

Proposal of range measurement experiment using a balloon

吉光 徹雄, 富木 敦, 久保田 孝 (ISAS/JAXA)

Abstract— The authors are engaged in the research and the development of the surface exploration rover system over the small solar system bodies. We developed a tiny rover system “MINERVA-II” for “Hayabusa 2” asteroid sample return mission. Thinking about the the future small body surface exploration beyond “Hayabusa 2”, precise localization is important for rover navigation. That is why we have proposed an effective localization method using a radio assistance from the mother spacecraft. It uses the range measurement between a surface rover and a mother spacecraft which has delivered the rover to the surface. In this paper, we propose a balloon-based range measurement experiment using a tiny transponder which was developed for MINERVA-II payload.

1. はじめに

筆者らは、小惑星や彗星など太陽系に点在する小天体の表面を移動探査するローバシステムの研究と開発を行なっている。

2014 年末に打ち上げられた小惑星探査機 “はやぶさ 2” には、MINERVA-II という小惑星探査ローバシステムを搭載した。このローバシステムには、筆者らが開発したローバ 2 台と、日本の大学連合が開発したローバ 1 台の合計 3 台の日本製ローバが搭載されている [1][2]。この他にも、ドイツとフランスが開発した MASCOT と呼ばれるラングもはやぶさ 2 には搭載されている [3]。

小天体表面探査ローバは、ターゲットの小天体表面に、地球から打ち上げられた探査機 (母船) によって輸送され、小天体表面着陸後は、リモートセンシングでは達成できない “その場” 観測を多地点で行なう。

MINERVA-II ローバは、移動メカニズムと自律探査の 2 つの小天体表面探査の工学実験をすることを主目的としている。小惑星表面の微小重力環境における移動方式は、ホッピングという離散的移動手法を用いている。また、自律探査手法は、小惑星表面の特定の対象に接近するのではなく、小惑星表面のなるべく多くの地点に移動するというものである。

しかし、はやぶさが探査した大きさ数 100[m] の “イトカワ” の表面に多様性があつたことからわかるように、小天体表面の特定の地形に接近して観測を行なうローバシステムが、MINERVA-II 以降の小惑星表面探査ローバでは望まれる。

特定の地形にローバを誘導するためには、ローバが小天体表面のどこにいるかという自己位置同定と、目的地の座標に自己位置を収束させるための移動方式の 2 つを考える必要がある。自己位置同定にはさまざまな方式が考えられるが、小型のローバが小型の天体表面を移動する際には、画像を用いた方法の利用が難しい。また、いびつな形をしている天体上では、ローバが取得できる情報のみを利用して得られる測地緯度・経度は、小天体を外部から見た時に指定する地心緯度・経度の間に大きなずれがある。

このような小天体の特有さを考慮し、筆者らは、電波を利用して、母船側から表面に着陸したプローブの航法誘導的な支援を行なう方法の検討を行なった [4]。この方法では、母船から静止しているプローブまでの

距離を連続的に測定し、小天体の自転運動と母船の小天体回りの運動のダイナミクスを利用して、プローブの絶対位置を地心緯度・経度で求める。

さらに、MINERVA-II の 4 台の表面探査ローバ・ラングで共通に使用する通信機にオプション機能として、距離を測定する機能を実装した。

本稿で述べる気球実験は、MINERVA-II 搭載通信機における距離測定機能の地上における機能確認を行なうものである。

2. 実験の概要

距離測定機能を有する小型のトランスポンダ (子機) を気球のゴンドラに載せ、地上からゴンドラをトラッキングして、地上側のトランスポンダ (親機) から子機までの距離を連続的に測定する。

本トランスポンダは、MINERVA-II のために開発した通信機を地上実験に合わせて改造したものである。具体的な距離測定方法は 3.2 節で述べる。

気球実験では、親機と子機間の測距結果と、GPS データから算出した距離を比較することで、本方式の有効性を実証することを目的とする。

通信機間の通信可能な距離の最大は 20[km] である。このため、放球前からトランスポンダの電源を入れて、測距を開始し、気球が地上局から 20[km] 以上離れたところで、実験を終了させる。

