

宇宙ロボットにおける無反動制御のエネルギー効率の解析

曾根大樹（都市大） 佐藤大祐（都市大） 金宮好和（都市大）

1. 緒言

宇宙開発において宇宙飛行士の船外活動は重要な役割を果たしてきた。しかし、宇宙環境は人間にとって過酷な環境であり、安全性と経済性の観点から宇宙ロボットが代替して作業を行うことが望まれている [1]。代表的な宇宙ロボットの例として、技術試験衛星 VII 型（ETS-VII）が挙げられ、軌道上において実証実験が行われた [2]。本研究では、このような人工衛星に搭載された宇宙用マニピュレータを対象として扱う。

このようなロボットは浮遊ベースロボットと呼ばれ、ベースである衛星がマニピュレータの動作反動により自由に運動するシステムである。中でも、回転運動は通信アンテナや太陽光パドルの指向性から問題とされ、一般的な人工衛星ではスラスターやリアクションホイールなどの姿勢制御装置を用いてベースの姿勢安定化が行われる。しかし、前者においては大きな出力を得ることができるが、有限の燃料を必要とし、後者については太陽光から無限にエネルギーを取得することができる一方、出力が小さいといった問題点が存在する。

この問題に対して、マニピュレータの無反動制御 [3] [4] が提案されており、軌道上実験をはじめ様々な研究が行われてきた [5] [6]。無反動制御の利点の一つに、リアクションホイールを利用した場合と比較して、作業実行時間を短縮できるといったことが挙げられ、今後の利用が期待されている。

また、宇宙環境ではエネルギーの供給法が課題の一つとされる。電気的なエネルギーに関しては、太陽光パドルを用いることで得ることが可能となるが、打ち上げコストの観点から必要以上の容量の電源系を搭載することは困難である。そのため、宇宙ロボットの制御においても、エネルギーの使用は最小限に留めることが望ましい。

過去の研究において、ベースの姿勢が安定化されている条件のもと、リアクションホイールがマニピュレータの動作反動を補償するために必要な運動エネルギーと、無反動制御を用いてマニピュレータ自身が反動を補償するのに必要な運動エネルギーを比較した [7]。実用的な動作を想定し比較検証を行った結果、リアクションホイールが必要とするエネルギーは、無反動制御と比較して過大となることが確認された。本研究は上記の結果について、解析的な議論を行うことを目的とする。

2. 宇宙ロボットの力学

2.1 運動量・角運動量保存則

本研究では宇宙ロボットをベース、マニピュレータおよびリアクションホイールから構成されるシステムとしてモデリングする。宇宙ロボットの運動は外力が作用しない条件下において、運動量および角運動量が保存されることから、その保存法則によって表すことができる。ここで、初期運動量を零とすると、保存則は

