

惑星探査ローバーのテストベッド開発と走行実験

Development of Proto-Explorer and Its Initial Experiments

吉田 和哉, ○志和 知子

Kazuya Yoshida, ○Tomoko Shiwa

東北大学

Tohoku University

キーワード : 惑星探査 (Planetary Exploration), 車輪走行ロボット (Wheeled Vehicle), 不整地走行 (Rough Terrain Locomotion), デッドレコニング (Dead-Reckoning), すべり (Slippage)

連絡先 : 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻 吉田研究室
吉田 和哉, Tel.: (022)217-6992, Fax.: (022)217-6992, E-mail: yoshida@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

これからの宇宙開発の一つの方向として NASA (米航空宇宙局), JPL (米ジェット推進研究所), ISAS (宇宙科学研究所), NASDA (宇宙開発事業団) などの諸機関で月・火星探査のミッションが計画されている。現在の技術の延長から考えると, テレオペレーションを用いた遠隔操作ロボットによる探査活動が最も実現性が高い。しかし宇宙環境においては通信遅延や伝送容量不足の問題があり, 探査ローバーには相応の自律ナビゲーション能力が求められる。さらに, ローバーの走行系には月・火星表面の不整地を走行するため, それなりの踏破性能が必要である。

日本では, ローバーに関する本格的な研究は ISAS や NASDA で開始されているが, 大学での研究は非常に少ない。広瀬ら¹⁾はローバーの走行系設計について精力的な研究を行っているが, 不整地における走行制御やナビゲーションについての研究

は未着手のままである。特に車輪走行の自律化を考える場合, 車輪と地面のすべりが重要になる。すべりや車輪の空回りによりローバーの走行制御精度は落ち, エネルギーが無駄に失われるなどの問題が生じる。しかし, 自然環境における実用的なすべりモデルは明らかでなく, 具体的なすべり計測についても報告はほとんど見当たらない。

本研究では, 自然環境における車輪走行ローバーの走行制御に関する研究に重点を置き, すべりを最小化する走行制御法の確立とテレオペレーション支援による自律走行制御の2つを最終目標とする。その初年度として, 不整地踏破能力の高いローバーの走行モデルを製作し, 走行制御の基礎となるすべりを含む運動計測を行う。

2. ローバーの機構に関する考察

ローバーは厳しい環境や不整地での走行が可能でなければならない。過去に試作されたものや現在アメリカ, ロシアを中心として開発されている

惑星探査ローバーは、踏破性能に優れた6輪型が主流であり、大きく分けると以下の2つのタイプに分類される。

タイプA：3節連結形

タイプB：分散支持形

タイプAは左右一対の車輪をつけた節を3節連結した形であり、JPLのRobby、ロシアのMarsokhodなどに見られる。このタイプは不整地踏破性能に優れ、研究用のテストベッドには適しているものの胴体が3つに分割されることから、フライトモデルとしては設計しにくいことが指摘されている。

タイプBは6つの車輪をてこを用いて分散して支持するものであり、胴体を分割する必要はない。Rocker-Bogieと呼ばれるてこ連結方式は障害物を乗り越える能力が高いことが知られており、この方式はアメリカの火星探査PathFinder計画に採用され、すでに火星に向けて打ち上げられた²⁾。しかし、車輪内にモーターを組み込む必要があり、さらに別途ステアリング用のモーターが必要であるなど、機構としては製作しづらいというデメリットがある。

本研究では研究用テストベッドとして踏破性能に優れ、かつ設計・製作が容易であるタイプAを採用し、走行モデルを開発する。

3. 開発するローバーの構成

本研究で開発する走行モデルの構成をFig.1に示す。左右一対の車輪をもつ3つの節が受動関節によって連結されている。第1節と第2節の間はロールジョイントとヨージョイントの2自由度関節とし、ヨージョイントには板バネによるコンプライアンスを持たせる。第2節と第3節の間はロールジョイントとピッチジョイントの2自由度関節とし、ピッチジョイントには板バネによるコンプライアンスを持たせる。

