

惑星探査群ローバーシステムの構成シミュレーションとその評価

Simulation and Analysis of grouped rovers for planetary investigations

萬野 有生^{*1}
Yuki Manno

堀 浩一^{*2}
Koichi Horii

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokyo

This paper describes the research of grouped rovers used for the investigations of new planet. It seems cheap and effective to use many small rovers instead of a big rover. Then, I made a model of wireless communication on the planet, and verified effectiveness of grouped rovers.

1. 序論

1.1 概要

本研究では、群ローバーによる惑星探査を想定し、その構成の最適化を目指す。そのために、まずは問題の分析を行い、その後特に通信の構成という点を取り上げ、シミュレーターを作成する。その後様々な条件を設定した上でパラメーター同士の定性的、定量的な関係を導くとともに、一定の条件下での局所最適化を行う。

最終的には得られた結論と、現在 NASA が行っているような実際の宇宙ミッションとの比較により、シミュレーション結果の評価を行う。

1.2 背景

現在 NASA の惑星探査ローバーは大型化が進んでおり、次回火星に送る MSL は重量 900kg とこれまでで最大のものである。

一方で小型のローバーを複数用いる探査も 90 年代に提案されていたが、結局実施されることはなかった。

しかし、特に探査という目的を達成するためには、大型ローバーが絶対有利であると言うことはまだ出来ないと思われる。そこで本研究では、惑星探査において小型の群ローバーの有用性を確かめる。

1.3 目的

以上の背景を受けて本研究では以下の 3 点を目的とする。

- 複数運用の利点、問題点を洗い出す
- 惑星上の通信系のシミュレーターを作成する
- シミュレーションを行い、結果をもとに実現可能性を探る

2. 本研究の意義

2.1 群ローバーによる惑星探査

まず、群ローバーを使用した際にアドバンテージとなると考えられる点についてまとめる。

① 探査効率の向上

現在の宇宙ローバーは移動速度が非常に低速であり、数ヶ月のミッションで動ける範囲は数百メートル、といったことが珍しくない。

さらに、搭載している機器も主に映像的な観測、岩石など

の成分分析などが主であり、サイズはそこまで大きくない。そこで、ある程度小さなローバーを複数送り込めば、単純に送り込んだ数が多いほど探査できる範囲も広がることになる。

② 予算の低減

現在の宇宙ローバーは移動速度が非常に低速であり、数ヶ月のミッションで動ける範囲は数百メートル、といったことが珍しくない。

さらに、搭載している機器も主に映像的な観測、岩石などの成分分析などが主であり、サイズはそこまで大きくない。そこで、ある程度小さなローバーを複数送り込めば、単純に送り込んだ数が多いほど探査できる範囲も広がることになる。

③ 信頼性の向上

莫大なコストがかかる上、過酷な環境下での活動を余儀なくされる宇宙開発においては、信頼性は常にプライオリティの先頭に置くべきものである。これまで信頼性向上のために、システムの並列化や部品の度重なるテストなどが行われてきたが、複数のローバーを用いることによって、純粋な並列システムではないものの、故障時も全てのミッションが失敗になることのない、信頼性の高いシステムができるものと考えられる。これはつまり、ミニマムサクセスの確率を向上させることになる。

次に不利な点を考えてみる。

① 制御の難しさ(自律制御の必要性)

外惑星、例えば火星を探査する場合、地球から送った信号は往復に最低 15 分を要する。これは数分前の情報を元に数分先の動きを命令しなければならないことを示しており、ローバーの数があれば増えるほどその個別の操作は難しくなる。

そこでそれぞれのローバーにはある程度自律的に動いてもらう必要があるが、ローバーを小型化している以上、あまり複雑なプログラムは動かすことができない

② 通信量の増大

各ローバーは小型であるため、直接地球と通信を行うことができない。そこでランダーを経由して地球との通信を行うことになるが、ローバーの数が増えすぎるとランダーの通信回線がパンクしてしまう。

本論文ではこの部分に特に注目しており、ランダーの通信量に対してどの程度のローバーの数が最適なのかを検討する。

2.2 本研究の意義

本研究は、現在主流である大型ローバーの単独探査に対し、小型の群ローバーによる探査を提案するものであり、その有用性が実証されれば、今後の宇宙ミッションにおいて新たなミッション形態として群ローバーによる探査ミッションを選択肢に加えることが出来るようになる。

*1 manno.yuuki@dena.jp 現在株式会社ディー・エヌ・エー勤務

本研究では特に新たな惑星の初期の探査を想定しているが、今後の研究によりその他の様々なミッションでも群ローバーの有用性が示されることになり、宇宙探査の主流がそちらに移るようなことがあればさらなる低予算化も可能になると考えられ、宇宙開発が促進されることになる。本研究はその第一歩としての研究、シミュレーションを目指す。

3. シミュレーターの作成

3.1 ミッション設定

ミッションの目標は未知の惑星の探査であり、その初期段階の探査を目的とする。具体的には様々な画像の撮影、岩石成分の分析、大気分析である。特にオービターからでは得られない地表の詳細なデータを得ることを目的とする。

