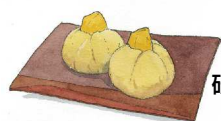


宇宙機のダイナミクスと制御



研究室紹介

山田 克彦*

Spacecraft Dynamics and Control

Key Words : Spacecraft, Orbit, Attitude, Formation Flying,
Control Moment Gyro

1. はじめに

宇宙機とは spacecraft の訳語で、地球を中心天体とする人工衛星のほか、惑星探査機なども含めて表す言葉として広く用いられている。私達の研究室では、この宇宙機のふるまいをおもに力学的側面から研究している。宇宙機は一般に剛体とみなされるが、実際の宇宙機は姿勢制御用のホイールやある向きを指向するアンテナのような可動部を有することが普通なので多剛体系になる。宇宙機は地上の機械とは異なりどこかに固定点があるわけではないので、その力学は運動方程式に忠実に従うといっていよい。このような運動方程式で精度よく記述される多剛体系について、そのふるまいから実際の宇宙機の制御に資する点を見いだすのが研究のねらいである。

2. 軌道運動について

一般に多剛体系であっても質量中心の並進運動を考えることで、並進と回転の運動は分離される。宇宙機の並進運動とは中心天体に対する軌道運動のことになり、宇宙機を1個の質点として扱うことができる。これは天体力学の範疇になるので古くから膨大な研究の蓄積があるが、地球を回る宇宙機のふるまいが詳細に調べられたのは、世界初の宇宙機であ

るスプートニク1号が打ち上げられた1950年代以降であり、宇宙機のダイナミクスの分野では開発すべき事項も多い。

ここではその中で宇宙機のフォーメーションフライトについて取り上げる。宇宙機のフォーメーションフライトとは図1に示すように複数の宇宙機が編隊を組むことをさし、編隊によって立体視による地表面の高度情報の取得や、鏡と検出器を分離することによる長焦点距離の宇宙望遠鏡、海難救助信号など電波源の位置特定などの役割を実現することを目的としている。このような宇宙機のフォーメーションフライトで機能を実現させた例は世界的にも限られており、その実現にはいくつかの困難がともなう。たとえばフォーメーションフライトでは宇宙機の相対位置を制御する必要があるが、宇宙機には多くの燃料を搭載できないうえに、燃料を補充することも難しいので、少ない燃料で求められる精度を維持することが必要であり、軌道運動のダイナミクスをうまく利用することが重要である。私達の研究室でも宇宙機の相対運動のダイナミクスを活用した効率的な制御方法の実現をめざしている。

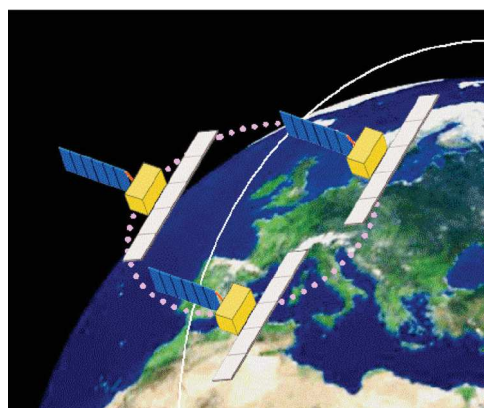


図1 宇宙機のフォーメーションフライト



* Katsuhiko YAMADA

1955年12月生

現在、大阪大学 工学研究科 機械工学
専攻 知能機械学部門 教授 工学博士
宇宙機の力学解析と制御

TEL : 06-6879-7339

FAX : 06-6879-7339

E-mail : kyamada@mech.eng.osaka-u.ac.jp

また、近年宇宙機の利用分野としてラグランジュ点近傍の軌道が注目されている。ラグランジュ点とは、太陽・地球系のように2つの中心天体がある場合に、公転運動による遠心力と2天体からの重力がちょうど釣り合う点のことで、図2に示すように、2天体系に対して5つの点がある。このラグランジュ点の回りにはハロー軌道と呼ばれる閉軌道があり、宇宙機がこの軌道運動を行う場合にはほとんど燃料を必要としない。ハロー軌道は、たとえば太陽・地球系の場合には地球とともに太陽の回りを回るので、太陽観測や深宇宙観測に適しており、また中心天体の回りを回る軌道ではないのでわずかな推力で軌道から離脱できるため、宇宙港としての利用が考えられている。このような可能性をもっているが、その実現例は限られており、私達の研究室でもハロー軌道の導出やより効率的な軌道維持の方法を検討している。

