

フリーフライングロボットのインピーダンスマッチング

倉爪 亮(九州大学) 長谷川 勉(九州大学)

Impedance matching for free flying robots

*Ryo Kurazume (Kyushu University) Tsutomu Hasegawa (Kyushu University)

Abstract— Motion control of a free flying robot equipped with some manipulators has a plenty of unique properties. One of them is that mass properties of a satellite and manipulators can be utilized to promote efficiency of various manipulation tasks. In this paper, an idea of impedance matching between payloads and manipulators is introduced for realizing effective manipulation.

Key Words: Free Flying Robot, Impedance matchng, Torque transmission, Payload

1. はじめに

フリーフライングロボットの制御において最も特徴的な事柄は、ロボットの自重の影響を制御システムに積極的に組み入れることで、地上用ロボットでは考えられなかった自重の様々な利用が可能になることである。例えば、吉田らはペイロード移動時の負荷変動の影響を、マニピュレータの自重を利用して補償することで、衛星本体の姿勢変動を生じさせない Zero Reaction Maneuver を提案し、実際に ETS-VII で実験を行っている¹⁾。

そこで本報告では、微小重力下におけるペイロードの運搬作業に対し、各関節で生成したトルクを効率よくペイロードに伝達するための指標として、フリーフライングロボットの自重とペイロードの荷重のインピーダンスマッチングについて考察する。

2. フリーフライングロボットのインピーダンスマッチング

i 個のリンクからなるフリーフライングロボットを考え、それぞれの質量、慣性モーメントを m_i, I_i とする。このとき、ロボット重心周りの運動量、角運動量は

$$\begin{pmatrix} P_g \\ L_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} wI_3 & 0 \\ 0 & I_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_g \\ \omega_g \end{pmatrix} \quad (1)$$

で表される。ただし、 $w = \sum m_i, I_g = \sum I_i + m_i \tilde{r}_{gi} \tilde{r}_{gi}$ であり、 \tilde{r}_{gi} は全重心からリンク i 重心へのベクトル、 \tilde{r} は歪対称行列²⁾である。式(1)を微分し、次式を得る。

$$\begin{pmatrix} \dot{P}_g \\ \dot{L}_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} wI_3 & 0 \\ 0 & I_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}_g \\ \dot{\omega}_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_g \times I_g \omega_g \end{pmatrix} \quad (2)$$

また、重心周りの力と手先に加えられた力には、

$$\begin{pmatrix} f_g \\ n_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_3 & 0 \\ \tilde{r}_{gh} & I_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_h \\ n_h \end{pmatrix} \quad (3)$$

の関係がある。また $f_g = \dot{P}_g, n_g = \dot{L}_g$ である。よって、式(2),(3)より、

$$\begin{pmatrix} wI_3 & 0 \\ 0 & I_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}_g \\ \dot{\omega}_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_g \times I_g \omega_g \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} I_3 & 0 \\ \tilde{r}_{gh} & I_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_h \\ n_h \end{pmatrix} \quad (4)$$

が得られ、これを簡単に、

$$M\dot{V}_g + C = R_h^T F_h \quad (5)$$

と表す。

一方、フリーフライングロボットの一般化ヤコビ行列³⁾を J^* とすると、手先速度と重心速度、関節角速度の間に次式が成り立つ。

$$V_h = J^* \dot{\phi} + R_h V_g \quad (6)$$

式(5)を F_h について解き、式(6)を微分して代入すると、

$$F_h = R_h^{-T} M R_h^{-1} \dot{V}_h + R_h^{-T} M R_h^{-1} J^* \ddot{\phi} \quad (7)$$

が得られる。ただし速度二乗項は無視した。ここで、ハンド先端にある質量のペイロードが取り付けられた場合を考え、その慣性テンソルを W とする。このとき、このペイロードに加えられる力は、

$$F_h = -W \dot{V}_h \quad (8)$$

である。式(7),(8)から、このときの手先加速度が

$$\begin{aligned} \dot{V}_h &= -(R_h^{-T} M R_h^{-1} + W)^{-1} R_h^{-T} M R_h^{-1} J^* \ddot{\phi} \\ &= -H^* J^* \ddot{\phi} \end{aligned} \quad (9)$$

