

特集 「宇宙探査と人工知能—宇宙の起源の解明に人工知能は寄与できるか？」

小天体表面探査ローバの自律化技術

Autonomy in Rover Exploration on Small Celestial Bodies

吉光 徹雄
Tetsuo Yoshimitsu

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).
kikko@nsl.isas.jaxa.jp

Keywords: asteroid rover, autonomy, small body exploration.

1. はじめに

太陽系には大小さまざまな天体が存在している。大きな天体として、太陽や惑星、準惑星、惑星を回る衛星などがあげられるが、それらは数的には小数である。圧倒的に多いのは、“太陽系小天体 (small solar system body)” と総称される小さな天体である。

小天体は、大きな天体とは異なり、形成後に熱変性を受けていない。このため、太陽系初期の原始惑星系円盤の構成情報をそのまま保持していると考えられており、太陽系の起源を探求するうえで重要な天体である。

小天体の中には、地球に接近する軌道を飛んでいる“地球近傍天体 (NEO: Near Earth Object)”がある。NEOは、将来、地球と衝突する可能性がある。ひとたびNEOが地球に衝突すると、サイズは小さくても、地球との相対速度が大きければ、地球規模の大災害がもたらされる。NEOの大きさによっては、人類滅亡の危険性もある。

近年、地球からの観測技術の向上と、NEO監視網の充実により、NEOを含む小天体はその数を急激に増している。と同時に、これら小天体を目指す探査ミッションも数多く計画されている。

2011年1月現在、太陽系小天体の番号を管理している Minor Planet Center には、軌道が確定し番号を付加された小天体だけでも、25万個以上の天体が一覧アップされている [MPC]。NEOは7500個強発見されており、このうち、地球と衝突する可能性の高い “Potentially Hazardous Object: PHO” と呼ばれる天体は約1200個である。

太陽系小天体は、いわゆる古典的な小惑星や彗星を含むが、太陽、惑星、準惑星、惑星と準惑星の衛星を除くすべての太陽を回る天体を包含する。このため、大きさ数百 km のものから、数 m クラスのものまで幅広い。

ただし、地球から比較的行きやすい NEO のほとんどは大きさが数十 km 以下であり、地球から探査機を送る対象は、大きさがせいぜい数 km 以下の小惑星や彗星が選ばれる傾向にある。これらの大きさの小天体を探査する技術を工学的に確立することは、今後の宇宙科学を進めるうえで大きな鍵であるといつてよい。

本稿は、大きさ数 km 以下の小天体に行き、その表面の移動探査を行うロボット (小天体表面探査ローバ) の自律化技術に関して概観する。

小天体表面の環境で特徴的なことは、その重力加速度が非常に小さいことである。表1にいくつかの天体の大きさと表面重力加速度、表面からの脱出速度を示す。現在は太陽系小天体に分類されている Vesta は、大きさが 500 km もあるため表面重力がかなり大きい。しかし、Eros や「イトカワ」など、過去に探査機がランデブしたことがある小惑星の表面重力加速度は非常に小さいことがわかる。

ここで、日本の小惑星探査機「はやぶさ」に言及する (図1) [Hayabusa]。2010年6月13日に、「はやぶさ」探査機が打上げ後7年を経て、地球に帰還し、大気圏に再突入したことは記憶に新しい。

「はやぶさ」は、2003年5月9日に M-V ロケットで打ち上げられ、惑星間空間を2年半巡行した後、2005年9月に小惑星「イトカワ」(図2)に到着した。その後3か月間、近傍からの「イトカワ」の詳細観測や「イ

表1 小天体の表面重力と脱出速度

planetary body name	size(diameter)	density	surface gravity	escape velocity
Itokawa [Fujiwara 03]	535 × 294 × 209 m	1.9 g/cm ³	1/100,000 G	0.2 m/s
Eros [JPL]	34.4 × 11.2 × 11.2 km	2.67 g/cm ³	1/1,600 G	10 m/s
Ceres [JPL]	950 km	2.0 g/cm ³	1/35 G	500 m/s
Vesta [JPL]	530 km	3.4 g/cm ³	1/40 G	350 m/s
Earth	12,700 km	5.5 g/cm ³	1 G (9.8 m/s ²)	11.2 km/s

Ceres: Largest asteroid, now classified as a dwarf planet (準惑星).

