Performance Evaluation of Electrical Power Subsystems for Exploration Rover Testbed

Takanobu Shimada, Otsuki Masatsugu, Genya Ishigami, Hiroyuki Toyota, Takashi Kubota Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) / Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa, 252-5210 Japan

Abstract :

Unmanned mobile robots (Rover) for detailed surface explorations of the Moon or Mars are expected to travel over long distances and perform in-situ observations using scientific instruments. In this study, the authors have developed a fully-integrated rover testbed having high mobility system for rough terrain traverse, lightweight manipulators for sampling, and advanced guidance and navigation functions. The rover testbed, a bread board model for future planetary exploration mission, accelerates future technology advancements. This rover has been designed on the basis of comprehensive knowledge inherited from studies on previous prototypes.

The electrical power systems (EPSs) of rovers require a stable power supply in order to realize long-range travel on the lunar and other planetary surfaces. In general, spacecrafts such as satellites and probes can get stable electrical power generated by solar array paddles oriented toward the sun. In the case of rovers, however, there is no guarantee that the solar array paddles on the rover can stably generate electrical power because the sun incidence angle relative to the solar panels varies with the movement direction and attitude of the rovers. In addition, the shadows of the boulders and craters on the surface of the Moon or Mars can obstruct sunlight from reaching the rover. Further, pulse peak powers due to motor driven for rough terrain traverse may be greater than those generated by solar arrays, and consequently, the battery is subject to frequent discharge even when the rover is operated under sunlight. Therefore, a power management scheme different from that applicable to ordinary orbiting spacecrafts is required for the EPSs of rovers.

The EPS of our rover testbed consists of solar array panels (SAP), a series switching regulator (SSR), batteries (BAT), a battery charge control unit (BCCU), power distribution units, and battery protection circuits. As of the current configuration, the rover testbed consumes around 100 W, including that for electrical load of the rover subsystems. To generate possibly stable power under bright sunlight, maximum peak power tracking (MPPT) is adopted as the power control method for the SSR.

The authors have conducted field tests of the rover testbed in a desert located in Izu-Ohshima Island on October, 2011. The rover equips the developed EPS, mobility systems, manipulators, a telecommunication system, and advanced guidance and navigation functions. Through the field test, the rover testbed traversed the rough terrain in excess of 300 m with a combination of the tele-operation and the autonomous guidance and navigation. Also, the performance of the EPS such as the SAP generating power, its power balance, and load profiles in various operation modes were evaluated. This paper reports on the EPS function and performance, as obtained by experimental results.

移動探査ローバのフィールド走行試験における電源系の性能評価

嶋田貴信、大槻真嗣、石上玄也、豊田裕之、久保田孝 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構では、将来の月・火星探査ミッションに向けて着陸機や移動型ロボットを用いた 惑星表面探査技術の確立を目指している。これらは、2007年に打ち上げられ、2009年6月で運用を終え た全球リモートセンシングを目的とした月周回衛星「かぐや」(SELENE: SELenoligical Engineering Explorer)の後に続くミッションとして計画されている。

無人移動型ロボット(ローバ)は惑星地表面を自在に走行可能であり、また搭載している科学観測機器 を使ってその場での観測を行うことができるため、ローバによる詳細な惑星探査が期待されている。広範 囲にわたる惑星表面の探査を安全且つ効率的に行うためには自律的な走行が必要とされることから、筆者 らのグループでは自律制御で科学探査を行うローバの研究開発を進めてきた^{II}。これまで、ある特定の搭 載機器に特化したプロトタイプモデルの開発は行ってきたが、ローバとして一連の動作が可能な統合化さ れたシステムは未だ開発されていない。将来のミッションに向けて最適化されたシステムの開発を行うた めには、ローバシステムを一度構築し、技術的課題を抽出することが必要不可欠である。このような背景

から、ローバの構成要素をすべて搭載することを目的としたテ ストベッドモデル "Micro 6 "を設計・製作し、地上での走行試 験をこれまで実施してきた^[2]。

