―小型月面ローバ：Micro5 及び遠隔操縦アルゴリズムに関する研究―
超音波振動を利用した惑星探査用小型軽量マニピュレータの開発

研究代表者　研　究　員　**國井　康晴**（中央大学理工学部電気電子情報通信工学科）
共同研究者　準 研 究 員　**多田　興平**（中央大学大学院理工学研究科博士後期課程）
共同研究者　共同研究員　**黒田　洋司**（明治大学理工学部機械工学科）
共同研究者　共同研究員　**久保田　孝**（文部科学省宇宙科学研究所）

Abstract

In this paper, we discussed about a manipulator for a planetary rover system, and introduced our newly developed micromanipulator. It has 5 degrees of freedoms, and each joint is driven by an Ultra-Sonic Motor (USM) which needs no electrical power to keep a posture of a manipulator. In general, a manipulator spends almost of a working time to maintain to its posture, and it also spends electrical waste power during this term. We strongly believe that the best solution of this problem is to apply USM to an actuator of a joint to solve this problem.

1　はじめに

現在，無人移動探査機を用いた様々な科学観測ミッションが月や火星を対象として検討され，実行されている [1][2][3]。特に，惑星表面上を直接探査する惑星探査ローバは，将来の表面探査ミッションにおいて中心的な役割を担い，多くの地質学者や工学者によって注目されている。1997 年 7 月の Pathfinder 計画，探査ローバ：Sojourner の成功は，記憶に新しい。

我国では，近年，月に関する科学探査ミッションが複数提案され，実際に，LUNAR-A 計画，SELENE 計画などが検討されている。SELENE 計画では，検討されていた周回衛星とランダ (着陸機) を用いたミッションから着陸探査が分割され，着陸技術試験と表面科学探査をミッション目的とした SELENE-B 計画として検討が始まっている。SELENE-B では，月面の地質探査が行われ，詳細な観測データが取得されることが期待され，月の起源や進化に関する知見が得られる。惑星上の地質調査を行う際に，ランダのみを用いた場合，探査範囲は，ランダ周辺のみに限定され，月面上の特定の点のみの観測に留まる。一方，広い地域からの観測データを収集するためには，表面移動機構を備えたローバの使用が要求される。ローバによる観測では，観測範囲を点から平面へと拡張することが可能であり，より普遍的なデータの取得が可能となる。ここで，ローバによるミッション目的は，科学観測であるため，ローバには多数の科学観測機器と，観測支援システムが搭載されることになる。このためローバは工学的な移動システムではなく，それ自身が科学観測機であると定義でき，ローバの設計は科学観測機器とその他のシステムとのバランスが鍵となる。しかし，搭載される科学観測は，ミッション内容によって決定されるため，現段階で見積もることは困難である。一方，マニピュレータは，最も搭載の可能性が高い装置であり，惑星表面においてサンプルの採取や，観測機器を扱うためには必要不可欠なシステムである。また，ローバは，走行中の MAP データ作成のため出来るだけ高所からの観測データを取得することが有利となる。このためのカメラ台としてマニピュレータは重要な役割を果たす。

