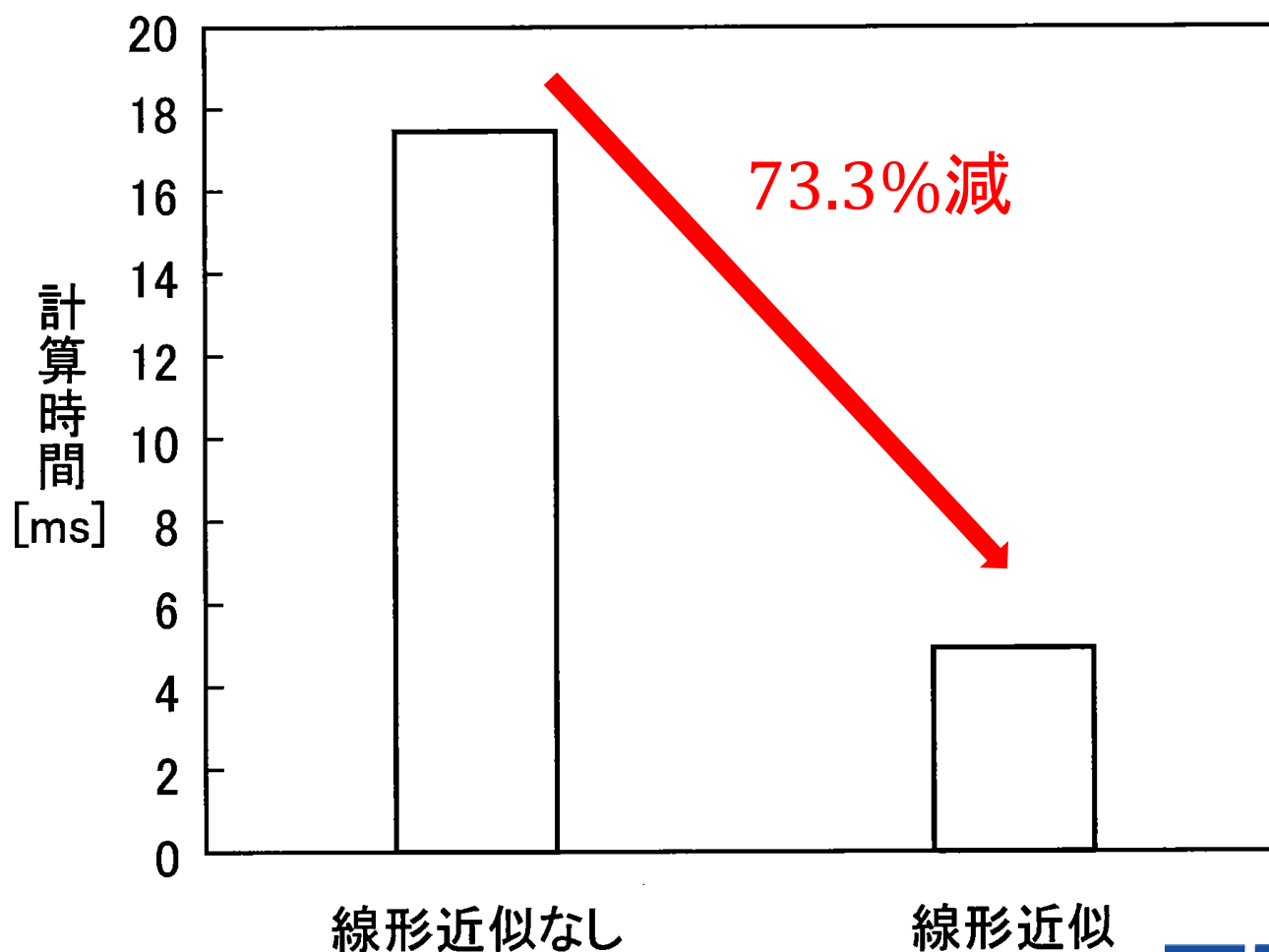
線形近似

$$P = \begin{bmatrix} 2.90767266e-03 & 1.02444208e-02 & -2.43951840e-01 \\ 1.02444208e-02 & 8.29515315e-02 & -1.97566029e+00 \\ -2.43951840e-01 & -1.97566029e+00 & a r_e + b \end{bmatrix}$$



計算量の比較

- 1制御周期に掛かる計算時間を比較



想定される用途

- 本技術の特徴を生かすためには、飛翔体（超小型衛星）への適用が想定される。
- 上記以外に、ドローンなどへの姿勢制御に適用されることも期待される。
- また、実搭載された超小型衛星に成功すると、他地点観測やIoT衛星として展開することも可能と思われる。

超小型IoT衛星 (1/3)

IoT衛星（M2M衛星とも）とは、地上や海上に置かれたセンサが取得した情報を衛星で集め、地上の衛星基地局へまとめてデータを送信することで、センサをネットワークに組み込むシステム。