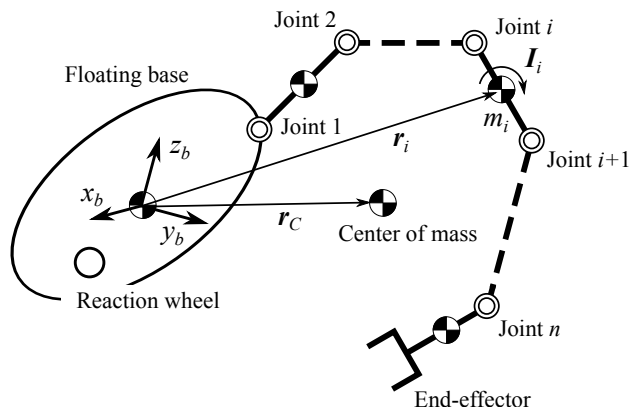


図1 浮遊ベースロボットの概念図モデル

以下のように表現される [1]。

$$M_b \dot{v}_b + M_{bm} \dot{\theta}_m + M_{br} \dot{\theta}_r = 0 \quad (1)$$

式中、 $v_b \in \mathbb{R}^6$, $\dot{\theta}_m \in \mathbb{R}^{n_m}$, $\dot{\theta}_r \in \mathbb{R}^{n_r}$ はそれぞれベースの六次元速度ベクトル、マニピュレータの関節速度ベクトル、リアクションホイールの回転速度ベクトルを表す。また、 n_m, n_r はそれぞれマニピュレータ、リアクションホイールの自由度（個数）を表す。 $M_b \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $M_{bm} \in \mathbb{R}^{6 \times n_m}$, $M_{br} \in \mathbb{R}^{6 \times n_r}$ はそれぞれベースの質量中心を基準としたシステム全体の慣性テンソル、ベースとマニピュレータの動的干渉を表す慣性行列、ベースとリアクションホイールの動的干渉を表す慣性行列を表す。特に、 M_{bm} は干渉慣性行列と定義され [4]、マニピュレータの反動制御において重要な役割を担う。

また、浮遊ベースロボットは地上との通信アンテナや太陽光パドルの指向性から、ベースを適切な姿勢で維持することが要求される。そのため、マニピュレータの運動計画においては式 (1) のうち、ベースの回転運動のみを表現する角運動量保存則を用いることが一般的である。角運動量保存則は運動量保存則からベースの並進速度を見積もることで、以下のように表現することができる。

$$\tilde{M}_\omega \omega_b + \tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta}_m + \tilde{M}_{\omega r} \dot{\theta}_r = 0 \quad (2)$$

式中、 $\omega_b \in \mathbb{R}^3$ はベースの角速度ベクトルを表し、 $\tilde{M}_\omega \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $\tilde{M}_{\omega m} \in \mathbb{R}^{3 \times n_m}$, $\tilde{M}_{\omega r} \in \mathbb{R}^{3 \times n_r}$ は式 (1) と同様の意味合いを持つ慣性行列を表す。 $(\tilde{\cdot})$ はベースの運動量のモーメントの影響を含んだ表現である。上記において、式 (2) の右辺第 1 項はベースの回転により生じる角運動量、第 2 項はマニピュレータの動作により生じる角運動量、第 3 項はリアクションホイールに蓄えられている角運動量を表すことに留意されたい。特に、第 2 項は干渉角運動量と定義される [4]。

2.2 運動エネルギー

本研究の目的であるエネルギー効率の議論において、運動エネルギーは一つの指標として重要である。ここでは、浮遊ベースロボットの運動エネルギーについて述べる。浮遊ベースロボットの運動エネルギー \mathcal{T} は、 ω_b , $\dot{\theta}_m$, $\dot{\theta}_r$ を用いて以下のように表現される。

$$\mathcal{T} = \frac{1}{2} \omega_b^T \tilde{M}_{\omega} \omega_b + \omega_b^T \begin{bmatrix} \tilde{M}_{\omega m} & \tilde{M}_{\omega r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_m^T & \dot{\theta}_r^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{M}_m & 0 \\ 0 & \tilde{M}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中、 $\tilde{M}_m \in \mathbb{R}^{n_m \times n_m}$, $\tilde{M}_r \in \mathbb{R}^{n_r \times n_r}$ はマニピュレータの慣性行列、リアクションホイールの慣性行列を表す。上記において、右辺第1項はベースの回転運動により生じる運動エネルギー、第2項は干渉運動エネルギー、第3項は駆動系（マニピュレータおよびリアクションホイール）の運動エネルギーを表す。

3. 無反動制御

浮遊ベースモデルにおいては、マニピュレータの動作によりベースに姿勢変化が生じる。これは前述の通り、通信アンテナの指向性などから問題となる。そのため、ベースに反動を与えない無反動制御は、この問題に対する一つの有効な手法となる。

