

## 惑星探査ローバの運動解析 Analysis of Motion for Exploration Rover

○渡辺一史<sup>1</sup>, 内山賢治<sup>2</sup>

\*Hitoshi Watanabe<sup>1</sup> and Kenji Uchiyama<sup>2</sup>

Abstract: This paper describes dynamic behavior of an exploration rover. Autonomous guidance and control for rovers is indispensable because the time delay between a rover on a planet and the Earth cannot be ignored to reach final destination while avoiding obstacles on uneven terrain. Then the motion of four-wheeled exploration rover called “Rocker bogie suspension” is formulated by using Newton-Euler approach.

### 1. はじめに

惑星探査ローバは、月や惑星の地球外資源または生命の探査などを目的としたミッションを実行する際の重要な技術の一つである。実際、NASA の Spirit と Opportunity と呼ばれる 2 台のローバが火星に水が存在したことを発見し、その意義が実証されている。

地球と惑星間では通信時間の遅れが存在し、遠隔操縦することは現実的ではない。したがって、ローバには障害物を自身で判断し回避する誘導制御技術が要求される。ここでは、惑星探査ローバの自律誘導制御技術を実現する準備としてローバの運動方程式を導出し、その動的挙動を解析することを目的とする。

### 2. 運動方程式の導出

#### 2.1 座標系の定義

図 1 にローバのモデルと座標系の定義を示す。なお、座標を示していない他の関節についても同様に座標を定義する。各関節座標は回転軸まわりに  $z$  軸をとるようにし、その軸まわりにのみ回転運動を考慮すれば良いので、ローバの関節の自由度は 10 自由度となる。ベース部は並進と回転の計 6 自由度を有していることから、ローバ全体の自由度は 16 自由度となる。

図 2 に車輪部分の拡大図を示す。車輪に固定される車輪座標系は鉛直上向きに  $z$  軸がある右手系とする。この座標系は車輪のピッチ運動からの干渉を受けないとし、ヨー運動に対してのみ動くものとする。

#### 2.2 リンクパラメータ

前節で定義した座標間の関係を記述するために D-H (Denavit- Hartenberg) パラメータを導入する。それを表 1 にまとめる。

この D-H パラメータを使用することで座標間の関係が(1)と(2)式で表現できる。

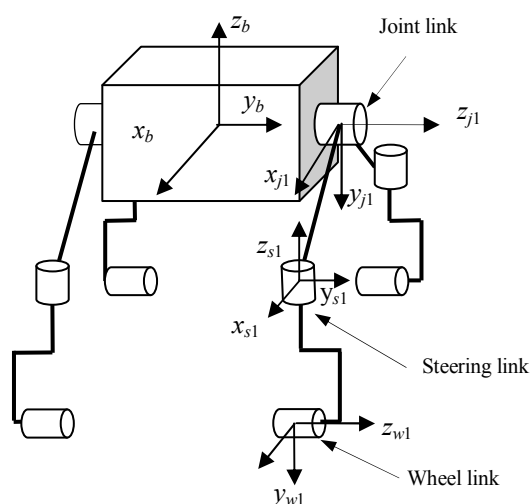


Figure 1. Rover model

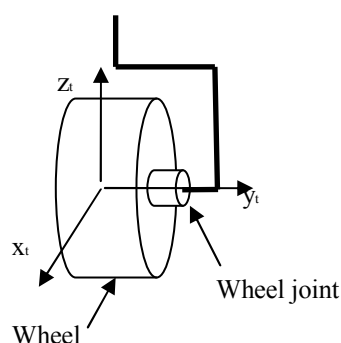


Figure 2. Wheel model

$${}^{i-1}p_i = \begin{bmatrix} a_{i-1} \\ -\cos(\alpha_{i-1})d_i \\ \sin(\alpha_{i-1})d_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^{i-1}R_i = \begin{bmatrix} \sin \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Table1.D-H parameter

	Rocker bogie		Steering				Wheel			
	1	2	1	2	3	4	1	2	3	4
$a_i$	0		$L_f$		$L_r$		0			
$d_i$	$b/2$	$-b/2$	h				0			
$\alpha_i$	$-\pi/2$		$\pi/2$				$-\pi/2$			
$\theta_i$	$\theta_j$		$\theta_s$				$\theta_w$			