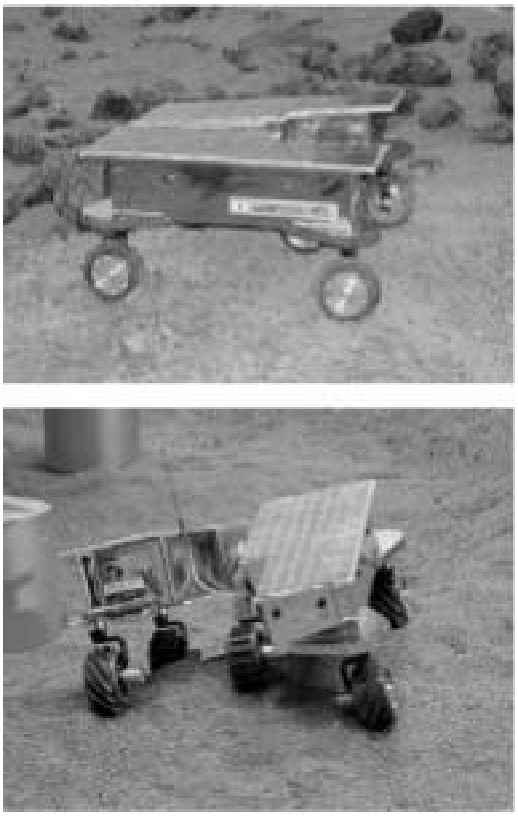


Fig.1　Lunar Rover: Micro5-01

本報告において，我々は，マイクロローバシステム：

Micro-5 を紹介し，Micro-5 搭載用小型軽量マニピュレータの設計に関して報告する。まず，科学探査中に要求されるマニピュレータの機能を検討し，自由度を 5 自由度に設定した。また，動作中の各関節の駆動率より，各関節におけるエネルギー効率を考察した結果，アクチュエータとして超音波モータ (USM: Ultra-Sonic Motor) を採用した。これにより，電力を使うことなくマニピュレータの姿勢の維持が可能になり，少ないエネルギーでシステムの運用が可能になる。そして，太陽パネルによる発電を妨げないように Micro-5 本体後部に搭載され，中間部に収納される。

2　月面探査マイクロローバ：Micro-5

開発した月面探査用ローバ：Micro-5 を Fig.1 に示す [4]。Micro-5 は，小型軽量，低消費電力かつ高い走破性の実現を目指し，開発されている。走破性能を確保するためサスペンションシステムに，PEGASUS(PEntad Grade Assist SUSpension) を採用した。PEGASUS は，独立駆動可能な 5 つの車輪によって構成され，5 つ目の車輪が，本体，左右パーツの接合リンク部に配置される。これにより，Sojourner などの Rocker-bogie と同等以上の走破性を有する。また，Micro5 は，車輪左右の車輪の差動ステアリング方式によって移動方向を制御している [5]。現在，走行系の駆動用アクチュエータとして，DC モータ，DC ブラシレスモータ，超音波モータを採用した 3 種類の機体が開発され，走行実験，観測作業実験及び検証を行っている。走行速度は，約 1.5[cm/s]，乗り越え可能な段差は，車輪径 (10[cm]) の 1.5 倍，登坂可能斜度は，30[deg] 以上である。機体上面には，それぞれ 36 セルから構成される 2 枚のソーラパネルを有し，最大，約 36[w] の電力供給が可能である。機体側面には，それぞれ 1 対のステレオ CMOS カメラを搭載し，360° の周辺環境観測が可能である。これらのカメラを用いて，ナビゲーション用の DEM の作成や科学観測用の地形計測データの取得が可能となる。また，姿勢計測用のピッチ，ロール角計測用傾斜計，デッドレコニング用のエンコーダが搭載されている。これらセンサデータは，搭載された RISC 型 CPU を用いて処理され自律走行や遠隔制御等に用いられる。

3　搭載用マニピュレータの設計

3.1　ローバシステムにおけるマニピュレータ

ミッションにおいて，必要とされる観測機器を見積もるためには，探査目的や手法，その他，重量や電力などの物理的な制限などを多面的に検討する必要がある。しかし，ミッションへの強い依存性から，搭載機器を事前に見積も