このマニピュレータの動作反動は角運動量保存則に現れる干渉角運動量によって表現される。したがって干渉角運動量が零の運動、すなわち、

$$\tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta}_m = 0 \quad (4)$$

の拘束を満たすことで無反動な動作を生成可能である。上記を満たす関節速度は、干渉慣性行列の零空間に属するベクトルであり、射影行列を用いて以下となる。

$$\dot{\theta} = P_{RNS} \dot{\theta}_a \quad (5)$$

式中、 $P_{RNS} (= E - \tilde{M}_{\omega m}^+ \tilde{M}_{\omega m}) \in \mathbb{R}^{n_m \times n_m}$ は干渉慣性行列の零空間への直交射影行列、 E は単位行列、 $\dot{\theta}_a$ は関節速度次元の任意ベクトルを表す。

4. 無反動制御とリアクションホイールのエネルギー効率の解析

本章では、マニピュレータに無反動制御を用いた場合と、リアクションホイールを用いて姿勢安定化を行った場合のエネルギー効率について解析を行う。

4.1 解析における仮定

マニピュレータおよびリアクションホイールを駆動させた場合に生じるエネルギーの形態として、電気エネルギー、運動エネルギー、熱エネルギーなどが考えられるが、電気エネルギーおよび熱エネルギーに関しては使用するハードウェアの性能に大きく依存する。これに対して、運動エネルギーは剛体の運動のみに依存する量であり、ベースの姿勢安定化という目的においては、エネルギーの形態としてハードウェアの性能に依存しない本質的な量であるといえる。そこで、本研究では評価指標として運動エネルギーを用いる。

また、マニピュレータの反動は完全に補償されており、ベースに姿勢変化が生じないことを仮定する。これはパラメータ誤差がない限り、無反動制御およびリアクションホイールを用いることで実現可能である。ただし、リアクションホイールのトルクが飽和しない範囲でマニピュレータが駆動することを想定する。リアクションホイールについては、三軸直交ゼロモーメント方式に従う配置であることを想定する。

4.2 駆動系に生じる運動エネルギーの考察

前述の仮定により、ベースに運動が生じないことから、式(3)におけるベースの角速度に依存する項は零となる。そのためシステム全体の運動エネルギーは、以下に示す駆動系の運動エネルギーのみとなる。

$$\mathcal{T} = \frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T \tilde{M}_m \dot{\theta}_m + \frac{1}{2} \dot{\theta}_r^T \tilde{M}_r \dot{\theta}_r \quad (6)$$

上記において、右辺第1項はマニピュレータの動作により生じる運動エネルギー、第2項はリアクションホイールの動作により生じる運動エネルギーを表す。

ここで、角運動量が保存することから、リアクションホイールの角運動量はマニピュレータに発生する角運動量と同量となる。したがって、式(2)よりリアクションホイールの回転速度は、 $\dot{\theta}_r = -\tilde{M}_{\omega r}^{-1} \tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta}_m$ となる。このとき、運動エネルギーはマニピュレータの関節速度を変数として表現することが可能であり、

$$\mathcal{T} = \frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T (\tilde{M}_m + \tilde{M}_{\omega m}^T A \tilde{M}_{\omega m}) \dot{\theta}_m \quad (7)$$

$$A = (\tilde{M}_{\omega r} \tilde{M}_r^{-1} \tilde{M}_{\omega r}^T)^{-1} \quad (8)$$

と求まる。また、ベースの姿勢が基準系と一致している場合、リアクションホイールが直交に配置されていることから、 $\tilde{M}_{\omega r} \approx \tilde{M}_r$ が成り立つ。そのため、 A は以下のように簡略化できる。

$$A = \text{diag}(I_x^{-1}, I_y^{-1}, I_z^{-1}) \quad (9)$$

式中、 I_i ($i = x, y, z$) はベースの各軸に配置されたりリアクションホイールの回転軸回りの慣性モーメントを表す。さらに、これらのリアクションホイールが同一のものであるとすると、 $A = I_r^{-1} E$ と表現できるため、最終的に運動エネルギーは以下のように表現される。

$$\begin{aligned} \mathcal{T} &= \frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T (\tilde{M}_m + I_r^{-1} \tilde{M}_{\omega m}^T \tilde{M}_{\omega m}) \dot{\theta}_m \\ &= \frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T D \dot{\theta}_m \end{aligned} \quad (10)$$