ローバの長時間連続走行を実現するには安定した電力供給が 必須であり、そのためには通常の衛星や探査機とは異なる電力 管理が要求される。本稿では、これらの課題に対応するべく設 計した電源系システムの機能・性能とともに、惑星地表面を想 定した環境において実施したフィールド試験を通じて得られた 電源系サブシステムの試験結果・知見について報告する。

2. ローバテストベッドモデル Micro 6 の概要

図1に Micro 6 の外観図を示す。多様性に富んだ一連の新規 ミッションにも柔軟に対応できるような設計とし、且つこれま でのプロトタイプから得た知見を取り入れた包括的な設計と している。特定のミッションの目的に合わせ込んだ設計はされ ておらず、開発過程や探査実験を通じて技術の向上・蓄積を目 的としている。主に地上試験を行うためのモデルではあるが、 構成要素の開発だけではなく、次世代のミッションを担うため の統合化されたシステム技術の確立を目指すものである。

表1に現時点での Micro 6 の仕様一覧を示す。本ローバは、

窪みなどで足を捕られて転倒するといった不慮の故障を防止するための新たなサスペンション機構を採 用している。地表面でのサンプル採取を行うためのマニピュレータを本体前方に、また自己位置同定や障 害物検知及び目標地点へ誘導させるための航法誘導システムなど革新的な機能を搭載している。

3. Micro 6 電源系サブシステムの概要

3.1 電力要求と設計課題

電源系の役割は、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



図1 テストベッドモデル"Micro 6"の外観

表1 テストベッドモデル Micro6の仕様

寸法	1.6 m (W) × 1.3 m (L) × 1.6 m (H)
重量	約 80 kg
駆動	5 WD (ホイール直径:0.22 m)
システム	動力: DC モータ、超音波モータ
駆動性能	速度:0.1 m/s (max)
電源	太陽電池、バッテリ
搭載機器	CCD カメラ、GPS、LRF、IMU 、
	マニピュレータ 等

し各機器に供給するととも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 供給することである。電源系への要求として以下の3項目、1)定常時の搭載機器負荷は50~55W程度、 2) 走行時駆動系による搭載機器ピーク負荷は100W以上、そして主に地上で試験するため天候が曇りの 場合でも対応できる様に3) バッテリだけでもローバが2~3時間動作することが挙げられている。日陰期 間や走行によるバッテリからの放電容量が明確になっていないことから充電電力は現状未定である。

前述の通りローバの長時間連続走行を実現するには安定した電力供給が必須である。衛星や探査機では、 日照中に太陽電池パドルを太陽指向させることで、一定の発生電力を得ることができる。しかしローバの 場合、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の遮られる環境が多く、頻繁なバッテリの放電が予想 される。さらに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坂道を登る際に、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。

3.2 電源系サブシステムの構成及び仕様

図2に現時点でのローバの電源系の構成を示す。電源 系は、太陽電池パネル(SAP: Solar Array Panel)、シリー ズスイッチングレギュレータ(SSR-PPT)、バッテリ充電 制御器(BCCU: Battery Charge Control Unit)、バッテリ (BAT: Battery)、保護機能回路(UVC: Under Voltage Control、OT: Over Temperature)、電力分配器から構成さ れている。太陽電池の日照条件が十分でない時やバッテ リの補充電の際に、太陽電池からの電力供給に頼らず、 外部電源(EXT PS)から供給を行うことも可能である。図 1 で示したように太陽電池パネルは太陽光を受光しやす





いようローバ本体上面の左右後に、バッテリは重心位置を考慮して本体下部に配置され、その他のコンポ ーネントは筐体内部に組み込まれている。

Micro 6 の電源系サブシステム仕様一覧を表 2 に示す。太陽電池パネル 1 枚は単結晶 Si セル 32 直列で構成されており、最大発生電力は 40 W 程度であることから、パネル 3 翼を搭載することにより 100 W 級の 電力要求に対応した。従来の比較的電力規模の小型な衛星と同様、28 V 系非安定バス方式とした。バス電 圧制御には、刻々と変動する日照条件に対して太陽電池アレイの最大電力点を常に追尾しより広範囲に渡る日照条件において安定した電力を確保できるよう、また頻繁なバッテリからの放電により度々発生が予 測されるロックアップを防止するため、最大電力追従(PPT: Peak Power Tracking)機能を併せ持ったシリ ーズスイッチングレギュレータを採用した。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 動作を満足できる様に、バッテリには 5.5 Ah 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。リチウム電池を搭載している衛星と同等のバッテリの充放電制御・管理手法を採用した。