と求められ、これよりペイロードに加えられた力は、

$$F_h = W H^* J^* \ddot{\phi} \quad (10)$$

となる。ただし、 $H^* = (R_h^{-T} M R_h^{-1} + W)^{-1} R_h^{-T} M R_h^{-1}$ である。

ところで、フリーフライングロボットの運動方程式は

$$\tau = H^* \ddot{\phi} + C + J^{*T} F_h \quad (11)$$

で与えられる。 H^* はフリーフライングロボットの関節空間に対する慣性テンソルである。これに式(10)を代入すると次式を得る。

$$\tau = (H^* + J^{*T} W H^* J^*) \ddot{\phi} \quad (12)$$

これは、慣性テンソル W のペイロードを式 (9) の加速度で運搬するのに必要な、関節で発生すべきトルクを示している。特に式 (12) 右辺第二項は、ペイロードの質量とフリーフライングロボットの自重の比で決定される慣性項であり、

$$\begin{cases} J^{*T}WH^*J^* \rightarrow 0 & \dots & W \rightarrow 0 \\ J^{*T}WH^*J^* \rightarrow J^{*T}R_h^{-T}MR_h^{-1}J^* & \dots & W \rightarrow \infty \end{cases}$$

となる。ただし $R_h^{-T}MR_h^{-1}$ は手先位置に換算した自重の慣性テンソルである。

一方、ペイロードには、同時に式 (10) で表される力が加えられている。従って、関節で発生したトルクをペイロードに効率よく伝えるには、モータのインピーダンスマッチングと同様の考えから、式 (12) の

$$(H^* + J^{*T}WH^*J^*) \quad (13)$$

と式 (10) の

$$WH^*J^* \quad (14)$$

の比が最も小さくなればよい。すなわちインピーダンスマッチングの観点から、ペイロードや自重に応じて最適なマニピュレータの作業姿勢や質量分布が存在することがわかる。例えば、冗長マニピュレータでは一つの作業軌道に対して複数の関節配置が考えられるが、できるだけ多くのトルクをペイロード側に伝え、早い応答を実現するには、式 (13), (14) の比が小さくなる関節配置を選択すればよい。

さて、インピーダンスマッチングは本来、モータギア比の選定において導入された概念⁴⁾であるが、これと式 (13), (14) を比較すると、ヤコビ行列 J^* がモータギア比の逆数に対応することがわかる。マニピュレータシステムでは、マニピュレータの姿勢に応じて手先に発生できる速度や力が変化するが、これはすなわち、モータ出力を固定してギア比を変化させているのと同価である。

3. 計算例

最も簡単な例として、図 1 に示す 1 自由度のマニピュレータを考える。これは質量 m_0 、慣性テンソル I_0 の衛星本体に質量のない長さ l のリンクが取り付けられ、その先に質量 m_1 、慣性テンソル I_1 のハンドが付けられている。また衛星とリンクは回転関節で直結され、関節角度を ϕ とする。

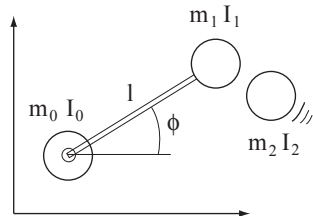


Fig.1 Example 1: 1 DOF model

この慣性テンソルは以下ようになる。

$$H^* = \frac{I_0(I_g - I_0)}{2I_g} \quad (15)$$

ただし、 I_g は重心周りの全慣性テンソル $I_g = l^2 \frac{m_0 m_1}{m_0 + m_1} + I_0 + I_1$ である

ここで、ハンドに質量 m_2 、慣性テンソル I_2 のペイロードが取り付けられたとすると、 $J^{*T}WH^*J^*$, WH^*J^* は次式で与えられる。

$$J^{*T}WH^*J^* = I_0^2 \frac{(I_g^n - I_g - I_2)(I_g + 4I_2) + I_g I_2}{I_g^2 I_g^n} \quad (16)$$

$$WH^*J^* = \begin{pmatrix} -\frac{l m_0 m_2}{m_0 + m_1 + m_2} \frac{I_0(I_g + 2I_2)}{I_g I_g^n} \sin(\theta_0 + \phi) \\ -\frac{l m_0 m_2}{m_0 + m_1 + m_2} \frac{I_0(I_g + 2I_2)}{I_g I_g^n} \cos(\theta_0 + \phi) \\ \frac{I_0 I_2 (2I_g^n - I_g - 2I_2)}{I_g I_g^n} \end{pmatrix} \quad (17)$$

ただし、 I_g^n は、新たな重心周りの全慣性テンソル $I_g^n = l^2 \frac{m_0(m_1 + m_2)}{m_0 + m_1 + m_2} + I_0 + I_1 + I_2$ である。これより $m_2, I_2 \rightarrow 0$ で $J^{*T}WH^*J^* \rightarrow 0$, $m_2, I_2 \rightarrow \infty$ で $J^{*T}WH^*J^* \rightarrow \frac{I_0^2(I_g + 4I_1^2 \frac{m_0^2}{(m_0 + m_1)})}{I_g^2} = J^{*T}R_h^{-T}MR_h^{-1}J^*$ である。