式中、 I_r はリアクションホイールの回転軸回りの慣性モーメント、 $D = \tilde{M}_m + I_r^{-1} \tilde{M}_{\omega m}^T \tilde{M}_{\omega m} \in \mathbb{R}^{n_m \times n_m}$ はベースがリアクションホイールにより姿勢安定化されている場合の駆動系の慣性行列を表す。 D において、第1項はマニピュレータの動作により生じる運動エネルギー、第2項はリアクションホイールを用いて、マニピュレータの動作反動を補償する際に必要な運動エネルギーを表現する行列である。上記より、リアクションホイールが必要とする運動エネルギーは、リアクションホイールの慣性モーメントに反比例することが確認できる。以

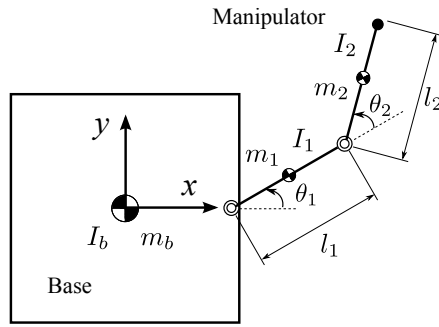


図2 平面二自由度モデル

降, 簡略化のため $D_m = \tilde{M}_m$, $D_r = I_r^{-1} \tilde{M}_{\omega m}^T \tilde{M}_{\omega m}$ として扱う.

ここで, D_m , D_r のパラメータの依存関係について考察を加える. D_m はマニピュレータの慣性行列であるため, マニピュレータの質量や慣性モーメントなどの慣性パラメータに対して線形である. これに対して, D_r は定義式からもわかるように, 慣性パラメータの関数である $\tilde{M}_{\omega m}$ 同士の積として計算される. そのため, D_r はマニピュレータの慣性パラメータの二次の関数となる. したがって, リアクションホイールに必要な運動エネルギーは, マニピュレータに対して大きな値を持つことが予想される. 以降, 上記について数値解析により検証を行う.

4.3 数値解析

4.3.1 対象モデル

式(10)を用いて, 無反動制御とリアクションホイールの運動エネルギーを数値計算を用いて比較する. ここでは簡略化のため, 図2に示す平面二自由度モデルを対象として考える. マニピュレータのリンクは共に, 1 m のリンク長, 100 kg の質量を持つものとした. また, マニピュレータはベース質量中心から x 軸に 1 m の位置に搭載されているものとした. 本章では, リアクションホイールに慣性モーメントが 0.11 kgm^2 のものを想定した. また, ベースの質量および質量中心回りの慣性モーメントは, 1000 kg, 432 kgm^2 とした.

4.3.2 比較条件

D_m , D_r はそれぞれマニピュレータとリアクションホイールに生じる運動エネルギーの特性を表現する行列であり, これらの性質を調べることで運動エネルギーの評価を行うことが可能である. 比較の条件としては, 無反動制御とリアクションホイールを用いた場合それぞれについて, 同一の条件下でエネルギーを算出することが望ましい. しかし, 無反動制御時にリアクションホイールの運動エネルギーは零となるため, 直接比較をすることは困難である. そこで本研究では, 無反動制御を生成するために必要な運動エネルギーの代わりに, 与えられた姿勢においてマニピュレータが生成できる最大運動エネルギーと, このときに生じる反動を補償するためにリアクションホイールが必要とする運動エネルギーを比較する. この場合, マニピュレータの運動エネルギーは少なくとも, 無反動制御時の運動エネルギーを下回ることはない. したがって, マニ

