解説

宇宙ロボットを作るための心得

Commandments on Making Space Robots

吉 光 徹 雄* *宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

Tetsuo Yoshimitsu* *Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace and Exploration Agency

1. はじめに

宇宙ロボットという単語を聞いて何を思い浮かべるだろうか？ 米国が火星に送った MER (Mars Exploration Rover) や Sojourner といった 6 輪の移動探査ロボット [1] を思い出す人が多いかもしれない。スペースシャトルや国際宇宙ステーションに搭載された作業用ロボットアーム [2] [3] を思い浮かべる人も多いだろう。後者は、専門の訓練を受けた宇宙飛行士が直接操作するので、ロボットというよりは、宇宙空間で動作する重機と言ったほうがいいと思う。

世間一般では、“動かなければ宇宙ロボットにあらず” という誤解が蔓延しているように思われる。しかし、“宇宙探査ロボット” とは、“無人探査機” と同義語である。

考えてみると、現在のロボティクスに関する活動分野には、人間を人工的に作り出すための様々な分野が含まれる。視覚的に動作するだけでなく、人間の知的情報処理能力を研究する人工知能も立派なロボティクス技術の一つである。

現在、この広義のロボティクス技術は、地球から遠く離れた天体をめざす無人探査機だけでなく、地球を周回する人工衛星にも応用されている。“宇宙ロボット” には、現在のすべての人工衛星、人工探査機が含まれると言ってよい。宇宙は、ロボティクス技術の応用の場の宝庫なのである。

本稿では、ロボットの研究・開発に携わる者が、ロボティクスと密接にもかかわらず、ロボット研究者があまり接することのない宇宙の世界に手を出すときの“心得”を筆者なりにまとめたものである。

2. 意外と大きなロボティクス技術の活躍の場

現在、日本では、いくつかのロボット探査ミッションの計画がある。一つは、SELENE-2 月探査計画である [4]。月面に着陸後、移動ロボットにより周辺を探査する。もう一つが、小惑星探査機 “はやぶさ” [5] の後継機として、別の太陽系小天体をめざす計画である [6]。いずれも、対象天体へ

の着陸と、移動ロボットによる表面探査を含んでいる。地球外天体への着陸は、対象が人工地形でないうえに、地球との間の時間遅れが存在するため、安全な場所の判断を地球まかせにするのではなく、搭載コンピュータで自律的に実施する必要がある。このような地球外天体への着陸探査は、分かりやすいロボティクスミッションといえる。

地球外天体へ着陸した日本初のミッションは、2003 年 5 月 9 日に打ち上げられた小惑星探査機 “はやぶさ” である [5]。はやぶさは、大きさ 500[m] ほどの小惑星 “イトカワ” にランデブして、その表面に着陸し、表面から小惑星のサンプルを地球に持ち帰るための工学実験を行う探査機であり、現在、地球を目指した帰路の最中にある。

はやぶさは、小惑星表面へ着陸することや [7] [8]、小型の表面探査ローバ “ミネルバ” を搭載していたことから [9]、多くのロボティクス技術を備えていた。

ここで、日本初のロボット探査機は何であろうかと考えると、筆者は、1998 年 7 月 4 日に打ち上げられた火星探査機 “のぞみ” を挙げる (Fig. 1) [10]。のぞみは、最初の予定では、1999 年末に火星の周回軌道に投入される予定だった。しかし、打ち上げ後の不具合により、4 年遅れの 2003 年末の火星到着をめざすことになり、さらなる不具合により、結局、火星の周回軌道に投入することはできなかった。現在は、地球との通信を途絶し、太陽を公転している人工惑星になっている。

のぞみ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機能（自律化機能と呼ばれた）が備わっていた。これは、探査機の状態データの特

図 1 Nozomi spacecraft (Courtesy of ISAS/JAXA) [10]

