# 特集「無人観測ロボット」 自立移動ロボットによる火山地域の探査活動 大槻 真嗣<sup>1</sup>,石上 玄也<sup>1</sup>,嶋田 貴信<sup>1</sup>,久保田 孝<sup>1</sup>,作田 真理子<sup>2</sup>, オリチロン アン<sup>2</sup>,大津 恭平<sup>2</sup>,清水 拓<sup>2</sup>

(要旨) 我々のグループは,将来の月惑星表面探査をめざして,移動型探査ロボットの研究開発を進めている. 開発したロボットは,宇宙のみならず,火山地域などの不整地においても自由自在に探査を行うことができ る.現在,屋内および屋外において基本性能の評価を行っており,2011年秋に,伊豆大島にて探査実験を 行った.実験では,観測地点への誘導制御,観測行動の運用試験を行い,火山地形における探査の課題を明 確にした.提案するロボットは,太陽電池による発電を行い長時間の自立運用が可能なため,人間が入るこ とのできない場所・状況での観測に適している.本稿では,探査ロボットの概要および試験結果について報 告する.

# 1. 緒 言

2012年4月現在,約90機[1]の惑星着陸探査機が打 ち上げられ、その内11機がいわゆる惑星探査ローバ (ロボット)に分類される。また、ローバ11機中6機 が惑星表面で活動した実績があり、現在火星へ向けて 1機が航行中である.図1へ過去に打ち上げられた(失 敗含む)ローバと今後予定されているものを質量と年 代で分類した一覧を記載する.これらのローバは、観 測機器を着陸地点より遠くに運搬し.多くの場所で科 学的な知見を獲得することに貢献している. このよう な惑星探査ローバにおいて、本質的に要求される機能 は惑星表面の特殊な地形を走行することである. した がって、いずれのローバも降り立つ天体に合わせた移 動機構を持つ、火星ローバのソジャーナ(Sojourner), スピリット(Spirit),オポチュニティ(Opportunity), キュリオシティ(Curiosity)は6つの車輪とロッカーボ ギーサスペンション[2], 同じくPrOP-M(Pribori Otchenki Prokhodimosti-Mars)はスキー板を回転させ て前方へ送り出し、車体下の摩擦で反力を受けとめな がら前進する歩行機構[3]. 月面ローバのルノホート

otsuki.masatsugu@jaxa.jp



図1:惑星探査ローバの歴史(縦軸:打上年,横軸:ローバ質量).

(Lunokhod)は8つの車輪とトーションバー[4],小惑 星 探 査 ロ ー バ のPrOP-F(Pribori Otchenki Prokhodimosti-Fobos)は、バネによりエネルギを蓄えた傾 いたピストンによるホッピング機構とウィスカーと呼 ばれる姿勢直立機構[5],同じくMINERVA(MIcro/ Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid)は二 つのトルカによるホッピング機構[6]を有していた。

人の手に届かない過酷な環境下で活動する,そうい った意味では,惑星探査ローバと火山探査ロボットに 大きな差はない.ローバまたはロボットが存在する環 境は異なり,たとえば,重力,放射線の量,大気圧, 土壌の特性,周囲温度,インフラ設備(GPS衛星,無 線通信等),操作者からの距離などに大きな違いが見

<sup>1.</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

<sup>2.</sup> 東京大学大学院工学系研究科



図2: ローバシステムの詳細と試験フィールド.

られ,各々固有の問題が存在する.たとえば,惑星探 査ローバが存在する環境では,雰囲気温度変化が大き く,重力が小さく,強い放射線が存在し,ローバの活 動を制限する.一方,強風や雨などの気象条件が短時 間で急激に変化することが火山探査ロボットでは問題 となる.