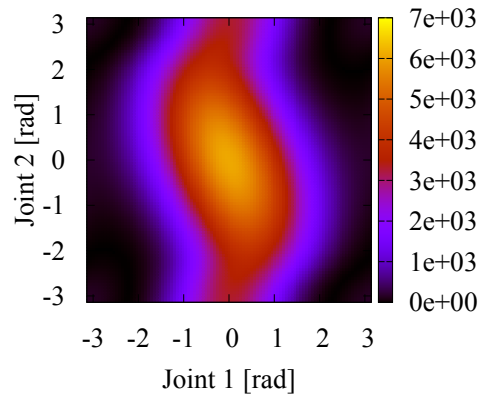


図3 運動エネルギー比の分布図

ピュレータの運動エネルギーがリアクションホイールより少ない場合, 無反動制御のエネルギー効率が優れていると考えることができる.

4.3.3 運動エネルギーの分布

マニピュレータの運動エネルギーは, 関節速度を正規化した場合, その方向のみに依存し, 最小値から最大値をとる. この最大運動エネルギー, およびこれを発生させる関節速度ベクトルは, D_m を特異値分解することにより得ることができる. これは柔軟ベースロボットにおける, Coupling Map [8] とよばれる干渉運動エネルギーを可視化する手法と同等である. D_m の特異値分解は,

$$D_m = U_m \Sigma_m V_m^T$$

$$= [\mathbf{u}_{m1} \ \mathbf{u}_{m2}] \begin{bmatrix} \sigma_{m1} & 0 \\ 0 & \sigma_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{m1}^T \\ \mathbf{v}_{m2}^T \end{bmatrix} \quad (11)$$

として求まる. 式中, $\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^2$, $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^2$, σ_i はそれぞれ左特異ベクトル, 右特異ベクトルおよび対応する特異値を表す. それぞれの物理的意味合いとして, σ_{m1} は与えられた姿勢において発生できる最大運動エネルギー, \mathbf{v}_{m1} は最大運動エネルギーを生成する関節速度ベクトルの方向である. ここで, \mathbf{v}_{m1} は単位ベクトルであることに注意されたい. リアクションホイールの運動エネルギーは, この \mathbf{v}_{m1} を用いて式(10)より算出する.

数値解析では, $-\pi \leq \theta_{mi} \leq \pi$ の範囲の関節空間上を 10000 個の小領域に分割し, その代表点において二つの反動制御の運動エネルギーの比,

$$\eta = \frac{\mathcal{T}_r}{\mathcal{T}_m} \quad (12)$$

を計算した. 式中, \mathcal{T}_m , \mathcal{T}_r はそれぞれマニピュレータ, リアクションホイールの運動エネルギーを表す.

図3に関節空間上の各点における運動エネルギーの比を示す. 分布図からわかるように, 関節空間上のほとんどの領域で, η は 10^3 のオーダーであり, リアクションホイールの運動エネルギーが相対的に過大であることが確認できる. η が小さい値を持つ領域は, マニピュレータの質量中心がベースの質量中心に近い場合であり, 動作反動が小さいことに起因する.

以上の結果より, リアクションホイールを用いた反動補償は, 特定の運動に依存せず相対的に過大な運動

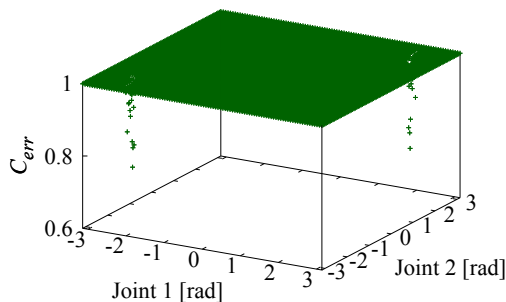


図4 無反動動作と最小運動エネルギーの動作の誤差

エネルギーを必要とすることが確認できた。したがって、[7]において言及したように、無反動制御を用いて作業を行うことでエネルギー効率の改善が期待できるといえる。

5. 最小運動エネルギーの動作と無反動動作の関係性

前章の結果より、マニピュレータの動作反動を補償するためにリアクションホイールが必要とする運動エネルギーは、相対的に過大であることが確認された。そのため、リアクションホイールを使わない動作、すなわち無反動動作は運動エネルギーが最小の動作に類似していると考えられる。本章では、最小運動エネルギーの動作を導き、無反動動作との関係性について考察する。

