様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 6 月 24 日現在

研究種目： 若手研究(B)
研究期間： 2006 年度 ～ 2008 年度
課題番号： 18760610
研究課題名（和文） 帯電微小衛星の集団運動制御と軌道上アンテナへの応用

研究課題名（英文） Swarm-motion control of microscopic satellites with charge and application to an orbital antenna

研究代表者
梅原 広明（UMEHARA HIROAKI）
独立行政法人情報通信研究機構・新世代ワイヤレス研究センター宇宙通信ネットワークグループ・主任研究員
研究者番号：60358942

研究成果の概要： 通信衛星アンテナの大型化はユビキタスネットワーク社会の実現において地上端末小型化のために不可欠な技術であるが、ロケット等の制約により衛星質量やサイズが制限されることに問題がある。そこで、衛星の革新的な軽量化を目指すため、微小な衛星集団からなる通信システムを想定した場合の運用可能性を、おもに軌道力学の見地から検討・解析した。衛星帯電を活用した集団運動を解析し、安定性に問題が残るものの実現に向けた第一歩を築くことができた。また、安定な制御を実現させるための相互作用則を導出した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2006 年度	700,000	0	700,000
2007 年度	700,000	0	700,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総　計	2,200,000	240,000	2,440,000

研究分野： 航空宇宙工学
科研費の分科・細目：航空宇宙流体・構造・航法・制御・推進
キーワード： 宇宙機軌道制御，人工衛星，衛星帯電，アレーアンテナ

１．研究開始当初の背景

ユビキタスネットワーク社会の実現には、固定回線のみならず衛星通信が不可欠であるが、広帯域化が課題となっている。必然的に通信衛星を大型化しなければならないが、ロケット等の運搬の制約上、衛星重量やサイズが制限されることに問題がある。既に、メッシュアンテナ、軌道上展開、テザー・膜面等の柔軟構造物、複数衛星の協調運用が提案・開発され始め、大型化と軽量化の両立が図られている。しかし、依然、これらは固体重構造物であり、軽量化を革新的に進めるための検討を行う意義がある。

２．研究の目的

前述の背景を踏まえ、微小物体の分散体からなる柔軟構造で通信衛星機能を構成する場合の実現性について、軌道力学の見地から検討する。

３．研究の方法

微小衛星を少ない軌道制御外力で整然と配置させるためには、地球赤道面からの軌道傾斜角がゼロ度の円軌道である静止軌道に、あ

えて軌道傾斜角と離心率に一定の微小値を持たせつつ軌道傾斜方向と離心方向とを連動させることで、静止軌道上を公転する仮想物体を原点とする回転座標系において、その原点を静止軌道公転周期で１周回する楕円軌道群を構成することができる。そこで、離心率を同じとし、長軸と短軸との交点を共有するいくつかの楕円族の周上に配置されたフェーズドアレイアンテナと同等のレンズアンテナを仮定する。

軌道力学の見地から力学系の設計、すなわち、運動方程式を定めることが重要な第一段階となる。そして、運動方程式を解析的ないし数値的に解き、衛星集団がニアミスを起こすことなく離散せずに安定な状態を維持することができる条件を探索する。

４．研究成果

(1) 各衛星が宇宙環境下で帯電した場合に衛星間相互作用で軌道運動がどのように影響を受けるかについて、運動方程式を構築し、素過程といえる 2 体相互作用による状態変化を解析した。プラズマ環境においては、衛星物体を絶縁体あるいは誘電体と仮定すると、日照部分では光電効果により正帯電となり、陰影部分では電子混入過多による負帯電となる。そこで、各衛星を２つの導体球からなる双極子とみなし、静止軌道上の帯電状況に適合するように双極子サイズを 10[cm]程度、重量を 20[g]程度と仮定する微小衛星モデルを設定した。衛星間を 10[m]程度とした複数双極子を離心率・軌道傾斜角分離法による集団配置にして双極子相互作用を仮定した軌道運動を解析し、集団配置を維持する条件と、逆に、衝突ないし離散する条件を求めた。