惑星探査ローバや火山探査ロボットでは、テレメト リやコマンドデータ<sup>1</sup>の送信時間が長い、さらには通 信自体ができない場合が考えられ、直接操作するには 限界がある.そこで、双方に高いレベルの自律機能<sup>2</sup> が要求され、たとえば、コンテクスト<sup>3</sup>の情報に基づ いて、目標地点まで操作者の判断結果を待たずに移動 できる程度の能力が求められる.我々は、その機能を 検証するための試作機として、図2に示す"Micro-6" を開発した.これを用いて、走行機能や航法誘導試験、 電源管理や将来のミッションで要求される自動制御の 試験を行っている.また、このローバは5つの車輪を 持ち、いずれの車輪もステアリング角度を変えること ができ、全方位に移動可能である.左右2つの車輪は、

- ローバの状態や設定パラメタ等の地上局への送信データをテレメトリデータ,指令やプログラム等のローバへの送信データをコマンドデータと呼んでいる.
- 2.本論文では、「自立」と「自律」、これらの言葉を使い分けている、「自立」は、システムとしてコンテクストから独立して存在していること、例えば電源や通信などを有線で接続していない、そのような状況を示す際に使用している。一方、「自律」は、ローバ自身の自動制御、経路計画や環境認識など手順に従って自動で行動を発現するもしくは自分でふるまいをスケジューリングする機能を示す際に使用している。
- 3.ここではシステムをオブジェクト、アクション、インタラクション、コンテクストから構成されていると定義し、コンテクストは時間的な前後関係や周囲環境、他のシステム等を示している。また、システムは複数のサブシステムから構成され、サブシステムはコンポーネントから構成される、このような階層構造を有すると仮定している。

受動的なロッカーサスペンションにより結合され,結 果として,車体のピッチ角度変化は何もない場合と比 較して半分に抑制されている.また,航法誘導用にス テレオカメラを2セットとレーザ距離計(Laser Range Finder, LRF)を持ち,科学的なサンプルを採取する ためのマニピュレータ<sup>4</sup>を搭載している.

本活動では、惑星探査ローバと火山探査ロボットの 存在する環境の違いに起因した問題は無視し、共通し た課題である、自律航法誘導に資する情報を得ること をその主目的とする.本稿では、惑星探査ローバ Micro-6の火山地域での走行試験を通じて、共通した 課題の抽出やサブシステムレベルで必要な機能の評価 を行う.走行機構の試験では、傾斜の登坂/下降の走 破性能、段差の乗り越え性能等を評価している.また、 その試験中に機械的な振動特性と電力消費量を計測し、 将来ミッションでの課題を抽出する.さらに、ステレ オカメラまたはLRFを用いた自律航法誘導制御の成 立性を確認し、最後に、マニピュレータによるサンプ ル採取作業結果を示す.

## 2. ローバのシステム構成

試作したローバのハードウェアの構成を図2に示す. 本ローバシステムは,走行機構(駆動系),電源系,マ ニピュレータ系,航法誘導制御系,センサ系,通信系, データ処理系,構造系,熱制御系サブシステムで構成 される.これらのサブシステムがMicro-6のフィール ド試験場での自立行動を実現させている.表1に,ロ ーバの主な仕様をまとめ,各サブシステムの詳細につ いては後述する.

## 2.1 走行機構

試作したローバは5つの独立した車輪を有しており, いずれも直径0.22 m, 幅0.17 mとなる. 車輪の接地 面には、18枚のシリコン製のラグが締結されており, 牽引力<sup>5</sup>とグリップ力<sup>6</sup>の増加に貢献している. 車輪 のアクチュエータとして、DCブラシ付モータ(Maxon RE-max 24, 11 W)を使用し、各モータにはエンコー ダが取り付けられている. また、モータ出力軸には、