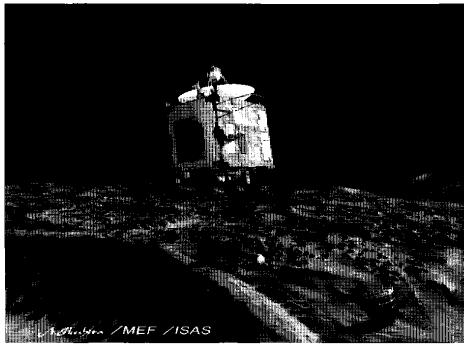


図1 「はやぶさ」の「イトカワ」着陸CG
(©Ikeshita/MEF/ISAS) [Ikeshita]

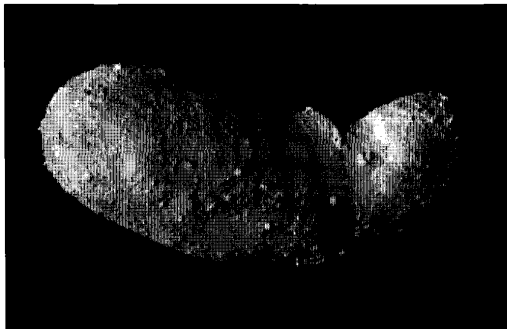


図2 小惑星「イトカワ」, 画像 ST-2448357351
(©JAXA) [DARTS]

トカワ」への着陸と表面からのサンプル回収などを実施している。

最初の予定では、2005年12月に小惑星から離脱し、地球へ戻る軌道へ移行する予定だったが、2回目の小惑星着陸後に不具合があり、小惑星離脱のチャンスを逸した。このため、小惑星出発時期を遅らせ、当初の予定から3年遅れて地球に帰還することになった。

「はやぶさ」には、著者らが開発した「ミネルバ (MINERVA: Micro/Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid)」と呼ばれる小型の小惑星表面探査ロボットが搭載されていた。このロボットは、運用の制約上、完全自律で動作するようにつくってあった。

「ミネルバ」は、「はやぶさ」が近傍からの観測を行っている最中の2005年11月12日に、小惑星に向けて、「はやぶさ」探査機から分離された。しかし、分離時の探査機の対小惑星相対速度条件が悪かったため、小惑星には降りずに、太陽を公転する人工惑星になった。

「ミネルバ」は実際の小惑星表面での活動はできなかったが、現状の小天体探査ロボットの自律化技術を語るうえで不可欠な存在である。本稿では、「ミネルバ」とその成果について解説した後、将来の小天体探査ロボットに必要な技術的課題についてまとめる。

次章以降の本稿の構成は以下のとおりである。2章では、宇宙機の自律化一般について本稿を読み進めるうえで必要なことをまとめる。3章では「ミネルバ」について解説し、4章でその運用成果について述べる。最後に、

5章で今後の小天体探査ロボットの自律化の課題について触れる。

2. 宇宙機の自律化

地球を離れて宇宙空間を飛行する宇宙機の多くは、地球を周回する人工衛星だが、地球外の天体の観測をする探査機もある。

初期の探査機では、対象天体の近傍を通過して1回だけの観測を行う場合が多く見られたが、最近は、対象天体の周回軌道からリモートセンシングにより長期間の観測を行う周回機や、実際に天体に降りる着陸機などがある。また、着陸後、移動して複数地点での観測を行うのが「探査ローバ」である。

地球から遠いところで動作する惑星探査機には、電波伝搬遅延により地球との間の時間遅れが存在する。このため、地球からのテレオペレーションではなく、探査機自身が何らかの判断を搭載コンピュータで行う自律化が必要であるとよくいわれる。

2.1 宇宙機一般の自律化

自律化が必要な理由を列挙すると以下のような[吉光09]。

i. 時間遅れ

距離的に遠いため、電波伝搬遅延による時間遅れが生じる。このため、地球で宇宙機の状態を判断し、コマンドを送ることにより宇宙機を制御するテレオペレーションでは手遅れになるケースがある。

「はやぶさ」探査機では、小惑星近傍滞在時における地球との距離はおおよそ 2 AU^* であり、往復で30分以上の時間遅れがあった。

ii. 共有できる情報量の限界

通信帯域の制約により、宇宙機側の情報をすべて地球で共有できるわけではない。地球で宇宙機の状態判断に使える材料は地球に送信された情報のみであるが、宇宙機側では、それ以上の情報をもとに判断を行うことができる。

例えば、「はやぶさ」探査機と地球との間の通信は、最もスピードが遅いときには 8 bit/s である。このとき、探査機のある瞬間における状態データ(864 Byteで1セット)を地球で受信するのに16分かかった。

iii. 運用上の制約

さまざまな理由により、宇宙機と地球との間で常通信をしているわけではない。地球は自転しているので、地球上の一つのアンテナを常時、惑星空間を飛行する探査機に向けることはできない。

*1 1AU (Astronomical Unit, 天文単位): 地球と太陽との距離に相当し、1AUは約1.5億kmである。1AUを電磁波が伝搬するのに約500秒かかる。

「はやぶさ」探査機では、長野県臼田にあるアンテナを使用して通信を行ったが、1日に通信可能なのは、10時間程度であった。残りの時間帯には、地球から一切モニタしていないので、探査機自身が自己診断を行う必要がある。