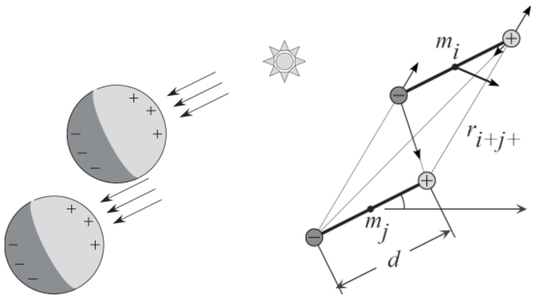


図１ （左）絶縁球体を仮定した衛星２機
（右）各絶縁球体の双極子近似と相互作用

双極子両端からの Coulomb 力の合力が双極子重心に作用する力に等しいとする。すると、双極子 i が双極子 j から受ける力は

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial \mathbf{r}_i} = \frac{\partial U\left(r_{i+j+}\right)}{\partial \mathbf{r}_i} + \frac{\partial U\left(r_{i+j-}\right)}{\partial \mathbf{r}_i} + \frac{\partial U\left(r_{i-j+}\right)}{\partial \mathbf{r}_i} + \frac{\partial U\left(r_{i-j-}\right)}{\partial \mathbf{r}_i}$$

となる。ここで

$$U\left(r_{i\rho j\sigma}\right) = -\frac{q_{i\rho} q_{j\sigma}}{4\pi\varepsilon_0 r_{i\rho j\sigma}}, \quad \rho,\sigma \in [+,-],$$

$$r_{i+j+} = r_{i-j-} = \sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2},$$

$$r_{i+j-} = \left\{\left(x_i - x_j + d\cos\left(t\right)\right)^2 + \left(y_i - y_j + d\sin\left(t\right)\right)^2\right\}^{1/2},$$

$$r_{i-j+} = \left\{\left(x_i - x_j - d\cos\left(t\right)\right)^2 + \left(y_i - y_j - d\sin\left(t\right)\right)^2\right\}^{1/2},$$

ただし、時刻 t において太陽が x 軸からの角度にして

$$\theta\left(t\right) = t + \theta_0 [\mathrm{rad}]$$

方向にあったとする。すなわち、ポテンシャルは時間に陽に依存する関数となる。なお、時刻 t は１恒星日（すなわち、回転座標原点が地球を１公転する時間）を 2π とする時間単位とした。

また、双極子が偶力による回転をおこす場合があることに注意する必要がある。例として、図１（左）では２つの双極子のうち m_i と記載した方の各電荷が別の双極子の各電荷から受ける力のベクトルを m_i の電荷を始点とする矢印で表し、これらの合力ベクトルを双極子中心を始点とする太矢印で示した。実際この例では、m_i の負電荷及び正電荷は m_j の正電荷に引き寄せられる力が優勢であるため、双極子 m_i には紙面内反時計回りの回転が発生する。しかし、双極子は回転しても常に太陽方向を向くとすることが実際に則した設定となる。つまり、絶縁球体が偶力による回転をおこしても即応的に日照部分・陰影部分がそれぞれ正・負に帯電すると仮定している。

地球周回する n 機が上記の相互作用をする場合の地球重力を受ける回転座標系 $\left(x, y\right)$ での運動方程式は

$$\ddot{x}_i - 2\dot{y}_i = 3x_i + \frac{1}{mi}\sum_{j\neq i}^{n} \frac{\partial U_{ij}}{\partial x_i},$$

$$\ddot{y}_i + 2\dot{x}_i = \frac{1}{mi}\sum_{j\neq i}^{n} \frac{\partial U_{ij}}{\partial x_i},$$

となる。なお、変数の上のドット（$\dot{\bigcirc}$）は時間微分を表し、添数字（$\bigcirc_i, i = 1, 2, ..., n$）は衛星を識別する。常に x 軸の負方向から地球重力

を受けるとしている。

静止軌道物体の周期を2πとする時間単位[T]に、1[m]を長さの単位[L]に、1[N]の力が$10^{10}[\mathrm{ML/T^2}]$となるように質量単位[M]を決める。すなわち、

$$1[\mathrm{T}]=86164/(2\pi)[\mathrm{sec}],\quad 1\,[\mathrm{L}]=1[\mathrm{m}],$$
$$1[\mathrm{M}]=0.0188[\mathrm{kg}],$$

となる。双極子両端での電位差と帯電電荷量との関係は

$$q=2\pi\varepsilon_0\frac{ad}{d-a}V$$

である。ただし、a,d はそれぞれ双極子両端の帯電小球半径と帯電小球間距離である。ここで、$a=0.01[\mathrm{L}], d=0.1[\mathrm{L}], m=1[\mathrm{M}]$と設定する。

$$\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 m}=\frac{\pi\varepsilon_0}{m}\left(\frac{ad}{d-a}V\right)^2=10^{-2}[\mathrm{ML^3/T^2}]$$