<sup>4</sup> 人間の「腕」を模倣した機械のことをロボットアームもしくは マニピュレータと呼んでいる。

<sup>5.</sup>ローバ本体を前進させる力

<sup>6.</sup>車輪接地面と土壌面の結合力

表1	:	ローバシステムの諸元.
----	---	-------------

	Physical				
Mass	80 kg (Approx.)				
Dimonsion	$0.7 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$ (Wheelbase)				
Dimension	$1.3 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ (SAP deployed)				
Mobility					
	$0.22 \text{ m} \text{ (diameter)} \times 0.17 \text{ m} \text{ (width)}$				
Wheel	Lugs: silicon rubber made				
	Actuator: DC brushed motor				
Velocity	0.1 m/s (max)				
Power management & control					
Solar array panel	3 panels, 120 W (max)				
Battery	Dual 7 Li-Po in series (10 Ah in total)				
Bus power control	Unstable 28 V bus power supply,				
	regulated to 24, 12, 5, and 3.3 V				
Communication					
Device	Wireless Ethernet with				
Device	low gain whip antennas (2.4 GHz band)				
Max. data rate	54 Mbps (ideal), 20 Mbps (fact)				
Sensor					
Absolute position/	GPS, 3-axis acceleration pick-up,				
Attitude/Orientation	3-axis gyro, Geomagnetic sensor				
Navigation	CCD camera pair, Laser Range Finder (LRF)				
	On board computer				
HK data handling	4 sets of 240 MHz SH-4 running ART-LINUX				
Navigation					
Motor control					
Operational mode	Direct tele-operation, Autonomous				
	Mission payload				
Manipulator	4-DOF actuated by ultrasonic motors				
wampulator	End offector i cherrel huidret true				



図3: 電源系のブロック線図(充放電ユニットの記載は省略).

遊星ギヤ(19:1)とハーモニックドライブ(100:1)が 二段構成で取り付けられており,低消費電力・高トル クを実現している.最大行速度は0.1 m/s,車輪の定 格力は効率を加味しても130 Nとなる.モータはドラ イバのPWM(Pulse Width Modulation)駆動<sup>7</sup>により 目標速度へ追従制御され,目標速度は沈下やスリップ [7],振動[8]を抑制するように滑らかに整形されている.

すべての車輪は能動的にステア駆動され,ステアリ ングを含むモータユニットは,比較的剛なアームに締 結されている.ステアリングのアクチュエータは, DCブラシ付モータ(Maxon RE-max 24, 6.5W),絶対 角度を計測するポテンショメータ,遊星ギヤ(84:1) とハーモニックドライブ(100:1)の二段ギヤにより構 成されている.ステアリングの最大回転速度は3 deg/ s,定格トルクは効率込で50 Nmとなる.このステア リングモータはオンオフ駆動されるが,その位置決め 精度は0.5度以下となる.

左右合わせて4つの駆動ユニットとステアユニット は、ロッカーサスペンションアームにつながり、車体 の左右で逆に上下する.結果として、車体はピッチ方 向に対して、常に左右アームの中間に位置することに なり、ピッチ角度の変化は緩やかになる.サスペンシ ョンは受動的な回転軸とシーソー機構により構成され、 距離の離れた2点で接続されているため従来のものよ りも剛性が高くなっている.結果として、ピッチ角度 変化の低減と剛性の向上による振動の低減が図られて いる.さらに、冗長系となる車輪を車体の中央位置底 部へ搭載し、これにより牽引力の増加が期待できる.

## 2.2 電源系

ローバ電源系特有の課題として,以下のようなこと が想定されている.まず,走行に伴って太陽角が変動 し,太陽電池アレイの発生電力が安定するとは限らな い.さらに,月や惑星の表面上では岩の陰やクレータ 底部など太陽光を遮る障害物・地形が多く,頻繁なバ ッテリの放電が予想される.また,ローバはモータ駆 動により走行するため,小岩を乗り越える時や急な斜 面を登る際に,パルス的な大電力が必要とされる.こ の場合日照中であってもバッテリ放電による電力の補 償が必要となる.

上記課題を踏まえて、図3に示されるように、3つ の太陽電池パネル(Solar Array Panel, SAP),最大 電力追尾装置,二次電池(リチウムポリマー電池),電 気二重層キャパシタ,バス電力供給・バッテリ充放電・ 電源分配の機能を司る電力制御器,これらによりロー バの電源系を構築した.

各太陽電池パネルは単結晶Siセル32直列から構成 され,最大発電量は一枚当たり40W程度(3枚で120 W程度)となる.太陽電池パネルによる発電が行えな い場合でも2~3時間の動作を行えるように,バッテ リには5Ahのリチウムポリマー電池を7直列で構成 した組電池を2系統搭載している.また,頻繁な充放 電の繰り返し・パルス的な大電力負荷を補償するため, 大容量キャパシタを併用した蓄電システムを搭載して

<sup>7.</sup>モータへの印加電圧をトランジスタのオンオフスイッチング で調節する速度制御方法の一種.