以上の事情を考えると、実は、惑星探査機だけでなく、地球を周回する無人の人工衛星にも、何らかの自律化機能が必須であることがわかる。自律化は、すべての宇宙機に共通するテーマである。

地球周回の無人の人工衛星は、時間遅れもわずかで、通信帯域も大きいので、その気になれば、すべてをテレオペレーションで制御することができるはずだが、以下のような理由で、自律化が浸透している。

一つの理由は、通信量の節約である。今日の地球観測衛星や天文観測衛星は、膨大な観測データを発生させる。地上局との距離が近いので、通信レートは高速だが、衛星自体の状態データを送信するのではなく、なるべく観測データを送信したいという要求がある。

もう一つの理由は、運用の省力化である。人工衛星の運用コストは、総プロジェクト予算で無視できない割合を占める。プロジェクト予算を削減するには、運用自体を簡略化するほかない。地上局で24時間体制で衛星をモニタするためには、人的コストがかかりすぎる。特に、異常時に備えて、衛星自体を熟知している専門家を常時待機させるのは不可能である。このため、運用時間を短くしたり、異常時以外には専門家を呼ばないようにしたりして、運用コストを下げる工夫がなされている。

「はやぶさ」の搭載コンピュータには、探査機の状態をもとに特定の動作を自動的に実行させる自律化機能が備わっている [大島 05]。これは、探査機の状態データの特定の項目に対して、論理演算や算術演算を行い、その結果により、異なる動作を自動的に実行させる仕組みである。この機能は、打上げ前には想定していなかった状況に対処させることに大いに役立った。例えば、「はやぶさ」に搭載されたイオンエンジンの継続動作には、自律機能を駆使することにより実現した。

「はやぶさ」で使われたのと同様の搭載コンピュータは、その後打ち上げられた日本の地球周回天文衛星にもそのまま使われて、「はやぶさ」同様、打上げ前に想定していなかった事態に自律的に対処している。

すべての事象に対処できるだけの高度な自律化は現在のところ実現できていない。このため、搭載コンピュータで可能な自律化のみを実施し、対処不可能な場合には、地球からの指示を待つ“shared autonomy”が実践されている。特に、対処不可能な緊急の異常事態が発生した場合には、処置の遅れが手遅れになる可能性があるため、宇宙機自体をセーフホールドと呼ばれる最も安全な状態に退避させて、地球からの処置を待つ。

世界的に見ると、アメリカ合衆国の探査機 Deep Space 1 では、もっと高度な自律化が行われている [高玉 03]。Deep Space 1 では、地上に一切、探査機の状態データを送らず、

探査機自体がその正常度を4段階に判断し、その正常度を搬送波のトーンの違いで地上に知らせた。もちろん、地上からの処置が必要と判断された場合には、その他の探査機と同様、地上からの指示を待つことになる。

2.2 着陸機の自律化

月や火星などの天体へ安全に軟着陸するためには、地球からのリモートコントロールではまず不可能である。探査機から天体表面までの距離を計測して適切に逆噴射を行ったり、探査機で取得した画像をもとに安全な着陸地点を探し出し、そこに誘導するといった自律着陸技術が必要になる。

「はやぶさ」の場合も、距離計や障害物センサ*2などを搭載しており、小惑星着陸の最終段階では、距離計測値などに基づいて、自律的に安全な着陸を行った。

2.3 探査ローバの自律化

探査ローバを天体に送り込む目的は、複数地点に移動して観測を行うことである。このための自律化技術として、周囲の環境をセンシングして、障害物を回避しつつ目的地点に至る経路を計画し、計画された経路に基づいてローバを誘導することがあげられる。

ただし、観測を行う場所は、地上の科学者が指定する。ローバ自らが観測対象を選び出すような自律能力は現状では実現されていない。

将来、科学者の能力を完全にローバに移植することができれば、ローバ自身が周囲の状況を見て、どこに行けばよいか判断し、数多くの岩や石などのサンプルの中から、重要なサンプルのみを選び出すことができるようになるだろう。

このように高度な自律化が実現されると、送り込んだ探査ローバを放置し、重要な観測成果が上げられた場合のみ、そのデータを地球に送るといった有人探査に近い無人探査ができるようになるが、かなり将来の話である。

3. 「ミネルバ」の自律化

「ミネルバ」ローバの外観を図3に、その性能諸元を表2に示す。

3.1 ローバの諸元

ローバは、直径12cm、高さ10cmという手の平に載る大きさであり、その質量は591gである*3。

*2 FBS (Fan Beam Sensor) と呼ばれ、探査機の太陽電池パドルの下をレーダでモニタする。小惑星表面に近づいた後、太陽電池パドルの下に岩などの障害物を検知したときには、太陽電池パドルの損傷を防ぐため緊急回避することが可能である。