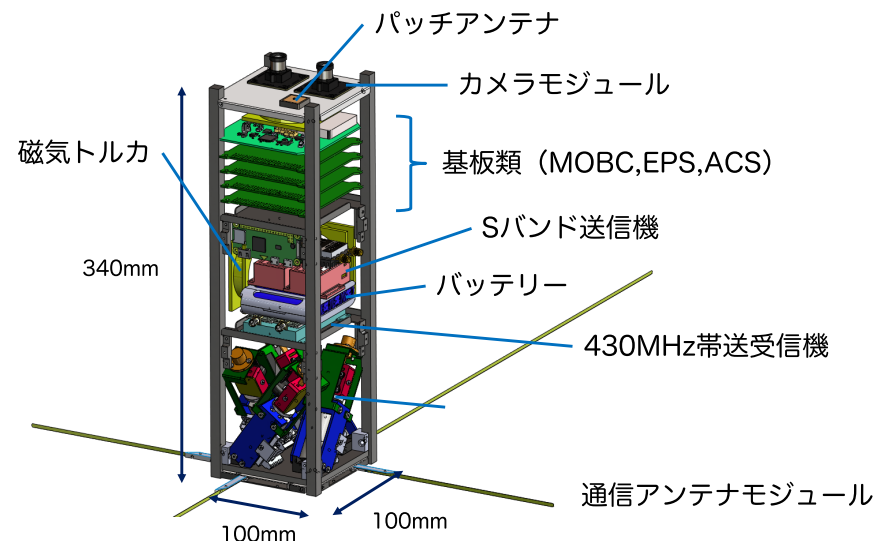
IoT衛星の特長

- 地上のセンサーの周囲に携帯電話の基地局など利用できる電波がないところでもデータを集められる。
- 自動走行車やUAV, 無人船舶といった移動体の見守りから、貨物や輸送コンテナの追跡、水位・雨量監視や農業、放牧の牛に取り付けて追跡するなど多用途。
- これまでセンサーからデータを集める役割は、大型の衛星通信が提供してきた。高速通信が可能なものの接続料金が高額な衛星通信の利用よりも、データ量は小さく通信速度も限られるが、利用コストが低い超小型衛星の活用に関心が集まっている。超小型衛星は、今後5年で2000機から最大2700機以上が打ち上げられる可能性。

超小型IoT衛星 (2/3)

超小型IoT衛星

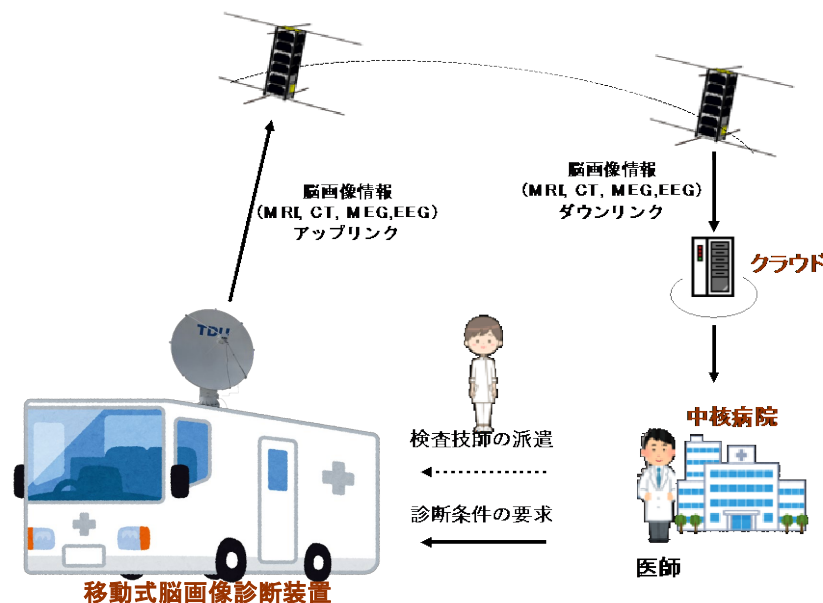
- キューブサットとも呼ばれ，3U（10cm×10cm×30cm）サイズで地上のセンサーデータを収集ことを目的とする。
- 大型の静止通信衛星は，1機で数100億円の開発コストがかかるがキューブサットならば同じコストで100機以上製造可能。
- 衛星の数が多いと地球上の1地点の上空を衛星が通過する回数が増し、高頻度かつ高確率でデータ収集可能。



超小型IoT衛星 (3/3)

- 人の手で携帯可能な小型軽量の送信機から登山者の生体情報などを送信し、安全確認などができるIoT衛星システムを実証する。
- 日本で利用できる920MHz帯の周波数を使用。
- 920MHz帯は草木を通り抜けやすく、木々がある山間部などでも利用しやすい。
- 将来は、よりデータ量が多いMEG、MRIといった脳の検査機器のデータをIoT衛星を使って収集、送信するシステムの開発につなげる。

超小型IoT衛星を利用した大容量データ送信システム



実用化に向けた課題

- 現在，本技術を使用した姿勢制御について，シミュレーションでは，実現可能であることを示している．しかし，実開発での実証ができていない．
- 今後，姿勢制御について実験データを取得し，宇宙空間に適用していく場合の条件設定を行う．
- 実用化に向けて，宇宙及び地上（ドローンなどを想定）での姿勢制御の精度を実用段階まで向上できるように技術を確立する必要もあり．

企業への期待

- 未解決の宇宙空間で実証実験については、真空状態の実験により克服できると考えている.
- 微細加工及び小型モータの開発技術を持つ、企業との共同研究を希望.
- また、小型飛翔体（超小型衛星、ドローンなど）を開発中の企業、宇宙産業分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる.

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 姿勢制御装置
- 出願番号 : 特願2019-157770
- 出願人 : 東京電機大学
- 発明者 : 田中慶太, 潮田裕也

TDU 東京電機大学

お問い合わせ先

東京電機大学 研究推進社会連携センター（CRC）

<https://www.dendai.ac.jp>

研究コーディネーター 亀井隆夫

TEL 03-5284-5225

FAX 03-5284-5242

e-mail crc@jim.dendai.ac.jp