いる.

電力制御器は、日照期間中に太陽電池パネルによっ て得られた電力を安定した一次バス電圧へと制御し各 機器に供給する共にバッテリへの充電を行い、日陰期 間中にはバッテリからの放電により電力を供給する.

また、電源系の詳細は、既報[9]にて報告されている.

## 2.3 通信系

ローバからのテレメトリ送信,地上局からの位置ト ラッキング,地上局からのコマンド送信,これらはす べて2.4 GHz帯の無線通信経由で実施されている.無 線通信のルータがイーサネットハブへ取り付けられ, 約20 Mbpsで地上局とローバ間を接続している.ロ ーバ搭載のホイップアンテナゲインは6.2 dBiであり, 理想的な通信レートは54 Mbpsであるが,ローバと 地上局の距離に応じてレートは変化し,見通し900 m で最大6.5 Mbpsのレートで通信できることを確認し ている.

## 2.4 データ処理系

ローバには組込型 画像処理ボード(PowerPC 440EPX. CPU clock: 666 MHz)と4つの組込型オン ボードコンピュータ(On-Board Computer : OBC. SH7751R. CPU clock: 240 MHz)が搭載されている. また, インターフェースとして, A/D変換器やディ ジタルIOが多数用意されている。画像処理ボードは、 画像取得と初期処理, データ圧縮を主に実施し, 地上 局へ画像データを送信した後に、地上システムにて画 像解析を行っている.2つのOBCは短い周期のモータ の制御に用いられ、残りの2つのOBCは比較的長い 周期の様々なタスク、たとえば、システムの状態量の 取得、リソース(電力、時間、データ容量)管理、姿勢 と位置の推定, エラーチェック, パラメタ設定, 航法 誘導の意志決定等のタスクに使用されている。モータ の制御では、DCブラシ付モータや超音波モータなど 17個のモータを駆動し、走行機構やステアリング、 カメラ(LRF)パンチルト機構<sup>8</sup>.マニピュレータを動 作させている. 画像処理ボードとすべてのOBCは非 同期型<sup>9</sup>のイーサネット通信により相互に接続され、







図5: LRF による三次元地形データに基づく経路計画.

無線通信を介して地上局とも接続されている.したが って、すべての処理系は地上局からのコマンドを直接 受けることができ、設定されている機器のテレメトリ を個別に準備することができるようになっている.

## 2.5 センサ系

エンコーダ,ポテンショメータ<sup>10</sup>,可視光カメラ, LRF,電圧センサ,電流センサ,温度センサ,姿勢方 位参照システム(Attitude and Heading Reference System, AHRS)<sup>11</sup>, GPSレシーバなど多くのセンサ がローバには搭載されている.センサーデータの取得, A/D変換器による工学値変換,処理系へのデータ伝 送の後,ローバの状態量として,時間(ローカル時間, 絶対時刻),姿勢と角速度(ロール,ピッチ,ヨー方 向)<sup>12</sup>,位置と速度(相対位置,緯度,経度),3軸加速度, 温度,リソース量(電力,データ保存)と通信レート, これらが処理系により算出される.上記の変換された データに基づいて,自律移動やテレオペレーション<sup>13</sup>

9.ここでは、すべての通信端末が同じタイミングで動作してい ないことを述べている.

- エンコーダとポテンショメータはいずれも角度センサだが、 検出方式、検出値の基準が異なる.
- 11. ローバの傾斜角度, 姿勢角速度の他に,進行方向の絶対方位 角を検出することができるセンサ.
- 12.ローバ進行方向の軸周りの回転をロール,進行横方向の軸周りの回転をピッチ,慣性基準方向の軸周りの回転をヨーと定義している。
- 13. 遠隔操作技術.地上局にいる操作者が直接指令して一つ一つの動作を行わせることを言う.