原稿受付 2009 年 5 月 11 日

キーワード: Space Robot, Planetary Rover

*〒 229-8510 相模原市由野台 3-1-1

*Sagamihara-shi, Kanagawa

定の項目に対して論理演算や算術演算を施し、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。この自律化機能が、のぞみのトラブルを克服するうえで大きな役割を果たす。打ち上げ前には想定していない状況に対して、自律化機能の使い方を工夫することで対処できたためである。

のぞみのトラブルの一つは、送信機にデータ変調をかけることができなくなったことである。搬送波自体は発信するので、探査機自体の存在確認はできるものの、探査機の現在の状態や観測結果など一切のデータを地球に送ることができなくなった。しかし、探査機の受信機は問題なく動作していたため、自律化機能のパラメータを地球から送り、搭載コンピュータでは、しきい値による判定結果をもとに、送信電波の搬送波の ON/OFF を実施することで、1 ビット単位ではあるが、地球に探査機の状態を知らせることができた [11]。

のぞみには、火星周回軌道投入後に、火星の二つの衛星“フォボス”と“ダイモス”に接近するチャンスが年に数回あると想定されていた。このため、最接近時に自律的にこれらの衛星を撮像する機能を持っていた [12]。この自律撮像機能ものぞみを持っていたロボティクス技術の一つである。

のぞみが二つの衛星とすれ違う際の相対速度は秒速数 [km] と非常に高速であり、その相対運動は両者の軌道の不確かさから完全には分かっていない。このため、あらかじめカメラの視野方向を地球から指定することは不可能である。そこで、最接近時に、カメラの視野中心に衛星をトラックするよう、自律的に視野方向を変える visual feedback の機能が付加されていた。

はやぶさ探査機にも、のぞみの自律化機能を発展させた搭載コンピュータが搭載された [13]、この自律化機能は、当然ながら、小惑星着陸時に使用されたが、それ以外にも、イオンエンジンを長期間の間、停止させることなく継続運転させることや、姿勢制御があまり正確でない状況において小惑星を観測することなど、打ち上げ前には想定していなかった局面で使用されている [14]。

このように探査機自体が自分で判断し何らかの対処をする自律化機能は、地球から遠く離れた天体をめざす無人探査機には必須である。現地で人間がメンテナンスできないうえに、地球と探査機との間の大きな通信遅れや通信容量の制限によって、探査機の状態をすべて地球でリアルタイムに把握するのは困難である。このため、その場で即座に対処しなければ探査機自体の生死にかかわる問題となりうる。

のぞみやはやぶさに搭載された自律化機能は、あらかじめ指定した項目をしきい値判定する程度であり、あまり高度なものとは言えないが、米国の探査機 Deep Space 1 では、Remote Agent と呼ばれる高度な人工知能技術を搭載していた [15]。Deep Space 1 では、地上に一切、探査機の

状態データを送らず、探査機自体が正常度を 5 段階に判断し、その正常度のみを搬送波のトーンにより地上に知らせた。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に状態データを地上に送り、地上からの対処を待つことになる。

のぞみやはやぶさと同等の自律化機能は、既存技術の流用のため、その後、地球周回天文科学衛星にも搭載されている。そして、のぞみやはやぶさと同様に、打ち上げ前に想定していなかった事態に対処するために使われた。

世界的に見ても、自律化機能をすべての人工衛星に搭載し、人工衛星をロボット化することは、もはや当たり前となっている。地球周回人工衛星は、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、すべてをリモートコントロールできるはずだが、以下の理由によりロボット化が浸透している。

一つの理由は、通信量の節約である。人工衛星から送出されるデータのうち、人工衛星本体の状態データは少なからずの割合を占める。しかし、近年は、非常に大量の観測データを発生させる地球観測衛星や天文衛星が打ち上げられており、通信帯域を人工衛星本体の状態データの送信に割くわけにはいかないという事情がある。