本稿では、表 1 に示した変数を以下のように定義する。

$a_i$  :  $x_i$  軸にそって測られる  $z_i$  軸  $z_{i+1}$  軸までの距離

$d_i$  :  $z_i$  軸にそって測られる  $x_{i-1}$  から  $x_i$  までの距離

$\alpha_i$  :  $z_i$  と  $z_{i+1}$  とが  $x_i$  軸まわりになす角度

$\theta_i$  :  $x_{i-1}$  軸と  $x_i$  軸とが  $z_i$  軸まわりになす角度

### 2.3 運動方程式の導出

図 1 に示したローバの運動はマルチボディダイナミクスとして定式化される。ここでは Newton-Euler 法を用いて運動方程式を導出する。ただし、

まず、関節部の角速度、角加速度、並進加速度および質量中心での並進加速度は以下の式で表せる。

$$\omega_i = {}^i R_{i-1} \omega_{i-1} + e_{zi} \dot{\theta}_i \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_i = {}^i R_{i-1} \dot{\omega}_{i-1} + e_{zi} \ddot{\theta}_i + ({}^i R_{i-1} \omega_{i-1}) \times e_{zi} \dot{\theta}_i \quad (4)$$

$$\ddot{p}_i = {}^i R_{i-1} [\ddot{p}_{i-1} + \dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1} p_{i-1} + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times {}^{i-1} p_{i-1})] \quad (5)$$

$$\ddot{s}_i = \ddot{p}_{i-1} + \dot{\omega} \times s_i + \omega_i \times (\omega_i \times s_i) \quad (6)$$

次に 各リンクの質量中心に作用する力とモーメントを求めると次式のようなになる。

$$f_{Gi} = m_i \ddot{s}_i \quad (7)$$

$$n_{Gi} = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i) \quad (8)$$

また、各関節にかかる力、モーメントおよびトルクは (9)~(11) 式のように表せる。

$$f_i = {}^i R_{i+1} f_{i+1} + f_{Gi} \quad (9)$$

$$n_i = {}^i R_{i+1} n_{i+1} + n_{Gi} + s_i \times f_{Gi} + {}^i p_{i+1} \times ({}^i R_{i+1} f_i) \quad (10)$$

$$\tau_i = e_{zi} n_i \quad (11)$$

ローバ本体に作用する力とモーメントについては(12)式および(13)式となる。ただし、(13)式中のパラメータ

$p_b$  は慣性系からベース質量中心までの位置ベクトルを表す。

$$f_b = {}^b R_j f_j + F_{Gb} \quad (12)$$

$$n_b = {}^b R_j n_j + {}^b p_j \times ({}^b R_j f_j) + N_{Gb} + p_b \times F_{Gb} \quad (13)$$

ローバ本体に作用する力とモーメントは

$$F_{Gb} = m_b \dot{v}_b \quad (14)$$

$$N_{Gb} = I_b \dot{\omega}_b + \omega_b \times (I_b \omega_b) \quad (15)$$

となる。これらの式によりローバの運動方程式は記述されることになり、そのフローチャートを図 3 に示す。

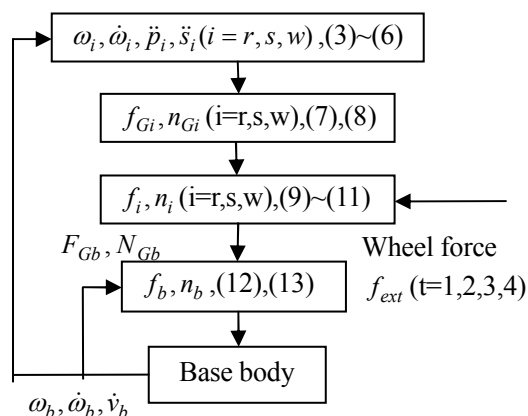


Figure3.Flow chart of rover dynamics

一般的には、惑星探査ローバの非線形運動方程式は次式のようなマトリクス形式で表現される。

$$M(q) \begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{\omega}_b \\ \ddot{\theta}_j \\ \ddot{\theta}_s \\ \ddot{\theta}_w \end{bmatrix} + C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} f_b \\ n_b \\ \tau_j \\ \tau_s \\ \tau_w \end{bmatrix} \quad (16)$$

ただし、(16)式における  $M(q)$  は慣性マトリクス、 $C(q, \dot{q})$  は速度の非線形項である。

### 3.まとめ

惑星探査ローバの運動方程式を導出した。今後は障害物回避やミッション遂行を自律的に行える誘導制御システムの構築を行う。

### 参考文献

- [1]内山勝, 中村仁彦;「ロボットモーション」, 岩波書店,2004年.
- [2]石上玄也;「月・惑星探査ローバのステアリング特性に基づく走行力学の解析」, 東北大学院工学研究科,平成 16 年度修士学位論文