114

<sup>8.</sup>水平方向ならびに重力方向に駆動するアクチュエータを持った、任意の方向ヘカメラやレーザを向けることのできる装置のことを言う。



図6:掘削,砂をすくう,かき集める,小石をつまむ等様々な作 業が可能なマニピュレータ.



図7:伊豆大島における試験地域(円と十字の中心がGPSの基準 局位置を示している).



図8: 試験地域におけるローバの走行軌跡.



図9: 左図: 段差の横断,右図: 障害物乗り越え.

が実施される.ここで,GPSレシーバは,ローバの走 行位置の推定,計測位置の精度を評価するためだけに 使用されている.ただし,単独測位のみではGPSに よる計測位置精度は数mとなってしまうため,後処 理による電子基準点との基線ベクトル解析<sup>14</sup>により, 数cmオーダの測位を実現している.電子基準点はフ ィールド試験場近傍には4点設置されており,それら との基線ベクトルのうち,最も雑音が少ないものを選 択して,真値として使用する.

## 2.6 航法誘導制御系

本ローバは、ジンバル上に設置した2台のCCDカ メラおよびLRFを用いて、障害物認識、地形環境認 識を行うことが可能である.搭載カメラは、640×480 の解像度を持ち、同画像は、ローバ搭載の処理系によ って取得される.また、LRFには北陽電機株式会社 製の二次元走査型レーザ距離計を採用した[10].同 LRFを水平方向にスキャンさせながら、ジンバルを 上下方向に駆動させることによって、3次元の地形デ ータを得ている.これらのカメラ画像およびLRF地 形データは、任意のタイミングで地上局へと伝送され る.

ローバの航法誘導システムは,主に,1)カメラ基本 と2)LRF基本の異なるフレームワークから構成され ている.カメラを用いた航法誘導では,まず,単眼カ

14. 基準点から参照点までの三次元方位と距離を計算する.



図10:障害物乗り越え時のローバの総消費電力と姿勢角度の時 刻歴.



図11:ローバの軟弱地盤走行の様子と軟弱地盤と固い地盤との 境界.

メラ画像からローバ前の障害物を抽出し、この注視点 周辺についてのみステレオ視を行うことによって、障 害物のサイズ、障害物までの距離を推算する.加えて、 画像テクスチャ解析に基づいた走破評価を行い、ロー バが走行すべき経路を生成する(図4)[11].このよう なカメラを用いた航法誘導は、NASAの火星ローバ にも実装されており、長距離の移動を可能としている [12-14].

一方、LRFを用いた航法誘導では、まず、LRFに
よって得られた地形の三次元点群データから、数値標
高モデル(Digital Elevation Map, DEM)を作成する.

#### 表2:ローバの振動特性.

Direction	Fundamental natural frequency (Hz)
Horizontal	$2.3 \pm 0.8$
Vertical	$6.8 \pm 1.1$



図12:走行試験における電源系の状態とローバの姿勢角度の推移.

従来のDEMは、直交座標系で定義された格子状によって表現されるが、本研究では、円柱座標系で定義される扇状格子を用いた数値標高モデル(Cylindrical Coordinate DEM, C2DEM)によって表現した.

図5に示されるように、同地形データから得られる 地形の凹凸や傾斜,目的地までの走行距離を計算し、 これらを評価関数としたアルゴリズムに基づいて、走 行すべき経路を自動的に生成することが可能である [15,16]. このような、LRFを用いた環境認識は移動ロ ボットの分野において近年盛んに研究がおこなわれて おり[17,18], 特にDARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)<sup>15</sup>のGround Challenge, Urban Challenge においては、LRFはロボットの行動 計画を担う重要なセンサとして用いられている[19,20].

## 2.7 マニピュレータ系

ローバはシャベルをエンドエフェクタに持つマニピ ュレータを搭載している.このようなマニピュレータ は様々な科学観測装置や研磨などの加工装置を任意の 位置へ高精度に移動させ、作業させることをその役割 としている[21,22].図6のように、マニピュレータは 4つの駆動関節(ベース、ショルダー、エルボー、リ スト)を持ち、それぞれの関節は超音波モータ[23]に より駆動されている。関節の最終段にはハーモニック ドライブが設置されている。すべての作業は車体前面 に取り付けられたステレオカメラとマスト上部に取り 付けられたステレオカメラの二つから得られた画像情 報に基づき実施される[24].マニピュレータの質量は 約2.0 kgで、最大搬送可能質量はおよそ1.0 kgである。

15.米国国防高等研究計画局.