第1節、第2節上の4つの車輪は駆動輪とし、

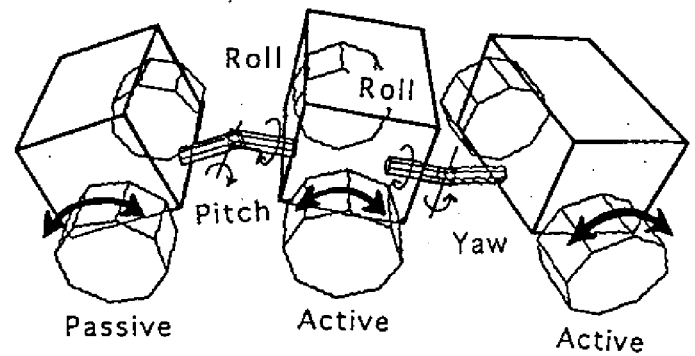


Fig. 1 Mechanism Design

DCモーターにより駆動する。第3節上の2つの車輪はデッドレコニング計測のための従動輪とする。

すべての車輪およびジョイントにはポテンシオメーターを取付け、その回転の様子を計測する。

4. キネマティクスモデル

Fig.2にローバーのキネマティクスモデルを示す。本論文で使用する記号の一覧をTable 1に示す。

Table 1 本論文で使用する記号の一覧

d	: 車輪直径
r	: 節重心から車輪間の距離
\vec{p}_1	: ジョイント1から第1節までのベクトル
\vec{p}_2	: 第2節からジョイント1までのベクトル
\vec{p}_3	: ジョイント4から第2節までのベクトル
\vec{p}_4	: 第3節からジョイント4までのベクトル
A_j	: 各節間の座標変換行列
$C_n(\theta)$: n 軸まわりの座標変換行列
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$: 各節座標系の主軸方向単位ベクトル

第3節は従動節なので、基本的にすべりはないと仮定する。走行時の従動輪の回転角速度 $\dot{\phi}_{3R}$, $\dot{\phi}_{3L}$ から第3節の速度と角速度が(1), (2)式により求められる。

$$\vec{v}_3 = d(\dot{\phi}_{3R} + \dot{\phi}_{3L})\vec{i} / 2 \quad (1)$$

$$\vec{\omega}_3 = d(\dot{\phi}_{3R} - \dot{\phi}_{3L})\vec{k} / 2r \quad (2)$$

また、 $\theta_1 \sim \theta_4$, $\dot{\theta}_1 \sim \dot{\theta}_4$ の計測値を用いて各節間のキネマティクスの関係から(3)~(6)式により第1節、第2節の速度・角速度が求められる。

$$\vec{v}_2 = {}^2A_3(\vec{v}_3 + \vec{p}_4 \times \vec{\omega}_3) + \vec{p}_3 \times \vec{\omega}_2 \quad (3)$$

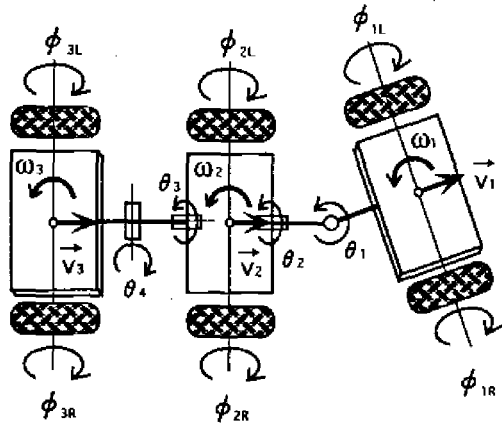


Fig. 2 Kinematics Model

$$\bar{w}_2 = {}^2A_3\bar{w}_3 + \dot{\theta}_3\vec{i} + \dot{\theta}_4C_1(\theta_3)\vec{j} \quad (4)$$

$$\vec{v}_1 = {}^1A_2(\vec{v}_2 + \vec{p}_2 \times \bar{w}_2) + \vec{p}_1 \times \bar{w}_1 \quad (5)$$

$$\bar{w}_1 = {}^1A_2\bar{w}_2 + \dot{\theta}_1\vec{k} + \dot{\theta}_2C_3(\theta_1)\vec{i} \quad (6)$$

第1節, 第2節の駆動輪が仮りにすべりが無いとした時の理想的な回転角速度 $\dot{\phi}_{nominal}$ は, 以下のように求められる.

$$\dot{\phi}_{2Rnominal} = (-r\bar{w}_2 + \vec{v}_2 \times \vec{j})_z / d \quad (7)$$

$$\dot{\phi}_{2Lnominal} = (r\bar{w}_2 + \vec{v}_2 \times \vec{j})_z / d \quad (8)$$

$$\dot{\phi}_{1Rnominal} = (-r\bar{w}_1 + \vec{v}_1 \times \vec{j})_z / d \quad (9)$$

$$\dot{\phi}_{1Lnominal} = (r\bar{w}_1 + \vec{v}_1 \times \vec{j})_z / d \quad (10)$$

(7)~(10)式で求めた角速度と, それぞれの駆動輪で計測される実際の回転角速度 $\dot{\phi}_{actual}$ との差が空回りによるすべり量を表す.

$$Slippage = \dot{\phi}_{actual} - \dot{\phi}_{nominal} \quad (11)$$

5. 走行制御系

(11)式によって求められるすべり量(Slippage)を用いてそれを最小化する制御系は, たとえばFig.3のように構成することができる.