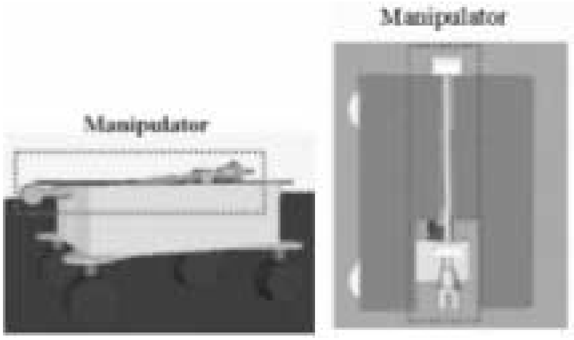


Fig.2　Location of Manipulator on Micro5

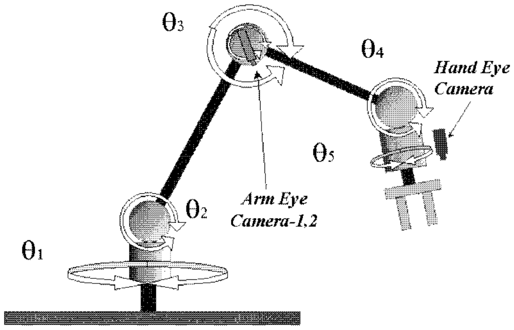


Fig.3　Structure of Micro Manipulator

ることは難しい。一方，表面探査は表面物質との接触，観測が主目的となるため，マニピュレータを搭載する可能性が極めて高い。このため，汎用的なマニピュレータに関して議論することは，科学観測活動を支援する面からも非常に意義がある。実際の科学観測では，マニピュレータは，岩，砂などの試料採取や分光カメラなどの観測機器を試料へ接近させることが要求される。また，3 次元計測やナビゲーションにおける潜望鏡（観測塔）として機能する。更に，ローバに搭載される様々なセンサとの組み合わせによる様々な役割が期待されている。

3.2　マニピュレータの機能と要求

ローバミッションにおいてマニピュレータに要求される機能を以下にまとめる。

—ローバから離れた地域をカメラ等によって観測（観測塔）
—ローバ自身を含む周辺環境の観測
—科学観測のためのサンプル採取
—分光カメラなど，観測機器の土壌，岩石などへの接近および接触
—土壌の掘削，サンプルの破砕
—サンプル表面からのレゴリス，ダストの除去
—ソーラパネルなどからのレゴリス，ダストの除去
—地形，観測対象の 3 次元計測　など

一方，宇宙空間や惑星表面上では，一般に，打上げ重量

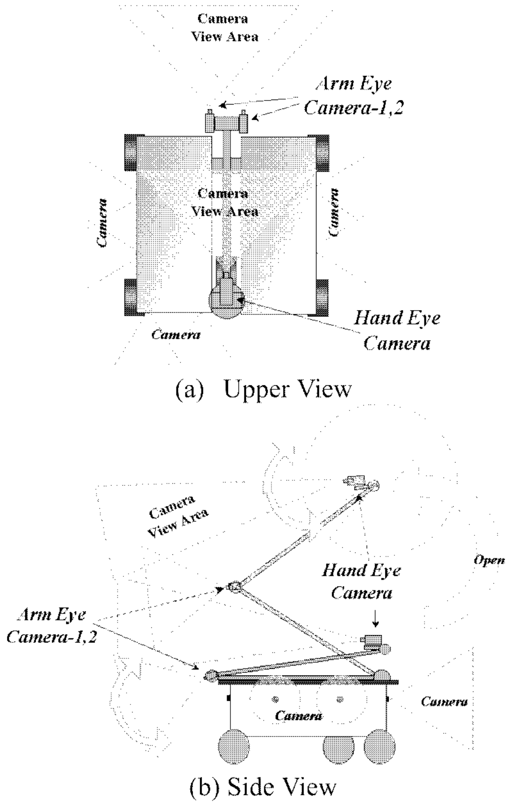


Fig.4　Visual Sensing System on Micro5

と電力供給が制限されるため，ローバのシステム全体として小型軽量化と省電力化が重要な課題となる。これは，マニピュレータにおいても例外ではない。以上を検討し，マニピュレータへの設計要求を簡単にまとめる。

—小型軽量化

—省電力化

—大きな作業空間の確保，及び，長いリンク長の確保

—目的作業実現のために十分な自由度を確保する

—エンドエフェクタの装備

3.3　ローバ搭載用マニピュレータの設計

前述の要求事項を考慮し，Fig.1 に示す月面探査小型ローバ:Micro5 搭載用小型軽量マニピュレータを設計する。ここで，Micro5 に搭載するマニピュレータの配置方法は，様々なパターンが検討可能である。しかし，走行時の重量バランス，ソーラパネル発電量への影響を最小限にするため，搭載場所を本体後方，収納時に本体左右パーツの中間に収まるように配置する (Fig.2)。また，開発するマニピュレータは，サンプル採取と表土への観測機器の挿入及び接近作業を想定し，自由度を 5 自由度とした。Fig.3 にマニピュレータの構造図を示す。ここで，将来的には，先端の姿勢を確保するために 6 自由度への拡張や，第 1 関節 (θ_1) を本体の方向制御と共有することによる 4 自由度による構成も可能であり，今後のミッション内容によって検討する。