*3 「ミネルバ」のシステム全体の質量は1.5kg弱である。これには、ローバのほかに、中継器とそのアンテナ、ローバを保持・分離させる機構を含む。

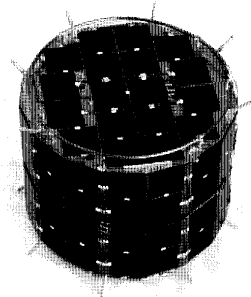


図3 「ミネルバ」ローバ

形状は正十六角柱（ほぼ円柱）であり、すべての面に太陽電池セルが貼ってある。このため、ローバがどのような姿勢になっても太陽光が当たれば発電する。発電量は、太陽からの距離 1 AU のとき、最大 2.2 W である。

余剰電力は、二次電池として搭載した電気二重層コンデンサに充電される。ローバに搭載した通信機、モータ、カメラは、消費電力が大きいため、太陽光発電による瞬時電力だけでは動作させることができない。このため、電気二重層コンデンサにチャージされた電力がこれらデバイスを動作させるのに使われる。また、電池を搭載していることで、ローバが小惑星表面で影領域に入っても、しばらくの間、搭載コンピュータを動かし続けることができる。

搭載コンピュータは、得られる電力が非常に小さいため、クロック速度を 10 MHz として運用している。搭載コンピュータは、電力が供給可能で、内部の温度範囲が正常であれば常時稼働する。

ローバ内部には、二つの DC モータがあり、これにより、小惑星表面をホップしながら移動する。ホップする最大速度は 9 cm/s で、これは「イトカワ」表面からの脱出速度以下である。

ローバは、無線で探査機上の中継器（図 4 の OME-E と書かれた装置）と通信する。ローバが取得したデータは中継器に送られ、中継器から探査機の搭載コンピュータやデータレコーダに渡された後、地球に送信される。ローバに

地球から何らかの指令を送る場合には、一度、中継器にそのコマンドがストアされ、ローバと中継器が通信可能になってから、中継器からローバに向けて送出される。

通信速度は 9 600 bit/s である。また、半二重方式のため、ローバと中継器の間の通信方向を同期させて切り換える必要がある。

外界センサとして、三つの CCD カメラ、六つのフォトダイオード (PD)、六つの温度計をもっており、これらにより、周囲の観測や自律行動計画を行う。

カメラは三つとも同一のもので、ローバ中央のカメラ窓から外界を撮影する。二つのカメラが、基線長 3 cm だけ離れて同じ方向を向いており、近傍の地形のステレオ視をすることができる。もう一つの単眼カメラは、ほかの二つとは反対方向を向いて取り付けられており、主としてホッピング時に上空から小惑星を撮影する。

PD はすべて異なる方向を向いて取り付けられており、入力する光量を測定する。ローバは、PD の値を常時モニタしており、光量から瞬時の太陽方向を推定する。さらに、PD の時間履歴から、ローバ自身の状態が、小惑星表面に静止しているのか、あるいは、ホッピング移動しているのか、どちらであるかを判断する。

ローバの表面からは合計 16 本のピンが突き出ている。このピンの主目的は、太陽電池セルの保護であるが、6 本のピンには温度プローブが入っており、小惑星接地時に表面の温度を直接測定できる。

3.2 ローバの運用

想定したローバの運用シーケンスは以下のとおりである。

ローバは、「はやぶさ」探査機により小惑星の近くまで輸送され、探査機が小惑星着陸の際に、小惑星の上空からばねにより押し出されて放出される。

ローバは、探査機から分離した後、表面に貼られた太陽電池セルで発電し、ホッピングにより自律的に小惑星表面の探査を行う。ローバに送るコマンドやローバから得たデータは、「はやぶさ」に搭載されている中継器が送受信の制御を行う（図 4）。

表2 ローバの仕様

size	hexadecagonal pole (diameter: 120 mm, height: 100 mm)
weight	591 g
CPU	Hitachi SH3, clock 10 MHz
memory	ROM: 256 kByte, RAM: 2 MByte, Flash ROM: 2 MByte
working temperature range	-50 ~ +80°C
actuators	two DC motors (hop, turn)
hopping ability	9 cm/s (max)
power supply	solar cells: 2.2 W (max), 1.6 W (min) 1 AU from the Sun capacitors : 5 V, 20 F
communication	9,600 bps
sesonrs (navigation)	six photo diodes
sensors (observation)	three CCD cameras, six thermometers