ローバーの走行軌道を計画するサブシステムから, 目標軌道(Desired Trajectory)が与えられる場合, コントローラーは現在位置との誤差(Trajectory error)を零に近づけるように車輪の回転速度

を制御する. しかし車輪が空回りしている場合には, 回転速度をいくら大きくしても軌道誤差は縮まらず, むしろ回転速度をいったん下げて接地力を回復した方が効果的な場合が多い. このような操作は, すべりの状況に応じて Regulation Rules としてコントローラーに与えられる.

Regulation Rules は, 車輪のダイナミクスを解析し最適接地条件を求めることにより定めることができると考えられるが, 試行錯誤を繰り返すことにより学習的にルールを発見するほうが実用的には有効かもしれない.

6. 走行実験

今回製作したローバー (Prot-Explorer) を Fig.4, その諸元を Table 2に示す.

本研究では, まず平坦な地面と凹凸のある地面でローバーの走行試験を行い, 不整地走行性能を確認した. また平地上を50秒間走行させ, ローバーの移動距離およびそれぞれの車輪とジョイントの回転角を計測し, 従動輪を用いたデッドレコニングの精度検証と駆動輪のすべり推定の実験を行った.

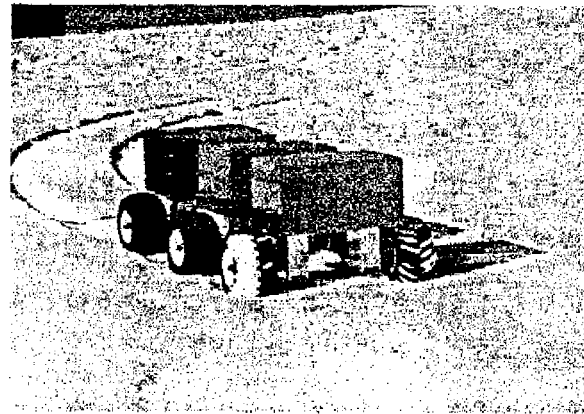


Fig. 4 Proto-Explorer

6.1 デッドレコニングによる走行軌跡

実験で得られたデッドレコニングによる走行軌跡を Fig.5 に示す. 走行開始時のローバーの位置

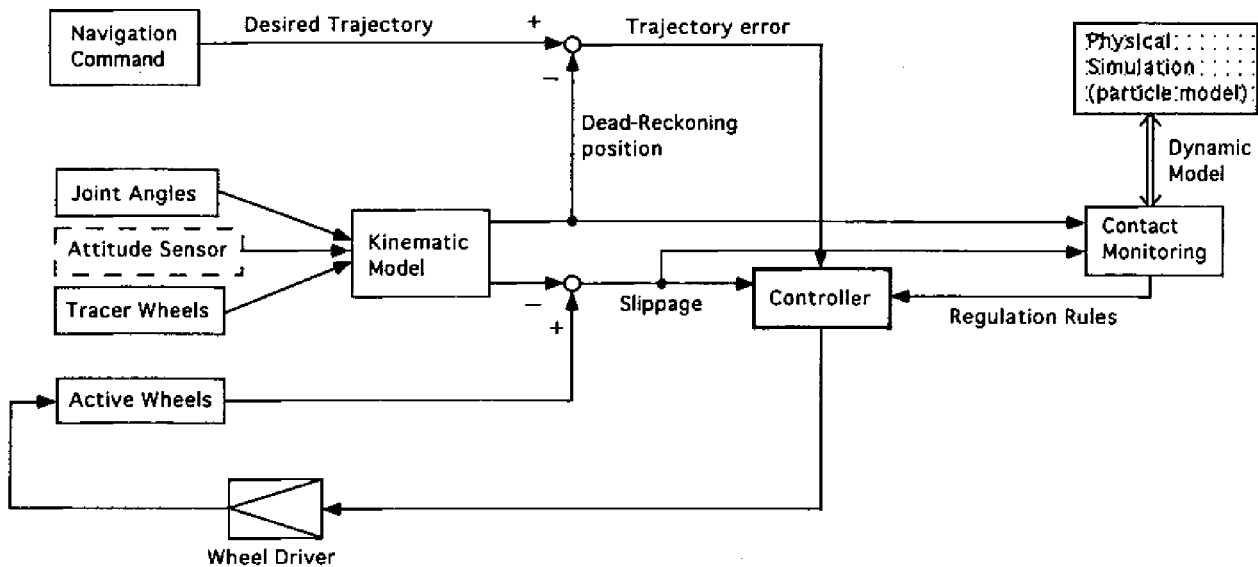


Fig. 3 走行制御系

Table 2 ローバーの諸元

外形寸法	[mm]
長さ×幅×高さ	90 × 500 × 330
車輪直径	170
全質量	16.35 [kg]
モータ	0.3 × 4
バッテリー (駆動用)	0.7 × 2
ジョイスティック	1.35
バッテリー (速度制御用)	0.2 × 2

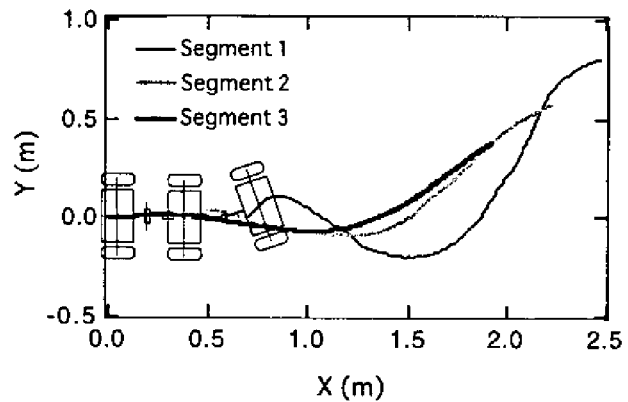


Fig. 5 Dead-Reckoning Measurements

を原点とし、進行方向を x 軸、横方向を y 軸とする xy 平面を考える。