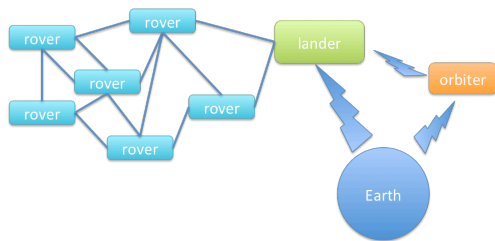
そのために群ローバーを用いるわけだが、具体的な大きさはマーズパスファインダーで用いられたソジャーナローバー程度、つまり 30cm×40cm×60cm、重量 10kg 程度である。

ローバーはまとめてコンテナに格納しており、火星の周回軌道に入ったクルーズステージからそのローバーを順次投下、パラシュートとエアバッグによる着地を行うことにする。重量を考えれば十分にパラシュートとエアバッグで対応できるはずである。

先程も述べた通り、宇宙ローバーは非常に移動能力が低いいため、ミッション期間が長くなっても探査範囲の増大はあまり見込めないことから、ミッション期間は 90 日程度を想定することにする。

この 90 日間の中で、なるべく多くの範囲探査することを目標とするわけだが、これは言い換えれば以下に多くの情報を集めるか、ということになる。そこで今後のシミュレーションでも、いかに正確に、早く、多くの情報を集めることができるのかを評価の主軸におく。

3.2 構成図



上図のように各ローバーが地上に散っており、観測活動を行っている。その際蓄積されたデータをパケットに分割し、まずはランダーに向けて送信する。パケットを受け取ったランダーはそれらを蓄積し、パケットが揃ったらそのデータを地球へと送信する。この際軌道上にすでに存在する火星周回衛星を経由することも可能である。

シミュレーターではローバーからランダーに情報が到達するまでの部分のシミュレーションを行う。

3.3 システムフロー

通信がどのような流れで行われるのかを示す。

- ① ローバー全体が活動によりデータを蓄積
- ② ランダーは地球からローバーに対する命令データを受信
- ③ ローバー、ランダーが 1 台ずつ自分の所持データを送信する経路を探索
- ④ 経路が見つければデータを送信
- ⑤ 全部の機体が探索を行ったら③に戻る

- ⑥ 一定時間経過したら一日の通信終了

3.4 通信実行

通信は一般的なパケット通信のモデルを用いて行う。また、ランダーへの経路探索には幅優先探索を用いることで、最短距離での到達を目指すものとする。

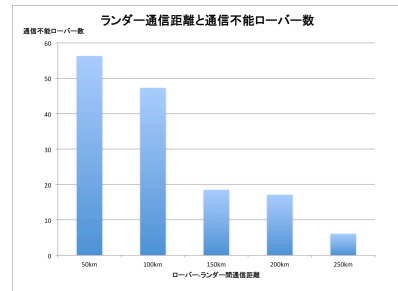
ローバーは日々の活動により以下のようなデータを蓄積する。これをランダーに向けて送信することになる。

データの種類	サイズ	1 日の生成量
写真	6~15(random)	6 枚
テレメトリ	2 パケット	1 か 2 回
緊急	1 パケット	1 回(p=0.05)

また、ローバーには待機状態、ビジー状態、緊急状態、省電力状態、停止状態があり、それぞれの状態によって通信を行うかどうかや、通信の条件が異なる。

4. シミュレーション結果

4.1 ローバーランダー通信距離と通信不能ローバー数

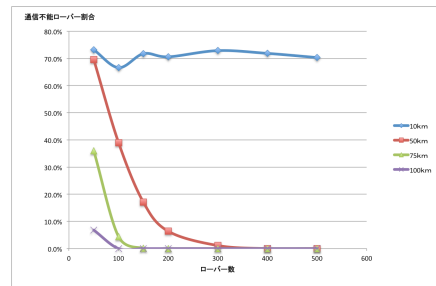


フィールドの大きさも考慮に入れて 150km にする。

4.2 ランダー通信チャンネル数と送信完了時間

ランダーの通信チャンネル数は 1 回のステップで送信されるデータの量に直接影響を及ぼす。そのためこれが大きすぎるとシミュレーションが意味をなさない。また、宇宙空間での実際の通信速度も考慮にいれ、5sch とした。

4.3 ローバー通信距離と通信不能ローバー数



上グラフを見ると、10km では通信を確立するのがかなり難しい。また 100km ではローバー間のリンクが冗長になりすぎるので、50km と 75km が現実的である。

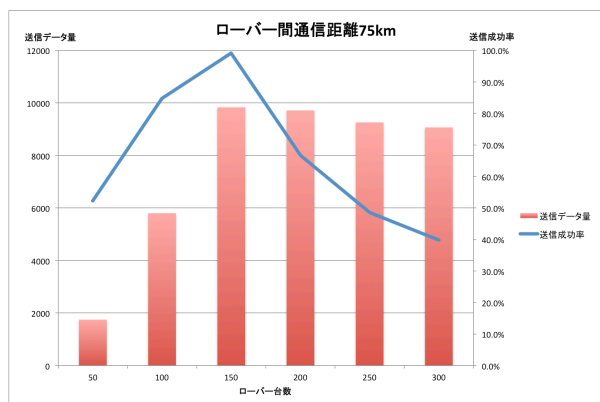
4.4 ローバー通信チャンネル数と送信データ量、成功率、完了時間

上グラフを見ると、10km では通信を確立するのがかなり難しい。また 100km ではローバー間のリンクが冗長になりすぎるので、50km と 75km が現実的である。