はじめに、リアクションホイールによりベースの姿勢が安定化されている場合の、最小運動エネルギーの動作について考える。この動作は前章の考えと同様に、運動エネルギーの係数行列 D を特異値分解することにより求めることができる。

$$D = \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^T + \sigma_2 \mathbf{u}_2 \mathbf{v}_2^T \quad (13)$$

上記において、運動エネルギーの最小値は σ_2 であり、また最小運動エネルギーの動作は \mathbf{v}_2 として求まる。

この動作と無反動制御により生成される動作の誤差を評価することにより、この二つの動作の類似性を検証する。ここで、あらためて最小運動エネルギーの動作を $\dot{\theta}_{min}$ 、無反動動作を $\dot{\theta}_{rls}$ として定義する。これらは正規化された方向のみを表す単位ベクトルであり、無反動動作は干渉慣性行列の右特異ベクトルにより算出するものとする。これら二つの動作の誤差を、二つのベクトルの方向余弦を用いて表現する。したがって、評価関数は以下となる。

$$C_{err} = |\dot{\theta}_{min}^T \dot{\theta}_{rls}| \quad (14)$$

図4に関節空間上の各点において、この誤差を計算した結果を示す。結果より、少数のサンプルを除き C_{err} に1に近い値をとることが確認できる。また、その平均値は0.99962である。以上より、無反動動作は最小運動エネルギーの動作に類似することが確認された。

6. 結言

本研究では、浮遊ベースロボットにおける反動制御について、エネルギー効率の観点で解析を行った。ベースの姿勢が安定化されている条件下で、リアクション

ホイールがマニピュレータの動作反動を補償するために必要な運動エネルギーと、マニピュレータが無反動制御を行うために必要な運動エネルギーを導出した。結果として、マニピュレータの運動エネルギーは自身の慣性パラメータに線形なのに対し、リアクションホイールが必要とする運動エネルギーは、マニピュレータの慣性パラメータの二乗に比例することを示した。

そして、簡易的な平面モデルを用いて、数値解析を行い、無反動動作とリアクションホイールのエネルギー効率について比較した。結果として、リアクションホイールに必要な運動エネルギーが相対的に過大となることが確認された。また、ベースが姿勢安定化された状態において、無反動制御が最小運動エネルギーの動作と類似することを示した。

参考文献

- [1] Y. Masutani, F. Miyazaki, and S. Arimoto, "Sensory feedback control for space manipulators," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 1989, pp. 1346–1351.
- [2] M. Oda, K. Kibe, and F. Yamagata, "ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 1997, pp. 739–744.
- [3] D. Nenchev, Y. Umetani, and K. Yoshida, "Analysis of a redundant free-flying spacecraft/manipulator system," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 1992.
- [4] D. Nenchev and K. Yoshida, "Impact analysis and post-impact motion control issues of a free-floating Space robot subject to a force impulse," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, no. 3, pp. 548–557, 1999.
- [5] A. Gouo, D. N. Nenchev, K. Yoshida, and M. Uchiyama, "Motion control of dual-arm long-reach manipulators," *Advanced Robotics*, vol. 13, no. 6, pp. 617–631, 1998.
- [6] D. Dimitrov and K. Yoshida, "Utilization of the bias momentum approach for capturing a tumbling satellite," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2004, pp. 3333–3338.
- [7] 曾根, 佐藤, 金宮, "宇宙ロボットにおける無反動マニピュレーションとリアクションホイール使用時のエネルギー効率の比較検証", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P2-U06, 2015.
- [8] M. Torres and S. Dubowsky, "Path-planning for elastically constrained space manipulator systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, 1993, pp. 812–817.