3.4　Micro5 の視覚システムとマニピュレータ

マニピュレータには，カメラが搭載され，ローバの視覚センサシステムの一部として重要な役割を持つ。Micro5 は，周辺環境認識のために機体の各面に対して 4 組のステレオカメラを搭載している (Fig.4(a))。マニピュレータは，Micro5 の視覚センサシステムにおけるマストもしくは，アクティブカメラシステムとして機能する (Fig.4(b))。2 つの小型カメラが第 3 関節 (肘部) に搭載され，先端部に単眼カメラを搭載する予定である (Fig.3).。

先端に搭載されるハンドアイカメラは，サンプルへの接近，把持の際に用いられ，かつ，ローバから離れた場所の情報を取得するために用いられる。一方，肘関節に配置されるステレオカメラは，関節とは独立して上下する事により作業対象を別角度から観察したり，走行中の前方画像の取得に用いることが可能である。これらのカメラと本体側側面のカメラを用いることで，月面上の様々なミッションに対応していく予定である。特に，環境計測，環境地図作成は，科学観測に対して有効なデータを提供するばかりではなく，自律ナビゲーション，Tele-Driving に対して有効なデータを提供する。

4　関節の駆動率とアクチュエータ

4.1　関節駆動率

マニピュレータを用いたサンプル採取を対象としたに単な作業シミュレーション結果を示す (Fig.5)。カメラ画像を見ながらサンプル (Target) を把持し，試料ケース (Goal) に入れる作業を想定している (Fig.5(b) ～ (d))。作業は，オペレータによりジョイスティックを用いた直接操縦によって行われ，時間遅れは考慮していない。オペレータの操縦方法として，ここでは最適性の議論はせず，Fig.6 に示す直交座標型 (mode 1) と極座標型 (mode 2) の 2 つの方式を採用する。

採取作業シミュレーションの結果として，作業中の各関節の移動量を Fig.7 に示す。(a) が直交座標作業空間，(b) が極座標作業空間における作業結果である。各グラフ共に作業中に平らな部分が見られるが，これは作業中に関節が停止していることを示す。ここで，Fig.8 に作業中の関節トルクの変移を示す。関節トルクは，作業中を通してトルクが発生していることが確認でき，停止中も電力及び制御が行われていることが確認できる。Fig.9 に作業時間に占める駆動時間の割合を示す。どちらの作業空間においても，各関節が総作業時間の約半分以上，停止していることが分かる。