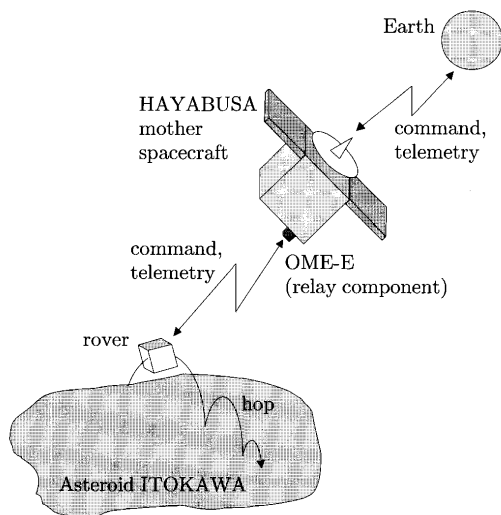


図4 「ミネルバ」の表面探査コンフィギュレーション

ローバの寿命は3小惑星日(36時間)以上*4である。これは、ローバ内部の電気二重層コンデンサの性能劣化の予測から決まったものである。電気二重層コンデンサが完全に劣化すると、モータによるホッピング移動動作やカメラによる撮像といった電気二重層コンデンサによる電力補助が必要な作業ができなくなる。

ローバは小惑星表面から再び回収されることはない。ローバの寿命が尽きて「はやぶさ」と通信できなくなるか、あるいは、「はやぶさ」が地球に帰還するため小惑星を離れる時点で、ローバの役割は終了する。

ローバでやろうとしたことは、以下の二つの工学実験である。

微小重力環境での移動メカニズムの確立 小惑星「イトカワ」の表面重力は地球と比較すると、100万分の1のオーダーである。このため、ローバは、小惑星表面の微小重力に適した移動メカニズムとして、ローバ内部のDCモータを回転させ、表面との反力でホップする機構を採用している(図5)[吉光00]。

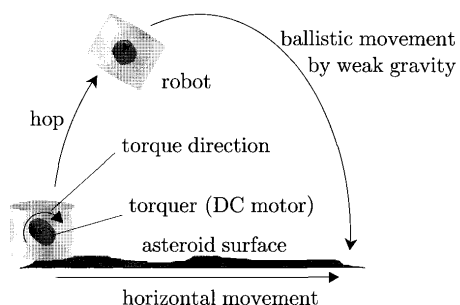


図5 トルカによるホッピング方式

自律的な小惑星表面探査手法の実証 ローバが小惑星表面に降りて表面探査を行うとき、地球と探査機の間には、往復で30分以上の電波伝搬遅延が存在し、探査機・

地球間の最大通信レートは8kbit/s、ローバ・探査機間の通信レートは9.6kbit/sと非常に低速である。また、ローバは地球と直接通信せず、探査機経由でデータのやり取りを行うため、ローバと地球の間で一貫通信の通信ができる保証はなく、ローバのデータがいつ地球に届くかわからない。これに対して、ローバの寿命は最短で36時間であり、地球からの指示を待っていると、その間にローバ自体が動作不能になる可能性もある。このため、ローバ自体を完全自律動作するように作り、この自律探査機能のデモンストレーションを小惑星表面で行うこととした。

3.3 ローバの自律機能

ローバの搭載コンピュータの処理速度はそれほど速いわけではないので、ローバに高度な知能化を求めることは難しい。そこで、ちょっとした工夫により、自律動作を実現させることにした。

§1 自律探査の方法

「ミネルバ」ローバによる小惑星表面の自律探査手法は、「ホッピングによる移動」と「表面近傍観測」を繰り返すだけである。小惑星上の特定の地点に移動する能力はもっていない。

ローバはホッピング動作後、時間が経過すると、表面に戻ってきて、数回のバウンドの後、再び静止する。静止を確認した後、再びホッピング動作を行って別の場所に移動する。ホップを繰り返すことで、異なる地点に到達できれば、複数地点での観測が可能になる。

ローバはPDの時間履歴から、自分自身が移動しているかどうかを判断する。PDの値が変わらない場合は、ローバは小惑星表面に静止した状態にあると判断する。このとき、ステレオカメラで近傍の撮影を行い、温度計で小惑星表面の温度を計測後、ホッピング動作を行う。

PDの値が常時変化している場合には、ローバがホッピング動作後に、小惑星の上空を弾道飛行していると判断する。この際には、単眼の遠方視用カメラで定期的に小惑星表面の撮影を行う。

ホッピング時のDCモータの回転方法を1パターンに固定すると、ローバはそのときの姿勢によってどちらに移動するかわからないため、いわゆるランダムホップを繰り返すことになる。この場合、重力を一定とすると、ホッピング回数を重ねても、ローバの位置の分散は大きくなるが、位置の平均は初期位置と変わらない。複数地点の探査という点では欠点がある。

しかし、小惑星「イトカワ」はいびつな形状をしており、表面の重力場も様々ではない。ローバを重力ポテンシャルの高い位置に降ろせば、ランダムホップにより重力ポテンシャルが低い位置に移動していくことが期待できるので、複数地点の探査は十分可能である。