になるようにするには双極子内の電位差が

$$V=2.340[\mathrm{V}]$$

である必要がある。静止軌道上では帯電の結果、電位が日照部分・陰影部分でそれぞれ正・負で数ボルトとなることが通常であるため上記に仮定した単位系や数値（a,d,m）は適正であると考えられる。

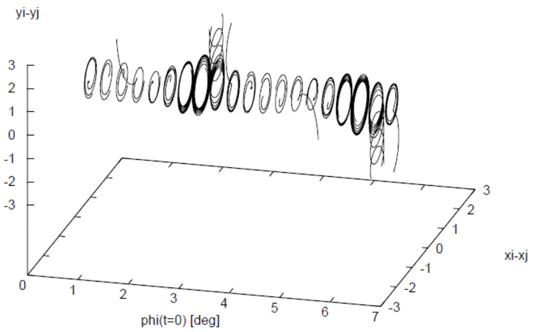
軌道運動の数値実験を行った。2 体の双極子が$t=0$において以下の微小な離心率分離状態にあるとする。

$$x_1=r\cos(\phi-\delta\phi),\ y_1=2r\sin(\phi-\delta\phi),$$
$$x_2=r\cos(\phi+\delta\phi),\ y_2=2r\sin(\phi+\delta\phi),$$
$$\dot{x}_i=y_i,\ \dot{y}_i=-2x_i,$$
$$r=20[L],\ \delta\phi=0.01[\mathrm{rad}].$$

そして、$\phi_k=18\cdot k[\mathrm{deg}],\quad k=1,2,\ldots,20$ の 20 通りにおいてそれぞれの相対軌道

$$\left(x_1(t)-x_2(t),\ y_1(t)-y_2(t)\right)$$

の軌跡を図示する。



k	4 8 12 16 20
最終状態	C C C R C C o o R R C C C R C C o o R R

図 2 各ϕ_kにおける相対軌道と最終状態

各$\phi_k=18\cdot k[\mathrm{deg}],\quad k=1,2,\ldots,20$ に対する最終状態を図下の表に文字別に示した。"C" は衝突を、"R" は離散を、そして、"o" が安定な状態を示す。上段の値はkである。すなわち、$k=7,8,17,18$ 以外は衝突か離散となってしまう。衛星間相互作用は一部集団配置維持をもたらすが、大局的には集団を乱す作用とも考えられてしまう。

(2) 相互作用を有効活用するためには、一般的な線形開放系における軌道閉じ込めをもたらす相互作用の条件を解析的に構築することが必要となる。その検討にあたり、以下の構築方法が有効であるという着想に至り、証明した。

Coulomb 力などの相互作用の利活用や相互作用を模した軌道制御が精力的に検討される主要な理由は、通常の最適制御法では、例えばニアミス回避と燃料消費量低減という両立困難な場合には非凸型となってしまい初期状態と最適条件の最終状態との境界値問題を解くにあたり計算負荷を要する逐次法に頼らざるを得ず、しかも、必ずしも最適ではない状態が導出されてしまう可能性があるため、自然界の様々な様相で即応的に実現されている集団運動による安定化を活用ないし援用することができないかと考えるからである。

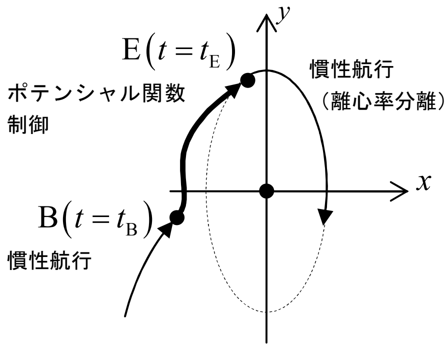


図 3 ポテンシャル関数による制御（模式図）

重力を受ける回転座標系の 2 機相対位置(x,y)の運動を考える。時刻t_Bまでは制御力のない慣性航行をしているとし、t_Bから軌道が離心率分離状態になる時刻t_Eまでの間はポテンシャル関数$U(x,y)$により発生する力が加わる、とする。相対位置(x,y)の運動方程式は

$$\ddot{x}-2\dot{y}=3x+\frac{\partial U}{\partial x},\ \ddot{y}+2\dot{x}=\frac{\partial U}{\partial y}$$

である。ただし、$U(x,y)$は相互作用によるポテンシャル関数である。この場合、状態変数の間に Jacobi 積分と呼ばれる時間不変な関係式

$$\varphi=\dot{x}^2+\dot{y}^2-3x^2-2U(x,y),\ \dot{\varphi}=0$$

が成立することが知られている。したがって、

相対位置において存在領域に制限

$$3x^2 + 2U\left(x, y\right) + \varphi = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \geq 0$$