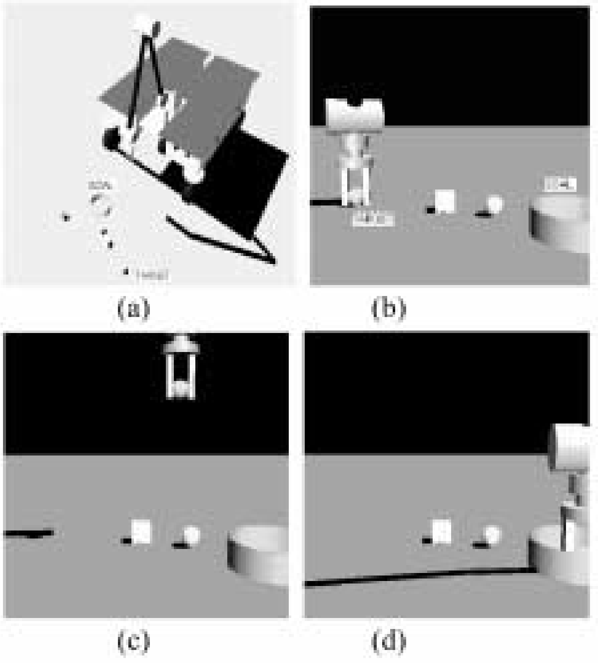


Fig.5　Tele-Sampling Simulation

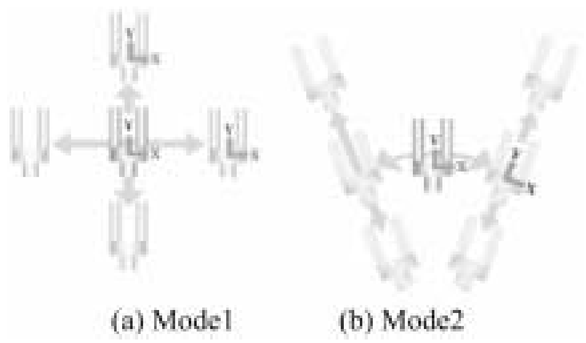


Fig.6　Operation Method

以上より，一般に，マニピュレータは，作業時間の殆どの時間を，その姿勢を維持することに費やしている。特に月面上で作業するマニピュレータにおいては，地上における作業計画検討時間や通信時間遅れなどのため，より多くのコマンド待ち時間を有するため，本結果よりも多くの停止時間が存在すると予想される。しかし，その間も各関節における制御は継続しており，電力と CPU パワーが消費され続ける。限られたリソースで作業を続ける宇宙機にとって，ここれは大きな損失であり，リソースの有効利用の観点からも対策が必要である。

4.2　超音波モータ

前述の問題点に対する解決策の一つとして，何らかのクラッチ機構の導入が考えられる。しかし，これは各関節ユニットの複雑さと重量の増加を招く。また，減速比の大きなギアを用いた場合は，目的の姿勢を保持することは保証されない。

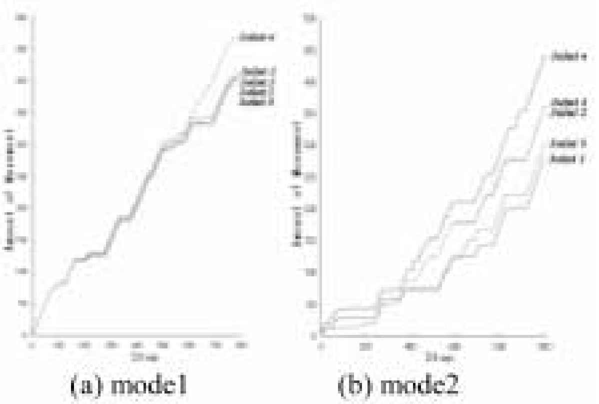


Fig.7　Joint Movement

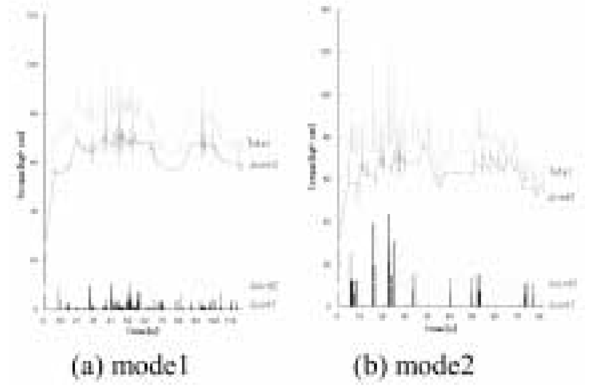


Fig.8　Joint Torques (Joint 1-3)

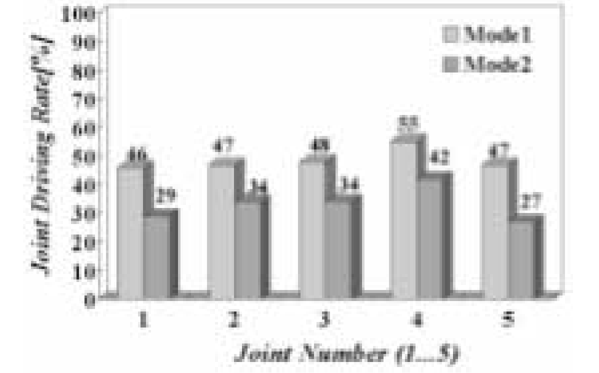
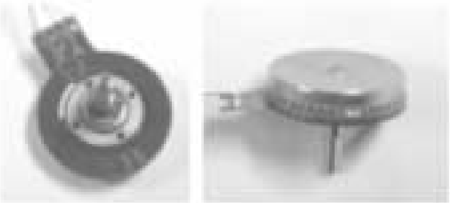