データを解析した値と走行終了点の絶対位置計測の値とを比較すると、進行 (x) 方向の誤差は 1% 程度であった。しかし横 (y) 方向の誤差はこれよりも大きく、走行経路が蛇行しているほど大きな誤差が生じやすいことがわかった。

横方向は第 3 節の姿勢角を基準として求められるが、第 3 節の xy 平面上での姿勢角は左右の車輪の回転角の差から求めるため、誤差が大きくなりやすい。

6.2 駆動輪のすべり

上に示した実験データを用いて前述の関係式から駆動輪のすべりを推定した。

結果は以下の式で定義されるすべり率で表し、Fig.6に示す。

$$SlippageRatio = Slippage / \dot{\phi}_{nominal} \quad (12)$$

Fig.6より、第 1 節の方が第 2 節よりも大きなすべりが生じ、ステアリング時には外側で正のすべり、内側で負のすべりが発生するという傾向が観察される。

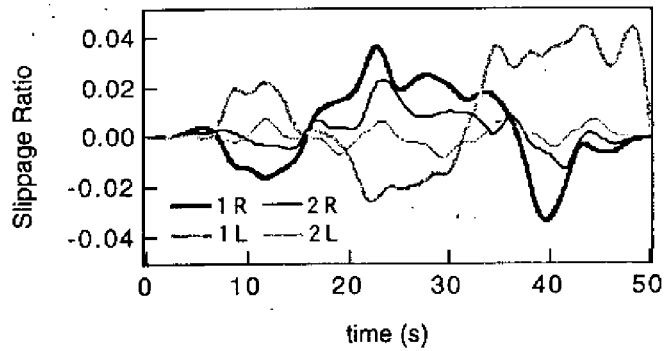


Fig. 6 Slippage Ratio of Active Wheels

このようなすべりのデータをローバーの走行制御系にフィードバックし、すべりを最小化するような速度制御をすることにより、もし障害物に乗り上げて駆動輪の一つが空回りしているとしても、そのような状況から抜け出すことが期待できる。

7. おわりに

本研究では不整地踏破能力の高いローバーの走行モデルを製作し、走行性能の確認および実験を行った。車輪走行ローバーにデッドレコニング計測のための従動輪を設けることは、ナビゲーションや走行制御において有効であり、その基礎として従動輪と駆動輪の回転を比較することにより、すべり量の計測を行った。また、すべりを最小化する走行制御系のアイデアを示した。

今後の課題として、計算機を搭載した走行制御法の実験があげられる。

参考文献

- 1) 広瀬, 桑原, 若林: 三輪月面ローバーの開発, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 249/250 (1996)
- 2) R.Volpe, J.Balaram, T.Ohm, and R.Ivelev: The Rocky 7 Mars Rover Prototype, IROS 96, 1558/1564 (1996)