項目	機能・性能		項目	機能・性能	
	構成: 32 セル直列 / 枚×3 翼			構成 セル:Liポリマー電池 5.5Ah	
太陽電池パネル	寸法: 705×471 mm / 枚			バッテリ構成 : 7 直列 2 系統	
(SAP)	発生電力: 最大 120W 程度		バッテリ及び充	充電制御・管理	
	セル : 単結晶 Si (103×82 mm)		電制御・管理	充電電流・電圧 : CC-CV / 2A - 28V	
	最大供給電力 100 W 程度		(BAT/BCCU)	過温度保護: 41℃	
バス電圧供給	電圧範囲 日照: 32.0V			充電バイパス: 4.1V@2A	
(SSR-PPT)	日陰: 24.5~28.0V			放電管理: BAT UVC 24.5 V	
	電源分配 5CH (12/24/12/5/3.3V 系)			EPS 8 ch (各電圧、電流、温度)	
日照時バス電圧	日照時バス電圧 最大電力点追従型スイッチングシ		ILM/CMD	周期:1 sec 以下	
安定化制御	リーズレギュレータ(SSR-PPT)方式		試験装置 I/F	外部電源: 32V-TBD A	

表2 Micro6の電源系システム仕様一覧

4. フィールド試験

4.1 試験概要

2011年10月23日~27日にかけて伊豆大島の中央部に広がる裏砂漠にてMicro6のフィールド試験を実施した。この砂漠は三原山の火山活動によって形成された土地であり、最大30°程度の斜面や段差、大小の岩石が無数に点在し、また地表面にはスコリアと呼ばれる主に玄武岩で構成される小石が敷き詰められていることからさながら惑星地表面の様相を有している。また、試験場の大部分へ車でアクセスすることが可能であるため試験環境として非常に良好である。

今回の試験目的は、惑星地表面探査を想定した不整地 走行メカニクス、環境認識・経路計画・ナビゲーション 機能、サンプル採取マニピュレーション、自律システム・ 遠隔操作などローバに必須である一連の統合化された機 能の動作確認であり、開発したローバシステムを用いて 不整地(火山地域)連続走行試験を実施した。図3に今 回の試験の走行経路を示す。10月25日および26日の2 日間実施した。本稿では走行距離、時間ともに長い26日 の結果を中心に走行試験から得られた電源系の性能につ いて評価を行ったので、その詳細を次項以降に記す。



図3 伊豆大島裏砂漠でのローバ走行経路

4.2 フィールド走行試験結果

走行試験全体を通じて、テレオペレーションと自律航法誘導の併用により4時間を超える300m以上の 走行が可能であることを実証した。また、ピッチ、ロール角度共に11°程度までの走行が可能あり、途中 不整地を伴う走行路に遭遇したとしても問題ない走破性能を確認することができた。

図4に10月26日の走行試験で得られたSAP発生電力、負荷電力およびローバ自身の姿勢角の初期位

置からの走行距離に伴う変化を示す。初期位置から約20m の地点で搭載機器の動作確認および初期校正を行った。こ のオペレーションに30分間程度の時間を要するため、後翼 に太陽光が十分に当たるよう北向きの姿勢で待機した。

図 5 には発生電力、負荷電力およびローバ姿勢角の時間 変化を示す。時刻 12:30 から 13:04 までが前述の 20 m 地 点で待機している期間に相当する。途中太陽光が雲の遮ら れる場面に数回遭遇したが、この期間を除けば太陽電池パ ネルは、100 W の発生電力を定常的に得られることが分か った。またこの時、SAP 発生電力はわずかではあるが負荷 電力を上回り、電力収支の成立性を確認することができた。