Fig.9　Driving Rate of Actuators

これに対し，我々は超音波モータ (UltraSonic Motor: USM) の導入を検討した。USM は，通常の電磁力を用いたアクチュエータと違い，ステータ上に配置された圧電素子によって起因される振動波を駆動源とする。振動波は，定在波と進行波から構成され，進行波はステータとロータの接触に楕円運動を生じさせる。このとき，圧着されているステータ・ロータ間に生じる摩擦と，楕円運動の作用によって，ロータは送り出され，回転運動が生じるため，モータ部は小型軽量で，かつ，高い静止トルク (摩擦) を有する。このためクラッチ機構と同等の特性を有することになる。また，モータ部が軽量であることは，マニピュレータ


(a) Appearance

Rated Speed	250[rpm]	Max. Torque	1[Kgf-cm]
Rated Torque	0.5[Kgf-cm]	Hold Torque	1[Kgf-cm]
Rated Power	1.3[w]	Weight	20[g]

(b) Specification

Fig.10　Ultra Sonic Motor -USM

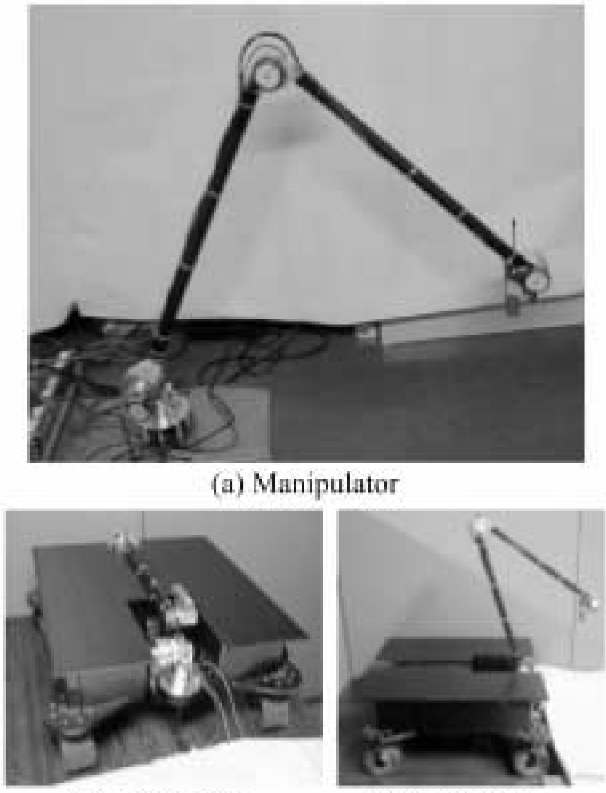

(a) Manipulator
(b) Rear View　(c) Side View

Fig.11　Manipulator mounted on Micro-5

の様なリンク機構では可搬重量的に有利になる。ゆえに，停止状態が，無制御で維持でき，その間の電力及び CPU パワーの浪費が回避可能である。採用した USM とその性能表を Fig.10 に示す。

5　小型軽量マニピュレータの開発

開発した小型軽量マニピュレータを Fig.11 に示す。マニピュレータの詳細な仕様を Table.1 に示す。各関節は，超音波モータとハーモニックギアが使用されており，また，各リンクは CFRP パイプによって構成されている。マニ

Total Length	920[mm]
Total Weight	1.45[Kg]
Conveyable weight	300[g](on the earth)
Actuator	Ultra-Sonic Motor
Reduser	Harmonic Gear