実際のホッピング動作には、ランダムホップモードに

*4 1小惑星日は約12時間である。

加えて、方向選択ホップモードをオプションとして用意した。DC モータの回転方法には、正転と逆転の二つがあり、どちらを選択するかをホップごとに選択する。選択の基準となるのは、PD の値から推定した太陽の方向と、中継器から教えられた現在時刻、小惑星の自転パラメータである。ローバが小惑星の朝側にいると判断したときは、温度環境を緩和するため、夜側領域にホップするといったサバイバルが実現できる。

PD の値を状態判断に利用したこの“Hop and Observe”による自律移動探査は、カメラ画像による情報処理を伴わないので、低速の搭載コンピュータでも十分実行可能である。

§2 画像選別機能

ローバは姿勢制御を行わないので、小惑星の方向にカメラを確実に向ける機能が無い。特に、ホッピング時に上空から撮影した画像は、1/2 の確率で、宇宙空間の真っ黒な画像を取得することになる。

このため、ローバが取得した画像は撮影後に、搭載コンピュータで圧縮処理を行い、圧縮後のデータサイズにより、その情報量を評価する。宇宙空間を撮影した画像など、画像中の情報量が小さい場合には、搭載メモリに保存せず、画像をそのまま棄却する。

画像を保存する際には、情報量に比例した優先度を付加する。高い優先度をもつデータから順に中継器に送信することで、より科学的価値の高い画像の送信を優先させる。

1 枚の画像は、いくつかの領域に分け、画像の評価はその領域ごとに実施する。画像の一部のみに小惑星が写っている場合は、その領域のみが保存され、残りの何もシーンが写っていない領域は棄却される。

画像の圧縮処理は、搭載コンピュータで行う。ホップした後、小惑星表面に戻って来るまで、かなりの時間がかかるが、その間、中継器との間の通信処理以外にやることはないので、搭載コンピュータの能力を圧縮処理に使うことができる。

4. 「ミネルバ」運用結果

4.1 ローバの分離

ローバは、2005 年 11 月 12 日の着陸リハーサル時に放出することになった。このリハーサル運用では、「はやぶさ」探査機は小惑星に着陸しないが、小惑星表面にかなり近づく。事前の予想では、最接近時の放出予定高度は小惑星表面から 70 m、そのときの「はやぶさ」の対小惑星速さは 5 cm/s 以下であり、この条件であれば、ローバは探査機からの分離後、小惑星に着地する。

ローバの放出指令は自律ではない。地球と「はやぶさ」探査機との間には片道約 16 分の時間遅れがあったため、ローバの放出は、約 32 分後の探査機の位置と速度を予想して実施する時間遅れテレオペレーションである。つまり、「はやぶさ」が小惑星に最接近するタイミングを

予測して、地球からコマンドを送信することにより、ローバを放出した。

時間遅れがある系に対してテレオペレーションを行うことは賢明ではないが、これには、以下の事情がある。

探査機が小惑星に十分近づいた後、自律でローバを放出させるためには、距離計で小惑星までの距離を計り、距離計測値をもとに放出のタイミングを決める必要がある。実際、「はやぶさ」には、距離 100 m 以下で使用可能な LRF (Laser Range Finder) が搭載されていた。しかし、打上げ後、探査機の周辺には何一つ物質が存在しないため、LRF がうまく動作するかどうかの事前試験が一度も行われておらず、LRF の値をこの段階では信用するわけにはいかなかった。

着陸は非常にリスクの高い運用であり、場合によっては、一度も着陸できないまま、地球に引き返す可能性もあった。11 月 12 日のチャンスを逃すと、ローバを分離しないまま母船が地球に戻る可能性があり、この時点では、この機会を見逃すのは得策でないと思われた。実際には、その後、11 月 20 日と 11 月 26 日の 2 回、探査機を着陸させており、後から考えれば、11 月 20 日にローバを放出させれば良かったはずである。

最後に、小惑星近傍において、探査機の対小惑星相対位置制御に十分な経験を蓄積していたこともあげられる。小惑星に到着してから 2 か月もの間、毎日、数 cm/s の加速と減速により、探査機の対小惑星位置の制御に成功しており、この経験をもってすれば、30 分後の探査機の状態を見越したテレオペレーションによる放出には何の問題もなさそうであった。

ローバの放出と同期して、探査機を加速して小惑星近くから離脱させ、かつ、「はやぶさ」搭載カメラによるローバの撮像を行った。カメラによる撮像は、ローバの放出速度と放出方向からローバがその視野内に 1 画素以上で写っていると予想されるタイミングで 4 回実施している。

4.2 実際のローバの分離

実際の放出時のイベントを表 3 に時系列として示す。

事後の解析では、放出時の探査機の小惑星からの距離は 200 m であり、相対速度 15 cm/s で小惑星から遠ざかっていた。このため、ローバは放出したものの、小惑星表面には落下せず、太陽を周回する人工惑星になった。