4.5 ローバー台数と送信データ量, 送信成功率

ローバーの台数によってどのように送信結果が異なるのかを調べる。

ローバー間の通信距離が 50km の場合, データ量, 成功率を見ると 150~200 台ほどが良さそうである。



ローバー間の通信距離を 75km にしてみると, 明らかに 150 台のときにピークが来ている。

よってこの程度の通信距離であれば, 150 台ほどの構成が検討に値するといえる。しかしこれは小型とはいえ非常に多数であるので, より効率の良い方法がないかをさぐる。

4.6 ローバーの配置による差異

ローバーをランダムではなく一定のパターンで配置したほうが効率が良いはずである。ここでは格子状と同心円状の 2 種類の配置を検討した。

格子状の場合, 通信が終了しないローバーが半分ほど出てしまう。効率としてはあまり改善されていない。

一方で同心円状に配置すると, 非常に効率よく通信を行い, 全てのデータを送信することができた。

通信距離 75kmのローバーを同心円状に配置した場合, 必要なローバー数は 60 台となり, 先程の 150 台よりもだいぶ削減することができた。

最後にこの数字の妥当性を検討する。

5. シミュレーションの評価

5.1 提案する構成

- 目的 … 未知の惑星の探査
- ミッション期間 … 90Sol
- ローバー … 30cm×40cm×60cm で 10kg
- ランダー-ローバー間通信距離… 150km
- ローバー間通信距離… 50km または 75km
- ランダー台数 … 1 台
- ローバー配置 … 同心円状
- ランダー通信チャンネル数 … 5ch
- ローバー通信チャンネル数 … 1ch

これと比較するのは, MSL (マーズサイエンスラボラトリー) である。

- 目的 … 火星探査
- ミッション期間 … 1 火星年=2.2 地球年
- ローバー… 220cm×240cm×270cm 900kg
- 移動速度 … 30m/h 以下
- 予定移動距離 … 5~12km
- 打ち上げロケット … アトラス V541

- 総費用 … 23 億ドル以上

5.2 技術的実現可能性

打ち上げの重量的には, 60 台の小型ローバーの重量は MSL の重量よりも軽いので問題ない。問題となるのは小型のローバーで 75km の通信距離を確保できるかという点になるが, 火星上でも 20W 程度の発電量は確保できるため, 10W の出力で通信を行うとして計算を行った結果, 75km の通信距離を確保することは可能である。

5.3 効率

現在の惑星ローバーの移動力は非常に低く, MSL が 12km ほど移動したとしても, カメラでの撮影に関して言えば, あきらかに 60 機で行ったほうが効率が良いと言える。

5.4 費用

特にローバー部分の費用について考えた場合, ローバーの 1 台目の開発費用がソジャーナと同程度の 2500 万ドルとして, 複数生産によるコストの減少を経験曲線モデルに従うとすると, 60 機で 8.14 億ドルとなる。これは MSL のローバーの開発費 16 億ドルの半分程度であり, 十分にコストが削減できているといえる。

6. 結論と議題

6.1 結論

前述のような構成で惑星探査を行うことは, 現在 NASA が行っているような, 大型, 単独ローバーによる探査よりも, 十分に効率, 費用の面で有利であると言える。

そもそもマーズパスファインダー以降, NASA は小型のローバーを複数火星に送り込むことを計画しており, 従来からその提案はあったものと思われる。その後その計画自体は実行されず, 大型ローバーに移行してしまった。

その理由は定かではないが, 今回非常に簡単なシミュレーションではあったものの, 群ローバーによるミッションの可能性を示すことができたので, 今後にミッションにおいては, 検討に値すると思われる。

6.2 議題

一方で, 大型のローバーによるミッションが不要になるわけではないとも考えている。大型のローバーは搭載できる実験機器の量において小型ローバーを圧倒しており, より詳細なデータが必要な場合には必要になってくる。

そのため, 惑星の探査の初期の段階では群ローバーを用い, その後ある程度探査の対象を絞り込んだ上で大型のローバーを送り込むという複数ミッションの組み合わせによる探査が非常に効果的であるかもしれない。

今後は, そのような単一ミッションに限らない複数のミッションの組み合わせや, ローバー自体の移動や, もっと詳細な活動を取り入れたシミュレーションなどを行い, その有用性を示していくことが出来ればよいと思う。

参考文献

- [狼 2002 年] 狼嘉彰: 宇宙ステーション入門, 東京大学出版会, 2002 年。
- [荒堀 2010 年] 荒堀真生子: 低軌道衛星群を活用した市民参加型インフラストラクチャの構築に関する研究, 修士論文, 東京大学, 2010 年。