Table.1　Specification of Micro Manipulator

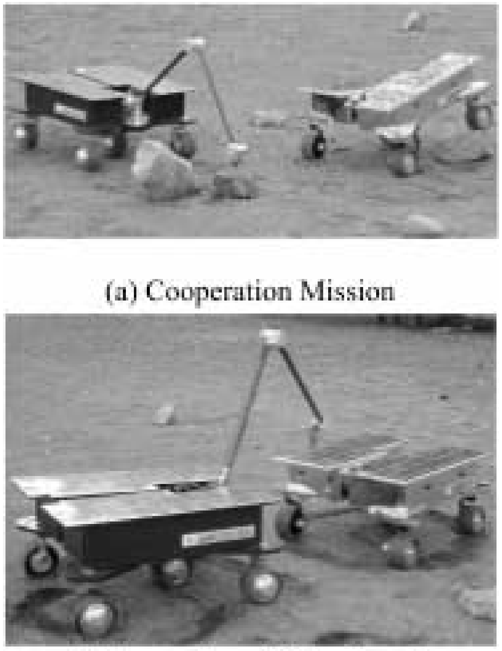

(a) Cooperation Mission
(b) Inspection of Solar Panels

Fig.12　Micro5-01(right) & Micro5-02(left)

ピュレータの展開と収納は，自動的に行われる。Fig.11(b), (C) に展開時と収納時のマニピュレータの様子を示す。

マニピュレータが本体に収納されているとき，ハンドアイカメラはローバ前方を向き，走行中の画像が取得可能である。一方，マニピュレータの作業空間は，主にローバの進行方向とは反対，後方になるが前方側での作業も可能である。また，ソーラパネルも作業空間に含まれるため，将来的にはマニピュレータを用いて塵の除去なども検討可能である。

Fig.12 に，走行試験用のテスト機である 1 号機と，マニピュレータを搭載した 2 号機を示す。ここでは，1 号機と 2 号機による協調ミッションを想定している。Fig.12(a) では，2 号機から目視不能なターゲットに対して，1 号機からの視覚情報に基づきマニピュレータを接近させている。また，Fig.12(b) では，1 号機のソーラパネルの様子を 2 号機によって確認している様子である。

6　まとめ

SELENE-B におけるローバのミッション目的は，科学

探査である。よって，ローバには，様々な科学観測機器が搭載され，搭載機器とその他のシステムとの重量，電力バランスが非常に重要な課題となる。しかし，搭載機器は，ミッション内容に大きく左右されるため，現時点で，それらバランスを考慮することは難しい。一方，マニピュレータは，観測機器と本体システムの中間に位置し，表面探査においては，搭載の可能性が高い汎用システムの一つである。

本論文では，科学探査ミッションにおけるマニピュレータへの要求機能に関して議論し，開発したローバシステム: Micro5 を対象に小型軽量マニピュレータの設計に関して議論した。また，サンプル採取作業における各関節の駆動率を検討し，作業時間の半分以上において，アクチュエータが停止していることを示した。この停止時間中に浪費される電力と CPU パワーの損失に着目し，超音波モータの使用を提案した。超音波モータは，高い静止トルクを有するため，各関節停止時に無電力で姿勢を維持可能となる。よって，電力と CPU パワーの浪費を回避することが可能となる。

検討結果に基づいて，小型軽量マニピュレータを開発し，探査ローバ：Micro5 に搭載して動作の確認を行ない，その結果を紹介した。

今後の課題として，

- 関節ユニットの軽量化
- 可搬重量の増加
- エネルギー効率の確認
- ローバ本体とマニピュレータを組み合わせた全体的な設計と最適化
- ミッション目的に対応したエンドエフェクタの開発
- 使用技術の宇宙仕様化に向けた検討

などが挙げられる。

参 考 文 献

[1] J. L. Loch, D. Desai: "Moose on the Loose: Toward Extended Mission Autonomy for Robotic Exploration of Planetary Surface", Proc. of ICAR'93, pp.97–101, 1993.

[2] G. Giralt: "Remote Intervention Robot Autonomy and Real World Application Cases", Proc. of IEEE Int. Conf. on R&A, pp.541–547, 1993.

[3] R. Chatila, R.Alami, et al.: "Planet Exploration by Robots: From Mission Planning to Autonomous Navigation", Proc. of ICAR'93, pp.91–96, 1993.

[4] T. Kubota, Y. Kuroda, Y. Kunii, I. Nakatani; "Micro Planetary Rover "MICRO5"", Proc. of 5th Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, pp.373–378, 1999.

[5] Y. Kuroda, K. Kondo, K. Nakamura, Y. Kunii, T. Kubota: "Low Power Mobility System for Micro Planetary Rover "Micro5"", Proc. of 5th Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, pp.77–82, 1999.