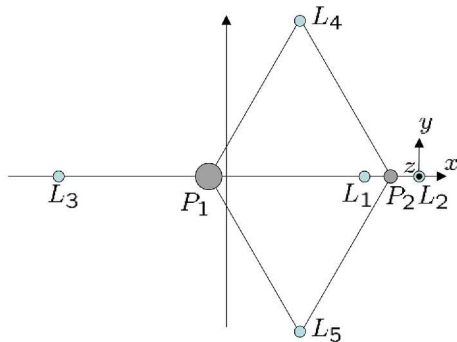


図2 2天体によるラグランジュ点

3. 姿勢運動について

宇宙機は並進と回転の6自由度をもち、並進の自由度は軌道運動となり、回転の自由度は姿勢運動となる。通常これらの運動は独立に扱われることが多いが、実際には軌道運動を行いながら姿勢運動を行うことになるので、軌道運動の影響も考慮した素早い姿勢変更が求められる。このような高速の姿勢変更に対応できるアクチュエータとして近年注目を集めているものにコントロールモーメントジャイロ (CMG) がある。

CMGとは高速で回転するホイールの回転軸をジンバル軸と呼ばれる軸の回りに回転することでホイールのもつ角運動量の向きを短時間で変更するようなアクチュエータである。図3にその実験装置の写

真を示す。



図3 CMGの実験装置

宇宙機に外力が働かなければ宇宙機全体の角運動量は保存されるので、CMGの角運動量が変化した分だけ宇宙機のもつ角運動量も変化する。この角運動量の交換を比較的短時間に行えるのがCMGの特徴であり、従来の姿勢制御アクチュエータであるリアクションホイールに比べて姿勢変更時間を大幅に短縮することができる。

CMGにもいろいろな形態があり、図3のようにジンバル軸が1つのものをシングルジンバルCMG、2つのものをダブルジンバルCMG、ホイールの回転数を変化できるものを可変速CMGという。私達の研究室でもこれらのいろいろなCMGについての実験的検討を行っているが、ここではシングルジンバルCMGの研究について簡単に紹介する。シングルジンバルCMGはジンバル軸を1つしかもたないのでアクチュエータの自由度としては1自由度であり、宇宙機の姿勢運動は3自由度なので通常は冗長な自由度を含めて4個のシングルジンバルCMGを用いる。このときのCMGの代表的な配置に図4に示すピラミッド型配置と呼ばれるものがあり、4台のCMGの各ジンバル軸を四角錐の斜面に沿って配置することからこの名前がある。



図4 CMGのピラミッド配置

宇宙機がフィードバック制御を行うときには、宇宙機の姿勢制御トルクをCMGのジンバル角速度に分解して、各CMGではそのジンバル角速度を実現するようにジンバル軸を回転させる。このとき、ある特殊なジンバル角の組合せでは姿勢制御トルクをCMGのジンバル角速度に分解できないことがある。このような状況をCMGの特異点というが、この特異点においてもCMGを滑らかに駆動させることがCMGを用いた姿勢制御の大きな課題になっている。私達の研究室でもピラミッド型配置CMGによる、特異点でのふるまいを考慮した姿勢制御則の提案とその実現をめざして検討を行っている。

宇宙機の姿勢制御は一般に計算機シミュレーションでの検証が行われ、その実験的な検証は難しい。私達の研究室では空気軸受によって自由に回転できる装置を用いて実験的な検討を行っているが、宇宙空間のような重力の影響をほとんど受けない姿勢運動を地上で実現することは困難であり、精度の高い実験を行うことは、宇宙機のダイナミクスや制御の研究において重要な課題となっている。

4. おわりに

私達の研究室では、ここで紹介したように宇宙機のダイナミクスの解析とその特徴をいかした宇宙機の制御に取り組んでいる。宇宙機を支配する力学的な原理はニュートン力学に尽きるが、その中でも多くの面白い運動を見いだすことができる。宇宙機の活躍する分野はますます広がりを見せており、力学に基づいた宇宙機の研究を通して、宇宙開発に少しでも貢献することが私達の望みである。

参考文献

- 山田克彦, 吉河章二, 島岳也, 宇宙機のフォーメーションフライト, 日本機械学会誌, 116巻, 1130号 (2013), p. 55.
K. Yamada and I. Jikuya, Directional Passability and Quadratic Steering Logic for Pyramid-type Single Gimbal Control Moment Gyros, Acta Astronautica, Vol. 102, (2014), pp. 103-123.