もう一つの理由は、運用の省力化である。人工衛星の運用費は、総プロジェクト予算の中で無視できない割合を占める。これを減らすためには、運用自体を簡単にするほかない。人工衛星の状態をすべて地球に送り、常にリアルタイムにモニタするためには、多くの訓練された専門のスタッフを常時待機させなければならない。このため、人工衛星自体をロボット化することで、運用時間を短くしたり、本当に緊急な場合以外には専門のスタッフ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されている。

以上のように、知能化を含めたロボティクス技術は、地球外の天体の探査だけでなく、人工衛星一般に必須となっている。実際、現在、地上で実施している人工衛星の故障判断機能は、搭載コンピュータの処理能力が許せばすべて機上に持っていけるはずである。今後、どのように人工衛星を知能化させるかに関しては、まだまだ多くの研究課題や選択肢があり、ロボット技術者の活躍が期待される。

3. ロボットは必要か?

LUNAR-A というミッションがある [16]。1995 年打ち上げをめざした月探査機である。しかし、開発が思うように進まず、紆余曲折を経て、2007 年になってキャンセルが決まった。

LUNAR-A は、月で発生する震動（月震という）を測定することによって、月の内部構造を調べようというミッションである。このためには、月の複数地点に長期間動作する震動計を設置する必要がある。震動計は、月面に置くだけ

では月の微弱な震動を精度良く測定するには不十分であり、埋める、あるいは、砂を上からかけることにより、月面と同化する必要がある。

このようなミッションの話を聞いて、どのような探査機を思い浮かべるだろうか？ “まず、月に着陸する探査機を作る。その着陸機はロボットアームを持っており、ロボットアームを使って月面に穴を掘り、震動計を設置し、再び埋める。複数地点で計測する必要があるので、探査機は2機以上同じものを作る。” というようなシナリオを思い浮かべるのではないだろうか？ 自律着陸、ロボットアーム、掘削とロボット技術満載のミッションである。

しかし、LUNAR-A では、そのような複雑な探査機は採用しなかった。探査機開発のコストや質量の制約から、そのような贅沢な探査機を作ろうにもできなかったという事情はあったにせよ、もっと簡単な方法が採用された。

LUNAR-A は、月面には着陸せず、月を周回するのみの探査機である。これに、2本のペネトレータと呼ばれる槍型の観測装置を備えている (Fig. 2)。ペネトレータは、震動計と通信機、6ヶ月間動作するための一次電池を備えており、このペネトレータを高度 25 [km] から落下させ、秒速 280 [m] で月面に貫入させる。

この方法により、LUNAR-A 探査機の打ち上げ時質量は 540 [kg] と非常に軽量であった。現在、日本で計画が進められている SELENE-2 月着陸機は、打ち上げに H-IIA ロケットを必要とすることから、打ち上げ時質量が数トンに達すると予想される [4]。LUNAR-A を着陸して震動計を埋めるミッションにしたならば、非常に重い探査機になっただろう。そして、軽いということは、コストが安く、システムが複雑でないということも意味する。

実際には、ペネトレータの開発がうまくいかず LUNAR-A 自体がキャンセルされたため、結果的には、この方法はうまくいかなかった。しかし、ここで強調すべきことは、宇宙ミッションにおいては、目的を達成するために一番迅速かつ簡単、确实だと思われる方法を選ぶということである。その方法がロボット技術ならば採用するが、必ずしもロボット技術にこだわるようなことはしない。LUNAR-A

図 2 LUNAR-A. You can identify two penetrators beside the spacecraft (Courtesy of ISAS/JAXA) [16]

ミッションの目的は、月震を計ることであり、着陸や掘削はそれを達成するための一手段にすぎない。ロボットを宇宙に持っていくためには、ロボットが必要なことを示さなければならないのだ。