3. トランスポンダ

3.1 通信機

使用した通信機の緒元を Table 1 に示す。

母船側に搭載する親機と、プローブ側に搭載する子機で構成され、親機は最大 7 の子機とデータ通信を行なうことができる。

使用する周波数は、アップリンク (親機から子機への送信) とダウンリンク (子機から親機への送信) で同一である。このため、同一周波数をアップリンクとすべての子機のダウンリンクで時間的にシェアする時分割方式 (TDMA) を用いている。

3.2 距離測定方式

データの通信方式が TDMA であるため、アップリンクとダウンリンクを切り替える際に、ガードタイムと呼ばれる通信を行わない時間帯がある。

Table 1 Specifications on communication modules

dimension	child module	80 × 50 × 15 [mm]
	parent module	160 × 100 × 35 [mm]
weight	child module	81[g]
	parent module	≤ 300[g]
multiple Access method	half duplex, TDMA (uplink:7[msec]/downlink:18[msec])	
frequency	uplink	920[MHz]
	downlink	920[MHz]
radiant power	uplink	1[W]
	downlink	0.1[W]
modulation	uplink	BPSK
	downlink	BPSK + bitabi
data rate (effective rate)	uplink	15.625[kbps]
	downlink	61.5[kbps]

★ uplink: parent module → child modules

★ downlink: child modules → parent module

親機から子機にデータを送信した直後のガードタイムに測距を行なうための符号を入れ、その符号を受けた子機は、次のダウンリンクの最後にその符号を親機に返す。

親機は、両符号の位相差により電波の飛行時間を測定し、距離を算出する。

符号長が非常に短いため、測定できる最長距離は大きくなく、データ通信の最大可能距離より短い。このため、子機が親機のアップリンクにロックした時点からの子機と親機との相対的な距離の変化を計測することになる。

このような限定的な方式ではあるが、

- プローブが親機から放出された後の絶対距離を連続的に計測する。
- プローブが小天体表面で静止している時の両者の距離の相対的な変化から小天体の重力が母船に与える影響を導出する。

などが可能となる。

3-3 MINERVA-II 通信機からの改造

MINERVA-II に搭載した通信機は周波数として 950[MHz] 帯を用いており、携帯電話で用いる周波数と近接している。実際には、大樹町で用いられている携帯電話周波数とオーバーラップしていないが、周波数申請に非常に困難が伴う。

このため、使用する周波数を特定小電力無線として割り当てられた 920[MHz] 帯に変更して、気球実験を行なう。

4. 気球実験の構成

Fig.1 に構成を示す。

4-1 ゴンドラ搭載システム

トランスポンダ(子機)、CPU、2つのアンテナ、およびバッテリーで構成される。

4-1.1 アンテナ

子機には、2本のアンテナを取り付けることができ、片側のアンテナによるキャリアを喪失すると、自動的にもう一方のアンテナに切り替える機能が備わってい

る。これは、小天体表面では重力加速度が小さいため、プローブ自体の姿勢が安定しないことを考慮したためである。

気球実験においても、ゴンドラは放球後に回転しながら上昇するため、2つのアンテナによる切り替え機能を使いたいと考えている。このため、ゴンドラの下面と側面にそれぞれ1個のアンテナを搭載する。

4-1.2 CPU

子機の状態を搭載 CPU で収集し、不揮発性の SD カードに記録する。子機の状態データとしては、親機からの電波強度やロックしているかどうかの状態、選択しているアンテナなどがある。

4-1.3 気圧スイッチの使用

電波の到達距離の最大は 20[km] である。このため、気球が遠方に離れた後は、実験システムへ供給する電力を遮断するため、気圧スイッチを使用する。

現在の計画では、180[hPa](高度 13.2[km] 相当) でスイッチングを行なう気圧スイッチを搭載し、高度 13.2[km] 以上では、搭載トランスポンダ、コンピュータに電源供給をしないようにする。

4.2 地上側システム

トランスポンダ(親機)、コンピュータ、アンテナを載せた 2 軸ジンバルで構成されている。

子機と通信するためのアンテナを 2 軸ジンバルの上に乗せ、アンテナをゴンドラ方向に制御する。

アンテナは指向性の強いヘリカルアンテナを用いる。距離測定自体は親機上で行なわれ、そのデータを記録するためのコンピュータを接続する。

5. おわりに

本稿では、小天体まわりで母船とプローブの間の距離測定により新たな成果が挙げられることを説明し、そのための第一歩として、距離測定が可能な通信機を MINERVA-II に搭載した。