機器の初期校正終了後、時刻 13:04 以降に初期位置から 南に向かって約90m 走行を始めた。SAP 後翼に陰が落ちて いる状態で走行していることもあり、図5より北向き停止 時と比較すると発生電力は50W前後まで低下し、また数 +Wの電力変動が発生していることが分かった。

図 6 に北向き待機時から南向き登坂走行している期間に 取得した SAP 発生電流および電圧値をプロットした結果を 示す。同時に日が当たっている際の予測 I-V カーブを破線 で示す。本ローバでは電力制御方式に PPT を採用している こともあり、最大電力点付近に SAP 動作点が集中している



図4 走行に伴う SAP 発生電力、負荷電力および姿勢角の変化



図5 SAP 発生電力の時間変化

ことが見て取れ、これらが待機時における観測された 100 W 前後の 発生電力に相当する。一方で、予測 I-V カーブから外れる領域にも プロットが多数見られるが、走行時や曇りの時の動作点である。

初期位置から約90mまでの走行では、図4中のピッチ角で示した 通り5°~11°の登り坂地形であった。斜度11°のときに負荷は最 大で180Wに達した。走行中の負荷電力は平均すると100W前後を 推移したが、この時SAP発生電力は負荷側で必要とされる電力をは るかに下回った。初期設計の際に要求された電力から大幅に増加し たこともあるが、走行に伴う発生電力低下も考慮に入れたSAPサイ ジングの再設計が今後の課題として挙げられる。

初期位置から約90m南向きに坂を登りきった後、進路を一旦北向 きへ変更した。この間ローバの背後から、つまりSAP全面に太陽光 が当たり、さらに下り坂ということで電力的に負荷の少ない走行で あった。北に方向転換した当初は75W前後の電力は得られていた ものの、この時既に14:00を過ぎであったため、時間の経過と伴に 日が傾き太陽高度も小さくなるため、発生電力も徐々に低下してい った。山々に囲まれているため太陽高度が15°以下となった走行距 離220m以降では発生電力は得られない結果となった。

4.3 段差走行時の電源系プロファイル

前項では走行試験全体について記したが、ここでは段差のある 不整地での短時間の走行結果について示す。各電源系のステータ スの推移を図8に示す。時刻11:26の走行開始後、図中の姿勢デー タのピッチ方向の姿勢がマイナスからプラスへの変化で示す通り、 最初に段差を下ってその後上る順序の走行を行った。このとき同 時に太陽電池パネル発生電力は±15W程度変動していることが分 かる。これは±7°のピッチ方向の姿勢変化と一致するような変動 であることを確認した。太陽電池発生電力の低下と同時に走行に 伴う負荷の増加も発生するため、バッテリからの放電も発生し、 バス電圧もバッテリ電圧へ移行していることが見られた。この様 な頻繁な充放電の繰り返し・パルス的な大電力負荷に対応するた め、キャパシタを併用した蓄電システムの開発を計画している。

5. まとめ

自律制御で科学探査を行うローバのテストベッドモデルの電源

の電源 図8 段差走行時の電源系ステータス

系システムの設計・製作を進め、フィールド試験を実施した。太陽電池パネル発生電力や電力収支を明確 化できたが、より広範囲な条件における成立性を実現する課題が残る。また、不整地走行試験を通じて、 負荷プロファイルや消費電力データの取得を行うことができた。今後は本フィールド試験で得られた結

参考文献

[1] T. Kubota, M. Otsuki, Y. Kuroda, Y. Kunii, "Autonomy and Intelligence for Lunar or Planetary Surface Explorer," 27th ISTS, k-20, 2009

[2] M. Otsuki, G. Ishigami, T. Shimada, S. Takanashi, O. Ann and T. Kubota, "Experimental Study on Mobility and Navigation for Exploration Rover in Natural Rough Terrain," 28th ISTS, d-87p, 2011

果・知見をもとに今後の電源系、ローバシステムの最適化・性能向上を図っていく。また、今回取得した 負荷プロファイルを経路計画と融合し、経路決定の際の判断項目の一つとすることも視野に入れている。