**Robust obstacle recognition** 

図13:カメラを利用した航法誘導(上図:障害物の抽出,左下図: ステレオマッチングとランドマーク追従,オプティカルフ ローを利用した位置姿勢推定,右下図:経路計画と経路追 従の概要).



図14:LRFを用いた航法誘導(左図:障害物回避ケース,右図: 段差横断ケース).

エンドエフェクタ<sup>16</sup>はシャベルと直径5 mm 程度の 穴の空いたカバーで構成されている.エンドエフェク タは掘削,砂のすくい上げ,カバーとシャベルの間で 石をつまむことなどができ,さらに,レイクサンプリ ング<sup>17</sup>により,砂の中から石をすくい上げることも可 能である.

## 2.8 その他のサブシステム

ローバの車体と移動機構のサスペンションアームは アルミ溶接で組み上げられている.すべての電子機器 は各機器毎に処理系,電源系,駆動系のユニットに分 けアルミの筐体に封じている.各筐体には,電気的な I/Fコネクタが多数取り付けられ,防塵,防水対策が 施されている.このローバシステムでは,受動的な熱



図15:目標サンプルの認識とマニピュレータによるピックアップ.



図16:マニピュレータ運用時の総消費電力の推移.

デバイスにより熱制御が実施されている. バッテリの 温度は常に監視され,車体の上面は太陽光による熱の 流入を防ぐためすべて断熱材(MLI)で覆われている. 機器の発熱は,アルミの筐体を通じて車体の側面なら びに底面より放出している.

# 3. フィールド試験

今回, Micro-6ローバを用いたフィールド試験をス コリア<sup>18</sup>で覆われた伊豆大島裏砂漠で実施した. 試験 を実施した地域と走行軌跡をそれぞれ図7と8に示す. 伊豆大島は, 障害物回避が頻繁に必要となるような大 きな岩石は乱立していないが, 広範囲にわたる傾斜地 形, 流水作用によりできた段差, 噴出した火山弾, 灌 木などの植生があり, ローバの自律航法誘導の試験を 実施するには適した場所である.

まず,ローバの機械振動特性や使用電力履歴などの データを取得し走行性能の評価を行う.次に,ステレ オカメラならびにLRFを用いた自律航法誘導の試験 を実施する.

<sup>16.</sup>マニピュレータの先端に取付けられた様々な作業をこなす人間の「手」の代わりとなる部分をエンドエフェクタと呼んでいる。

<sup>17.</sup>砂と石を同時にすくい、穴より砂だけを放出する動作のことを言う.

## 3.1 走行性能の確認

ここでは,傾斜地形の登坂/下降性能や平地の走行 性能,段差などの乗り越え性能の確認を行っている.

(1) 走行性能: 傾斜地形の登坂性能評価において, ローバはすべやすいスコリアで覆われた15度程度の 傾斜地形を連続して走破することができた.また,図 9のように,ローバは深さ10 cm程度の段差,20 cm 程度の高さの岩石を乗り越えることができた.障害物 乗り越え走行の結果として,ロールとピッチ方向の姿 勢と消費電力について図10に示すような時刻歴を得 た.岩石乗り越え時に消費電力は(瞬時)最大となった が,要求された電力は電源系が十分に供給することが できていた.また,サスペンション機構により,10 度以下のロール角変動にとどまり,車体の姿勢は安定 した状態で走行することができた.

さらに, 試験フィールド中に, 図11のような柔ら かい土壌で覆われた地域が存在したが, ローバは問題 なく走行することができた. この地域は, 人間でも歩 くのに支障があったが, ローバは特に消費電力やスリ ップ率の増加もなく, 走行可能であった. 結果として, 図8に走行軌跡が示されているように, 二日間, 総走 行時間6.5時間(昼間のみ)で自律航法誘導を併用して 612 mを走破した.