がある。このことから、原点近傍の領域が上の不等式を成立させない場合にはニアミスを自動的に回避することができることに着目した。そのためには、$U\left(x, y\right)$がx, yの偶関数であるならば、ニアミスを回避することができる。

ここで、軌道制御のための推進力がy方向にのみあると仮定する。すなわち、

$$\partial U / \partial x = 0$$

を仮定する。相互作用によって系の挙動が予測困難になることは運用をする上で避けるべきとの考えのもと、この力学系が可積分系であることを課す。Jacobi 積分と独立な積分として$\dot{x}, \dot{y}$の１次式

$$\psi = \dot{x} \cdot D\left(x, y\right) + \dot{y} \cdot E\left(x, y\right) + F\left(x, y\right)$$

を設定する。この等式の両辺を時間微分し$\ddot{x}, \ddot{y}$に運動方程式を代入し、$\dot{\psi} = 0$であることから、任意の$\dot{x}, \dot{y}$において

$$\left(\partial F / \partial x - 2E\right)\dot{x} + \left(\partial F / \partial y + 2D\right)\dot{y}$$

$$+3x \cdot D + E \cdot \partial U / \partial y = 0$$

が成立することになる。これを満足するポテンシャル関数は

$$U = \left(3/2\right)y^2 + \xi y$$

に限られ、積分は

$$\psi = \xi\left(\dot{x} - 2y\right) - 3\left(x\dot{y} - \dot{x}y + x^2 + y^2\right)$$

となることが判った。ここでξは任意の定数であるが、$U\left(y\right)$は偶関数であることがニアミス回避の十分条件であることから$\xi = 0$とする。

さて、$t = t_E$において離心率分離状態

$$\dot{y} + 2x = 0, 2\dot{x} - y = 0, 4x^2 + y^2 = 4\varepsilon^2$$

になるとするならば、相互作用推進が働いている間、すなわち$\{t \mid t_B \leq t \leq t_E\}$において常に

$$4\psi + 3\varphi = 9\varepsilon^2$$

が成立する。ここでεは分離距離を決める与えられた定数である。ところで、制御中は積分値が一定となる。したがって、慣性航行をしている衛星の位置及び速度変数が$4\psi + 3\varphi = 9\varepsilon^2$となる時刻$t = t_B$から制御を開始すれば、ニアミス回避

$$x^2 + y^2 \geq -\varphi$$

と離心率分離状態への誘導が両立される。(慣性航行では上式の等号が成立するとは限らず時間変化することに注意のこと。) すなわち、Jacobi 積分の値φが負になるように設定すれば衛星間距離が$\sqrt{-\varphi}$より小さくなることはない。

以上のことから、$\dot{x}, \dot{y}$の１次式となる積分をもちy方向にのみの相互作用ポテンシャル関数による簡易なニアミス回避誘導則

$$U\left(y\right) = \left(3/2\right)y^2$$

を導出するに至った。燃料消費量の最小化させるがニアミス回避を保証することのできない離心率分離状態への最適制御則が時刻の 1 次式で表されることが知られている。今回導出した制御則が燃料消費最小化にどの程度近いのか、また、最適制御に近づけるために仮定すべき積分の関数形については今後の発展的な研究課題となる。また、この導出方法は 3 機以上の場合に応用することが可能であるが、導出手順は同様ではない。これについても今後の発展的な研究課題となる。

(3) 軌道上アンテナへの応用可能性について検討したが、アンテナの指向特性を表すアレーファクターを解析したところ、微小物体の間隔が波長程度のオーダーより格段に大きくなった場合にグレーティングローブによる不要波及び損失の問題を解消するに至らなかった。そこで、軌道面をあえて同一にせず、同一面上にある衛星集団の間隔をずらすことでグレーティングローブを低減させた。ただし、運用上の精度をより高める必要が出てくるため、不等間隔度と運用簡易性を表す指標を定義し最適条件を探る検討が今後の発展的な研究課題となる。

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 1 件）

梅原広明，衛星編隊航行の可積分ポテンシャル誘導法，第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2009 年 9 月 9 日，京都大学.

６．研究組織

(1)研究代表者

梅原　広明 (UMEHARA HIROAKI)
情報通信研究機構・新世代ワイヤレス研究センター宇宙通信ネットワークグループ・主任研究員
研究者番号：60358942

(2)研究分担者

（　　）

研究者番号：

(3)連携研究者

（　　）

研究者番号：