MINERVA-II はすでに打ち上げられており、打ち上げ前に、机上で距離測定機能の確認を行っている。しかし、本通信機で用いている距離測定は相対的なものであり、絶対距離は積分値でのみ得られる。このため、

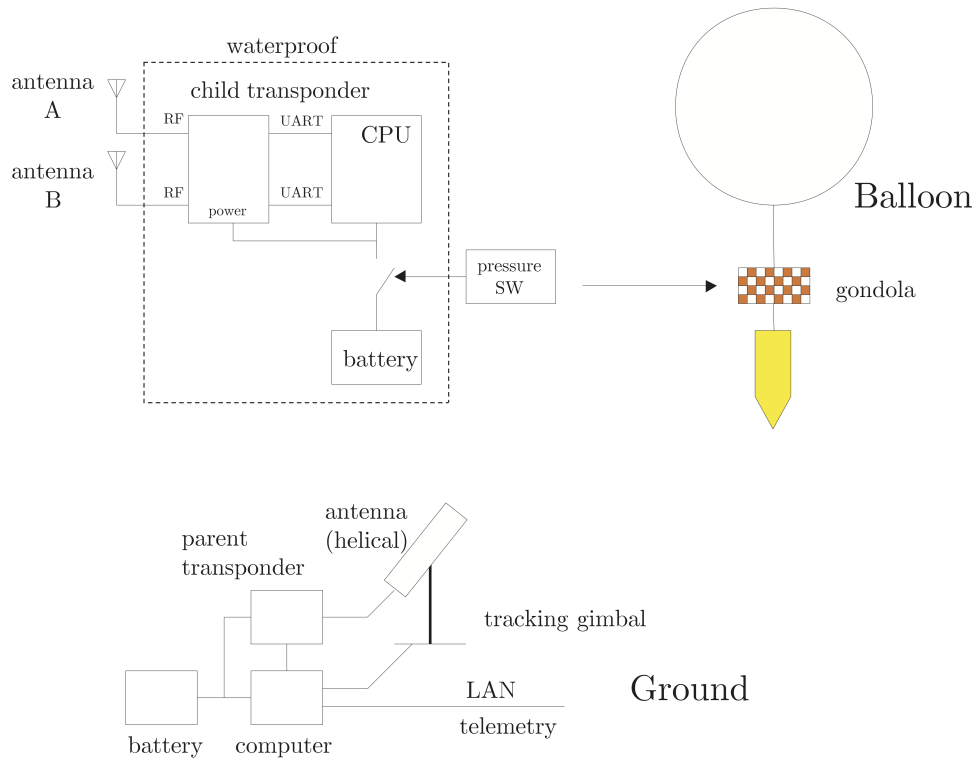


Fig.1 Experimental setup

初期位置から連続的に距離の変化する気球実験が実証試験の場として最適である。

気球実験では、この通信機を改造して、電波申請の問題をクリアし、放球直後から連続的に気球のゴンドラと地上の間の距離を測定し、その有効性を実証したい。

References

- [1] Tetsuo Yoshimitsu, Atsushi Tomiki, and Takashi Kubota, "Asteroid surface exploration rovers developed for Hayabusa-2 mission," 66th International Astronautical Congress, No.IAC-15,A3,4,5, 2015.
- [2] Kenji Nagaoka, et al., "Development of MINERVA-II2, a Micro-Robot for Asteroid Surface Exploration with Innovative Mobility," 11th Low-Cost Planetary Mission Conference, 2015.
- [3] Christian Ziach, et al., "MASCOT, the small mobile asteroid landing package on its piggyback journey to 1999 JU3: pre-launch and post-launch activities," 66th International Astronautical Congress, No.IAC-15,A3,4,6, 2015.
- [4] Tetsuo Yoshimitsu, Sayaka Higo, and Ichiro Nakatani, "Localization over Small Body Surface by Radio Assistance," Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics (WSANE), pp.145-150, 2006.