(2) 振動特性:走行試験中に,二つの三軸加速度 計をローバ車体に取り付けて,振動加速度を計測した. 一方は車体に搭載し,もう一方はカメラマスト上部に 設置した.振動特性として,表2に示されるような結 果を得ることができた.いずれも並進運動が卓越した 振動モードであった.

水平方向の振動は比較的緩やかで,これは,ローバ の脚部,特にサスペンションアームと車輪ユニットの 接合部の剛性が低いことに起因していることがわかっ た.さらに,車体とマスト間の振動特性はほぼ同等で あったため,マストと車体は十分剛に接合されている と考えられる.

(3) 電力管理と制御:電源系は電源関連状態量の 監視,電源制御および電力供給の管理を行っている. 試験により得られた結果から,平均電力負荷は72.5 W程度(スタンバイ状態)または100 W程度(画像処理 系起動状態),負荷履歴はローバの動作に沿う形で増減, 太陽電池による発電量以上の負荷の瞬間的な増加によ る瞬停を自動的に補償,これらの性能を確認すること ができた.図12に見られるように,ローバは傾斜登 坂(10~15度)において,130 W程度の電力を必要と していたことがわかった.たとえ障害物乗り越えなど で電力消費が瞬間的に180 W程度に増えたとしても, バッテリより必要な電力が供給され,電力の欠乏を回 避することができた.今回の条件では,太陽電池によ る最大発電量は図12で見られるように100 W程度で あった.太陽電池の最大可能発電量は,太陽光が垂直 入射時に120 Wであり,この発電量の差は,太陽高 度の傾斜に起因している.また,電源サブシステムが バッテリのみでローバを連続して2.5時間動作させる こと,太陽電池による1.5時間の発電により4.5時間ま で動作が延長されること,これらが可能なことを確認 することができた.

## 3.2 カメラならびにLRFによる自律航法誘導試験

図13は、カメラを基本とした航法誘導の典型的な 試験結果を示している.単一カメラによる画像処理に より照明環境に対してロバストに障害物を認識し、ス テレオカメラの画像情報より障害物までの距離と障害 物の寸法を計算した.ローバが目の前にある障害物を 回避して安全に走行できる経路を生成し、また、ロー バの経路追従中に、画像の時間変化より得られたオプ ティカルフローを用いてランドマーク追従と位置・姿 勢の推定を行い、さらにその推定情報に基づいて走行 経路を適宜修正することを行った.

もう一方の誘導試験として,LRFを用いた障害物 回避と段差の横断試験を実施した.図14は,障害物 回避と段差乗り越え時に,走査(スキャニング)した地 形と経路生成の結果を示している.障害物回避におい て,地形の傾斜と表面の凹凸が少ないところを最適と する経路の生成を行った.一方,段差乗り越えにおい て,搭載アルゴリズムは,地形の凹凸,傾斜を考慮し, 最も走行負荷が少なく,かつ目標位置までの最短距離 となるような経路を設計した.これら二つの自律航法 誘導手法を単独で用いるだけでなく,併用して障害物 の認識率を向上させ,移動経路の最適化を図りながら, 612 mの長距離移動を実現することができた.

## 3.3 マニピュレータによるサンプル採取試験

図15に示されるように、科学的なサンプルとなり

そうな小石が多数存在する場所において、マニピュレ ータによる自動サンプル採取試験を実施した.太陽を ローバの背に向け,発電しながら動作させるのが電力 管理の観点から効果的なため、マニピュレータシステ ムは車体の影中での画像認識からサンプル採取を開始 した.

初めにマニピュレータシステムの単一カメラにより サンプルを含む地面画像を取得し,採取可能な小石を 認識し,最終的に一つに決定した.次に,ステレオ画 像を取得して,小石の三次元位置を計算し,エンドエ フェクタがそこへ到達しサンプル採取できるようにマ ニピュレータの逆キネマティクスを解き,各関節の回 転角度を決定した.

マニピュレータが操作される時に,図16のように 電力系は十分に要求された電力を供給することができ た.結果として,マニピュレータの関節は指定された 角度へ安定に動作し,サンプルをひとつ自動的につま みあげることができた.