このような目的指向の考え方が、質量などの制約条件の厳しい宇宙ミッションにおいては重要である。しかし、これは宇宙だけの話ではない。地球上でも同じことである。

最近、ロボット分野では、つくばチャレンジ [17] や Urban Challenge [18] といったロボットコンテストが数多く行われている。これらは、与えられた条件の下で勝利をおさめるために、どのような手段を使用してもよい。このようなコンテストに参加して腕と考え方を磨くことが、宇宙への近道なのかもしれない。

4. 宇宙のしきい値は高いのか？

宇宙ミッションはしきいが高いため、なかなか手が出せないという話をよく聞く。その不満の内容は、(1) 多くの事前試験をする必要があるため手間がかかる、(2) 部品が高いためコストがかかる、(3) 立案してから実現までの時間がかかる、などである。

確かに市場規模が小さいため、機会が少ないことは事実である。また、専用の設備や専門の知識が必要であり、初期投資が大きく、なかなか参入できないことも事実だろう。

しかし、地上においても、市場に製品を出して商売をするとなると、宇宙機を作るのと同様に難しいのではないだろうか。

自動車産業を考えてみよう。自動車開発では、一つのモデルを市場に出すまでに 3~6 年の開発期間と数 100 億円の開発費用を要している。製造する台数が多いので、生産設備を整備する必要もある。しかし、自動車に対しては宇宙と同様の不満は聞かれない。

地上で使われる工業製品においても、使用する場所の環境に合わせて作り、試験をしてから出荷するという点では宇宙機と同じである [19]。例えば、家電製品では、梱包される AC アダプタなどの電源は現地の商用電力事情に合わせたものが出荷先ごとに選ばれる。現在は主流ではないが、ブラウン管を用いたテレビやモニタは、出荷先の地磁気によって色ずれが起こるので、出荷先と同じ地磁気を検査ラインに作って調整を行っている。むしろ、PL 法など、不具合のある製品を出した後に法律が介入しない分、宇宙機のほうが気軽であるともいえる。

宇宙に持っていくロボットは、現地での調整が一切できないため、出荷前の地上において、宇宙環境と宇宙まで運搬する輸送機の環境を模擬した試験を行う。実際に行わなければならない事前試験は、以下の三つである。

- 宇宙空間での真空環境を模擬した熱・真空試験、
- 宇宙空間での放射線被曝量を考慮した放射性試験、

- 宇宙空間に輸送するまでのロケットの振動で壊れないことを確認するための振動試験

逆に、これらの定められた手順を踏んで試験に合格さえすれば、宇宙に持っていくことが可能となる。地上で使用する工業製品の試験と手間と大きく異なるわけではない。

上に述べた試験は宇宙空間を飛翔する場合であり、地球外天体で活動する移動探査ロボットの場合、対象天体の環境を模擬した試験も必要となる。例えば、月面の場合、約2週間の昼と約2週間の夜が繰り返し訪れ、昼には表面温度が100°C以上、太陽の当たらない夜には-100°C以下になる。このような温度条件の月面からの熱輻射を考慮に入れる必要がある。

部品に関しても一つ述べておく。宇宙用として売られている部品と民生部品の違いは主として放射性耐性にある。しかし、最近の民生部品は10[krad]程度の被爆量であれば、問題なく動作することが多い。はやぶさミッションでは、4年間で20~30[krad]の被爆量があるとされ、この被爆量を受けても壊れないように対策することが求められた。はやぶさに搭載した機器でも、ミネルバのように2年半後に放棄される機器では、その半分の被爆量を考慮したのみである。放射性耐性は、きちんと考える必要があるが、正しく対処すればクリアするのはそれほど難しいことではない。

ロボットを宇宙に持っていくために、もう一つ考慮すべきことは、自立性である。宇宙空間では、充電したバッテリーを交換すればいいわけではない。ロボットが継続的に活動するためには、そのエネルギー問題をどう解決するべきか、地上における動作モデルの時点から考えておく必要がある。