図 6 は、ローバ放出 212 秒後に「はやぶさ」搭載カメラで撮影した画像である。この画像に、ローバとローバを固定するカバーと思われる物体が写っている。実線がローバと思われる物体、点線がカバーと思われる物体を示している。

ローバは放出後、「はやぶさ」との通信を安定して継続した。最後にローバから送られたテレメトリは 11 月 13 日 0:32:20 (UT) に生成されたものであり、放出後、約 18 時間にわたってデータを送ったことになる。

ローバが小惑星表面に落下したとすると、小惑星は自

表 3 ローバ放出時のイベント

time (UT)	time offset [sec]	event
12/Nov 06:07:38		transmission of command to deploy the rover
06:24	0	rover deployed
	+120	orbital maneuver in 30 cm/s to get away from the asteroid by Hayabusa spacecraft
	+212	first shoot by the camera onboard Hayabusa
	+250	second shoot by the camera
	+300	third shoot by the camera
	+480	fourth shoot by the camera
06:40		confirmation of deployment on the ground by the first status data generated after the deployment
13/Nov 00:32:20		last telemetry of the rover received at Hayabusa



図 6 ローバ放出後 212 秒後に「はやぶさ」が撮影した画像

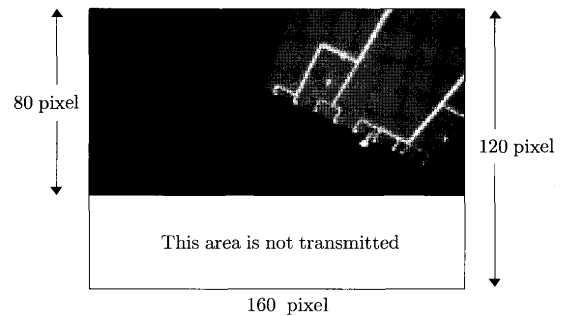


図 7 「ミネルバ」が分離後に撮影した唯一の画像 (サイズ: 160×80 ピクセル)

転しているため、放出後約 3 時間で太陽の当たらない夜半球^{*5}になり、ローバとの通信が途絶するはずである。しかし、放出後 18 時間にわたって通信を継続したことは、ローバは宇宙空間に漂っていることを示していた。

ローバから得られた最後の状態データにおいても、ローバには何の異常も認められていない。このため、通信が途絶した理由は、「はやぶさ」側に搭載されている対ローバ通信アンテナがカバーする範囲からローバが逸脱したためと思われる。

図 7 は、放出後のローバが撮影した画像である。ローバが放出後に送信した画像は唯一これ 1 枚である。

画像の大きさは 160×80 ピクセルである。本来であれば、160×120 ピクセルの画像が送信されるべきであるが、画像の下側 1/3 は送信されていない。ローバが有する画像選別機能により、何も写っていない領域が送られなかったと考えられる。

送られた画像が 1 枚であった理由も、自律画像判断機能のためと考えられる。ローバは「はやぶさ」から分離後、自律動作モードになっており、定期的に搭載カメラで撮像を行っていたはずである。しかし、ローバは回転しながら探査機を離れており、分離直後は、撮影した画像が宇宙空間だけだったため、画像を棄却して送信しなかった。ローバ自体は小惑星からも探査機からも遠ざかっており、そのうち、たまたまカメラの視野内に小惑星

か探査機が入ったとしても、そのときには距離が遠すぎて、画像を保存する条件に合致しなくなった。

5. 将来の小天体探査に向けた課題

「はやぶさ」が小惑星「イトカワ」を観測した結果、個人的に最も良かった点は、その表面が一様でなかったことである。図 2 の「イトカワ」の画像を見てもわかるとおり、大きく分けて、砂礫が堆積して見目がスムーズなエリアと岩盤がむき出しになっているエリアがある。両者の違いは重力ポテンシャルにあり、長年の間に、細かい砂が重力ポテンシャルの低いエリアに落ちてしまったと考えられる。

また、後から別な隕石が衝突したためなのか、明らかにほかとはスペクトル特性が違う領域も存在する。

地球から火星を見てもわかるとおり、大きな天体は形成後に熱的変性を受けているので、さまざまな地形を含んでいる。一方、小天体が太陽系の初期の一断面を代表的に抽出したものであるならば、小天体表面は一様であるはずだ。この場合、着陸して観測を行うことは重要だが、場所はどこでもよく、移動する必要もないことになる。

「はやぶさ」による「イトカワ」の観測は、非常に小さな天体においても、ローバにより移動探査する価値があることを示しており、小天体探査ローバの存在意義を裏付けてくれるものであった。