# 4.結言

本稿では、移動ロボットのプロトタイプ(Micro-6) の仕様・概要およびMicro-6を用いたフィールド試験 結果を示した.まず、5つの車輪を持つローバのシス テム全体の紹介と走行系や電力系、通信系、航法誘導 系といった各サブシステムの詳細について紹介した. 次に、このロボットの応用先として考えている火山地 域である、スコリアで覆われた伊豆大島裏砂漠におい てフィールド試験を実施した. ローバの走行性能とし て、15度程度の傾斜登坂、車輪サイズと同程度の岩 石の乗り越え、長距離移動などを確認することができ た. これらの試験を通じて、機械的な振動特性と電源 系の性能も合わせて評価した、上記の実験から得られ た知見と各サブシステムの状態履歴は、将来の火山探 査ロボットや惑星探査ローバのために非常に有益な情 報を提供した. また、ステレオカメラとLRFを用い た自律航法誘導試験を実施し、結果として、両方法で 障害物回避と適した経路生成ができることを確認した. さらには、両方の情報を比較することで、障害物の認 識率が上がり、より効率的かつ確実に移動できること を確認した、最後に、地面に散見される科学的なサン プルの中からステレオ画像による環境認識に基づいて

ひとつを選択し,選択されたサンプルをマニピュレー タにより自動的に採取することができた.

これらの試験を通じて得られた結果から,サブシス テムレベルにおける成熟度は高いと考えられ,さらに システムとして自立できていることも確認できた.今 後,システムレベルでの成立性,たとえば越夜や衛星 経由での遠隔操作試験など,より厳しい制約を設けた 試験を実施し,実用化へ向けてローバの改良を進めて いく予定である.

# 参考文献

- Ball, A. J. et al., 2007, in Planetary Landers and Entry Probes (Cambridge University Press), 149.
- [2] Squyres, S. W. et al., 2003, J. Geophysical Research 108-E12, 8062.
- [3] Ulivi, P. and Harland, D. M., 2007, in Robotic exploration of the solar system, Part1 : The Golden Age 1957-1982 (Springer), 105.
- [4] Carrier, D., 1992, Proc. AIAA Space Programs and Technologies Conference.
- [5] Ulamec, S. et al., 2011, Advances in Space Research 47, 428.
- [6] Yoshimitsu, T., 2003, Acta Astronaut. 52, 441.
- [7] Otsuki, M. et al., 2010, Proc. Motion and Vibration Control Conference 2010.
- [8] Otsuki, M. et al., 2010, Advanced Robotics 24, 387.
- [9] Shimada, T. et. al., 2011, Proc. 9th European Space Power Conference.
- [10] UTM-30LX, HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD. http://www.hokuyoaut. jp/
- [11] Sakuta, M. et al., 2011, Proc. IEEE-ROBIO 2011.
- [12] Matthies, L. et al., 2007, International Journal of Computer Vision 75, 67.
- [13] Golberg, S. et al., 2002, Proc. the IEEE Aerospace Conf., 5-2025.
- [14] Maimone, M. et al., 2004, Proc. 9th Int. Symp. on Experimental Robotics.
- [15] Ishigami, G. et al., 2007, Proc. the 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2361.
- [16] Ishigami, G. et al., 2011, Proc. ISTS 2011.
- [17] Wulf, O. et al., 2003, Proc. the Int. Conf. on Control

Systems and Computer Science, 312.

- [18] Thrun, S. et al., 2004, Robotics and Automation Magazine, IEEE 11-4,79.
- [19] Buehler, M. et al., 2005, Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR) Series 36 (Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag).
- [20] Buehler, M. et al., 2008, Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR) Series 56 (Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag).
- [21] Trebi-Ollennu, A. et al., 2009, IEEE Robotics and Automation Magazine 16-4, 34.
- [22] Gorevan, S. P. et al., 2003, J. Geophysical Research 108-E12, 8068.
- [23] 多田興平ほか, 2003, ロボティクス・メカトロニ クス講演会講演概要集.
- [24] オリチロン, 久保田孝, 2011, 日本ロボット学会学 術講演会予稿集.