さて、 $m_2 = 1$ とし、 $m_0 = 1, m_1 = 2$ と $m_0 = 2, m_1 = 1$ の場合に対して、式 (16), (17) を計算した結果を表 1 に示す。この結果は、効率的に力を伝達する

Table 1 Calculated impedance

(m_0, m_1)	(1,2)	(2,1)
$(H^* + J^{*T}WH^*J^*)$	991	499
$ WH^*J^* _{xy}$	187	187
Impedance ratio	5.30	2.67

には手先よりも衛星本体を重くした方がよいことを示しており、これは直感と一致する。

次に、30 自由度を有する蛇型ロボットを考え、一端を衛星本体に、他端をペイロードに固定しているとする。ここで図 2 に示すように 2 つの初期姿勢を考え、それぞれペイロードを衛星本体に近づけるのに必要な関節トルクを比較した。衛星の重量は 1000[Kg]、ペイロードは 300[Kg] で、最大加速度は $0.1[m/s^2]$ である。

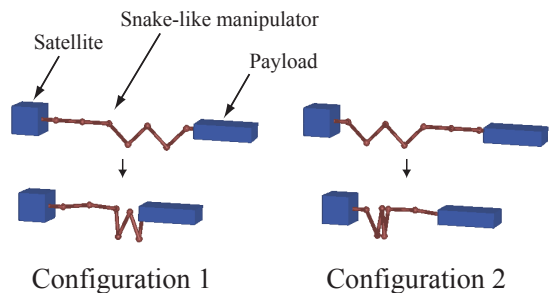


Fig.2 Example 2: Space redundant robot

双方の条件に対して式 (13), (14) の比を計算した結果、移動開始時で初期状態 1 に対しては 1.04, 初期状態 2 に対しては 1.14 であり、移動開始時では状態 1 が有利であると予想された。

そこで実際に加速、減速のシミュレーションを行い、ペイロードに加えられた力と、各関節で発生したトル

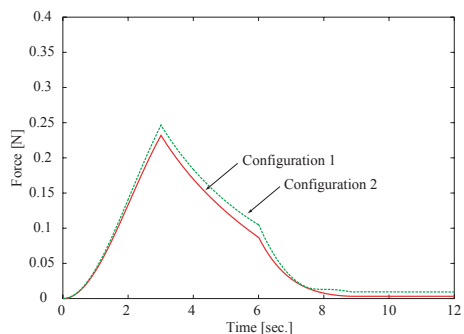


Fig.3 Force applied to the payload

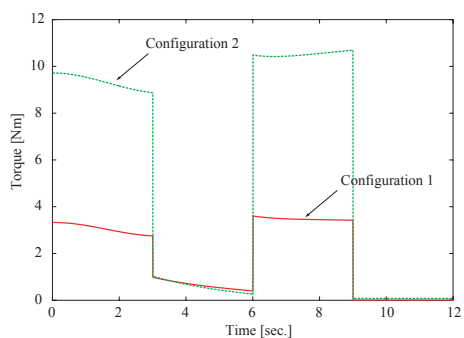


Fig.4 Total joint torque

クを計算した。これらを図 3,4 に示す。これより、明らかに状態 1 の方が生成したトルクをペイロードの移動に有効に使用していることがわかる。

4. まとめ

フリーフライングロボットの微小重力下におけるペイロードの移動作業に対し、関節で生成したトルクを効率よく伝達するための指標として、フリーフライングロボットの自重とペイロードの荷重のインピーダンスマッチングを提案した。

今後は、このインピーダンスマッチングの考え方を実際の動作計画へ適用する手法を開発する予定である。

参考文献

- 1) K. Yoshida, K. Hashizume and S. Abiko, Zero Reaction Maneuver: Flight Validation with ETS-VII Space Robot and Extension to Kinematically Redundant Arm, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, pp.441-446.
- 2) 吉田, 指田, 梅谷: 拡張逆慣性行列を用いた浮遊リンク系の衝突運動の定式化, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3, pp.108-116, 1993.
- 3) 吉田, 倉爪, 梅谷: 宇宙ロボットの多腕協調制御 (スタビライジングアームの利用による 制御トルクの最適化), 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6, pp.718-726, 1991.
- 4) 広瀬: ロボット工学, 裳華房, 1987.