もちろん、RTG (Radioisotope thermoelectric generator)[†]をエネルギー源とすることも可能である。過去のソビエト連邦の月探査ローバはRTGを使うことにより、昼夜を問わず長期間活動した。現在でも、木星以遠の天体をめざす探査機では使われている。しかし、日本においてRTGを使うには抵抗が大きく、ほとんどの場合において太陽電池セルを使うことになる。

太陽電池セルの発電量を考慮すると、搭載コンピュータの動作速度をそれほど速くできないことに気づくだろう。はやぶさ搭載の小惑星探査ロボット“ミネルバ”では、ボディの周囲に太陽電池を貼りめぐらしたが、瞬時に発電できる電力は2[W]であり、このような低電力で動作するロボットを作る必要があった。

5. おわりに

宇宙ロボットを実際に作って宇宙に送るのは確かに難し

い。機会もあまりない。ただし、その難しさは、宇宙特有の状況はあるものの、他の産業と比べて際立っているわけではない。また、宇宙はロボット技術のアプリケーションの宝庫であり、ロボティクスの研究者はむしろ参入しやすいはずである。例えば、農作物の熟成度合いを判定する画像処理の研究が、月面において科学的に重要な石のみを自動的に判別し拾うといったアプリケーションにつながることもあり得るだろう。

ロボット技術者が宇宙の仕事をする際に、文化的ギャップに悩むことのないように切に願う。

参考文献

- [1] Mars rover website <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/>
- [2] Canadarm website <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/canadarm/>
- [3] Canadarm2 website <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/canadarm2/>
- [4] 橋本樹明 他: “SELENE 後継月探査計画”, 第52回宇宙科学技術連合講演会講演集, no.3A09, pp.1701-1706, 2008.
- [5] Hayabusa website <http://www.hayabusa.isas.jaxa.jp/>
- [6] 吉川真: “「はやぶさ」後継機による小天体探査ミッション2”, 第52回宇宙科学技術連合講演会講演集, no.1H13, pp.645-649, 2008.
- [7] 橋本樹明 他: “自律機能を搭載した「はやぶさ」航法誘導制御系～深宇宙巡航運用と小惑星ランデブ～”, 日本航空宇宙学会誌, vol.53, no.619, pp.237-241, 2005.
- [8] 久保田孝 他: “「はやぶさ」の革新的サンプリング着陸—自律着陸誘導とタッチダウンダイナミクス—”, 日本航空宇宙学会誌, vol.53, no.619, pp.242-248, 2005.
- [9] 吉光徹雄 他: “「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.
- [10] Planet-B website <http://www.stp.isas.jaxa.jp/nozomi/>
- [11] 松浦晋也: 恐るべき旅路. 朝日ソノラマ, 2005.
- [12] 二宮敬虔 他: “火星探査機「のぞみ」搭載火星撮像カメラの開発”, 電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス, vol.98, no.278, pp.69-75, 1998.
- [13] 大島武 他: “「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.210-215, 2005.
- [14] 國中均 他: “小惑星探査機「はやぶさ」搭載マイクロ波放電式イオンエンジンの初期運用”, 日本航空宇宙学会論文集, vol.52, no.602, pp.129-134, 2004.
- [15] 高王 他: “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.
- [16] Lunar-A website <http://www.isas.ac.jp/j/enterp/missions/lunar-a/index.shtml>
- [17] つくばチャレンジ website <http://www.robomedia.org/challenge09/>
- [18] Urban Challenge website <http://www.darpa.mil/grandchallenge/>
- [19] 茂原正道 他: “宇宙探査ローバの作り方”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.5, pp.472-476, 2003.

吉光徹雄 (Tetsuo Yoshimitsu)

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。2003年10月独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部。現在、同准教授。惑星探査ローバや超小型衛星の研究・開発に従事。

(日本ロボット学会正会員)

[†]放射性崩壊に伴って放出される熱エネルギーを熱電変換により電気エネルギーとして取り出す装置