また、同時に、将来の小天体探査に必要な技術も明らかになった。ローバが科学的に興味がある地点に移動し

*5 小惑星の自転周期が 12 時間であり、小惑星のローカルタイム正午の地点でローバを放出したと仮定。

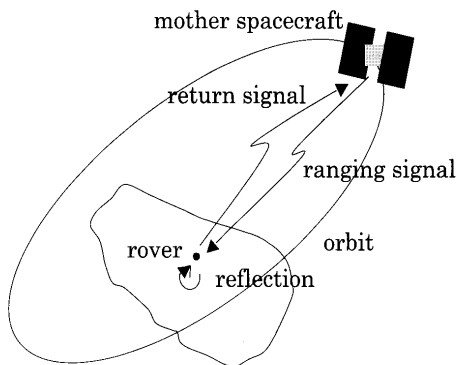


図8 電波を使って、母船からローバまでの距離を測り、ローバの小惑星表面上での絶対位置を測定する方法

て、観測を行うことである。ローバを目的地に誘導するためには、ローバの位置同定が必要である。

ローバを小型にすれば、視野範囲が限られるため、表面上にあるローバが取得した画像から目的地を相対的に見つけることは困難である。このため、目的地の小天体固定座標系における絶対位置を指定し、ローバの絶対位置を目的地の絶対位置に収束させるようにローバを誘導する手法が考えられる。

小天体表面の緯経度の定義には地心緯経度と測地緯経度の二つがある。小天体表面では、小天体に対する基準軸は重力方向だが、重力方向を使う限り、自己位置同定により求まる絶対位置は測地緯経度になる。一方、小天体を外部から見ると、小天体の内部密度分布や重力分布がわからない以上、目的地の座標は地心緯経度で指定することになる。

小天体がいびつな形をしていると、ローカルな重力方向ベクトルは小天体の質量中心を通らない。場合によっては、地心緯経度と測地緯経度の間に、角度で数十degの違いがある。ローバが自己位置同定をする限り、ローバを小天体外部から指定した目的地に誘導することができない。

現在、母船から静止しているローバまでの距離を計測し、探査機の運動と小天体の自転運動のダイナミクスを利用して、長期間の距離計測値からローバの地心緯経度を探査機が求める方法を検討している(図8)[金田09]。

この手法は、ローバではなく探査機がローバの位置計測を実施するので、搭載コンピュータの処理能力が低いローバにおいても適用可能なメリットがある。

6. おわりに

本稿では、「はやぶさ」に搭載された「ミネルバ」ロ

ーバの自律機能と成果について説明を行い、これらの運用成果を踏まえて将来の小天体表面移動探査の課題を示した。

現在、「はやぶさ」の後継機で、新たな小惑星を目指す「はやぶさ2」の開発が始まったところである。「ミネルバ」の開発に関わったメンバも、その後継機である「ミネルバII」ローバ探査システムの検討を行っている。「ミネルバII」では、「ミネルバ」でできなかった工学実験の再挑戦を行うことが基本だが、「はやぶさ2」以後のさらに将来の小天体表面探査に向けて、本稿で示した新たな技術的チャレンジの布石を打つことも考えている。いずれにせよ、自律化、知能化が今後も小天体探査ミッションの鍵であることに変わりはない。

◇ 参考文献 ◇

- [DARTS] DARTS Hayabusa project Website, <http://darts.isas.jaxa.jp/planet/project/hayabusa/>
- [Fujiwara 03] Fujiwara, A., et al.: The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa, *Science*, No. 312, pp. 1330-1334 (2006)
- [Hayabusa] Hayabusa Website, <http://www.isas.jaxa.jp/e/enterp/missions/hayabusa/>
- [Ikeshita] Ikeshita gallery Website, <http://homepage3.nifty.com/lightage/>
- [JPL] JPL Solar System Dynamics Website, <http://ssd.jpl.nasa.gov/>
- [金田 09] 金田さやか ほか：電波の伝搬遅延時間測定による小天体探査ローバの位置同定法, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 9, pp. 1007-1015 (2009)
- [MPC] Minor Planet Center Website, <http://minorplanetcenter.net/>
- [大島 05] 大島 武ほか：「はやぶさ」バス系新規技術, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 53, No. 618, pp. 69-75 (2005)
- [高玉 03] 高玉圭樹, 中谷一郎：深宇宙探査機の自律化とその検証, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 5, pp. 488-493 (2003)
- [吉光 00] 吉光徹雄, 久保田孝, 中谷一郎：小天体探査ローバの新移動メカニズム, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 292-299 (2000)
- [吉光 05] 吉光徹雄, 久保田孝, 中谷一郎, 足立忠司, 齋藤浩明：「はやぶさ」搭載小惑星表面探査ローバ MINERVA, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 53, No. 620, pp. 276-281 (2005)
- [吉光 09] 吉光徹雄：宇宙ロボットを作るための心得, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 5, pp. 514-517 (2009)

2011年2月9日 受理

著者紹介



吉光 徹雄

2000年3月東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年4月より、文部科学省宇宙科学研究所勤務。現在、いくつかの改組を経て、(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授。惑星探査ローバや探査機の自律化、超小型衛星の研究・開発に従事。