

特集 「宇宙開発事業団の月探査研究」

月面ローバシステム・ロボティクス技術

若林靖史¹

1. はじめに

月表面を自由に移動し、科学的探査を行う月面移動探査機(ローバ)は、やがて資源の採取や月面基地等の建設へと繋がる21世紀の技術テーマであり、従来のような着陸点の観測だけでなく、範囲を拡大しての観測の必要性において、移動探査・作業ロボット、すなわちローバの重要性が注目される。このような月探査ミッションにおいては、周回機、着陸機、移動探査機の順に次第に詳細な探査が展開すると思われる。本章では、月面ローバの技術動向を概観し、宇宙開発事業団(NASDA)における月面ローバ研究について紹介する。

2. ローバ研究開発

2.1 ローバの要求・課題

深宇宙機としての重量・寸法・電力等の制約と天体表面の温度・宇宙線・真空、レゴリス等の厳しい環境条件下で、未知環境に挑むロバの性能を備えた安価なシステムであることが基本的な設計要求となる。

宇宙環境利用・開発としては、将来の月面基地や月面天文台の建設・資源利用などを目的として、月面活動における放射線・太陽風・隕石などの観測・地質や地盤調査・資源探査などが挙げられる。一方、科学観測としては、太陽系の起源と進化の解明を大

目的に、有機物や水探査・気象や気候など環境調査・土壌や岩石などの地質や地形調査・内部構造解明の探査などが中心的課題となる。

2.2 国内外の研究状況 [1] [2] [3]

世界的にも月・惑星の探査は、次世紀の宇宙開発の中心的な課題の一つであり、欧米諸国で各種の研究が進められているが、ミッションとなっている惑星ローバとしては、米国のパスファインダ計画がある。NASA/JPLが開発したローバが、1996年12月に火星に向けて打ち上げられ、7カ月のフライトの後に火星表面に到達する予定となっている。

一方、日本では、数年前より宇宙開発事業団および宇宙科学研究所(ISAS)で独立に概念研究が行われている。その他、大学や企業の研究所において試作研究等が活発になってきている。

NASDAのローバは、月面における資源探査等の開発利用を目的としており、遠隔操縦による長距離の移動探査を想定している。また、ISASでは月ローバも検討されたが、現在では主に火星ローバの研究を進めている。

2.3 宇宙開発事業団におけるローバ研究

宇宙開発事業団では、月の開発利用のための探査を目的とする月面移動探査機(ローバ)の研究開発に平成5年度から着手している。蓄積の少ない新規システムであるため、関連する新規技術の修得を図りつつ、創造的な技術方式の可能性を探るにあたり、

¹宇宙開発事業団・技術研究本部

月面ローバシステム概念の確立、及びロボティクス等の主要技術を目処づける研究を実施している。

月面ローバシステムについては、これまでにH-II型ロケットでの打上げを想定した全重量500[kg]のシステム概念が検討されており、探査ミッション、運用概念、そして熱制御系等の要素技術試験を含むシステム成立性を確認する解析・試験研究を実施している。

一方、月面ローバロボティクス技術については、走破技術 (Mobility)・操縦技術(Navigation)作業ロボット技術等の解析・試験研究を実施しており、以下ではこれらの研究の一部を紹介する。

3.1 月面ローバシステムの研究 [4][5]

3.1.1 ミッションの検討

(1) 月面探査ミッション要求

月面探査ミッションとしては、以下に示すような、将来の月資源利用、月面活動のための事前調査を目的とした月開発利用ミッションを想定した資源探査、環境観測、地形観測、地盤調査、月資源利用実験が挙げられる。月面活動の拠点となる月面基地、月面天文台を将来構築するための基礎データ収集も必要となる。また、月の開発利用ミッションと並行して、月

の科学探査が実施される可能性が高いと考えられる。

1. 広範囲、多様地形の探査(距離として数百km～千kmの移動)
2. 地下探査(深さとして数十cm～数mの探査)
3. 長期間の探査(～1年)
4. サンプル採集・分析
5. 観測・技術実験機器の設置

ローバの初期探査ミッションとしては、月開発利用、月科学に係る未知のデータをできるだけ収集することが重要であり、探査域が未知の環境であるから、確実に実施できる範囲でのミッションを先行させて確実な成果を得ることが必要となる。従って、月面作業の有効性、ローバの耐夜間耐性、ローバの移動操縦の安全性等の未知要素が含まれるミッションは、システム・クリティカル・パスとして順を追って実施することを考えている。

(2) ミッションシナリオ

(a) ミッションシナリオ候補案1(図1)

着陸地点での月面活動・月面基地と月面天文台

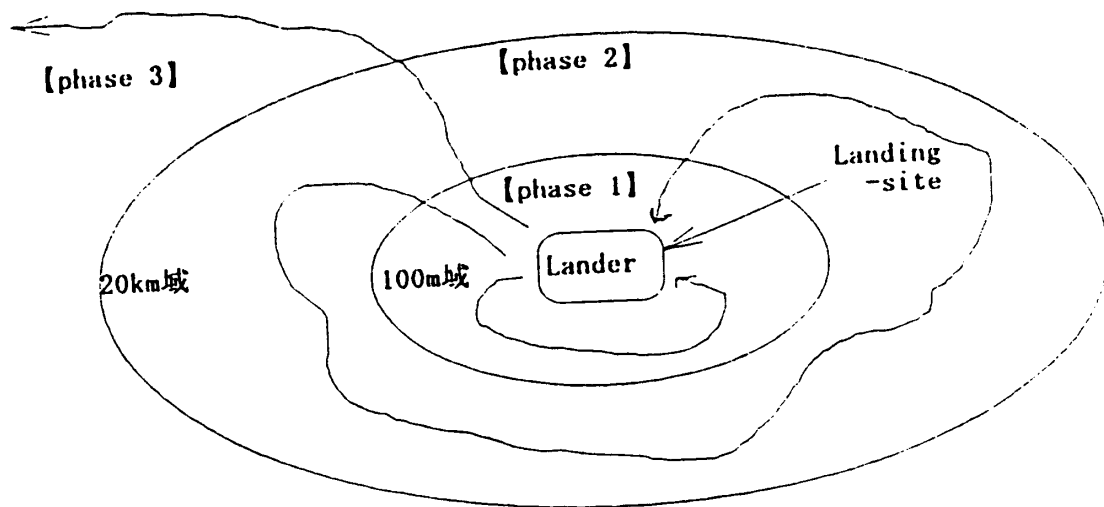


図1. ミッションシナリオ候補案1

の建設に係る基礎データの取得、及びローバによる作業技術と移動探査技術の確立をミッションとするものである。探査システムの構成としては、「着陸機(ランダ)+耐夜間ローバ」を想定する。ミッション初期は着陸点近傍での基礎実験として、定点観測、周回衛星との通信実験、至近域での資源、地盤調査、試料採取等を実施する。ミッション中期は定点観測を継続しつつ、月資源利用実験や、近傍域の探査等を実施する。後期は、定点観測を継続しつつ、探査域を拡大し遠域探査を行う。

(b)ミッションシナリオ候補案2(図2)

領域探査と月利用探査を重点としたミッションを行う。観測・分析機能と夜間耐性を備えたローバ1台による探査を想定する。ミッション初期には数カ所の探査地点での領域探査を行い、後期には月面基地/月面天文台建設の基礎実験を行う。

3.1.2 運用概念の検討

ローバの構成方式としては、単独型、協調型(同サイズの2台あるいは3台)、群ロボット型(複数の

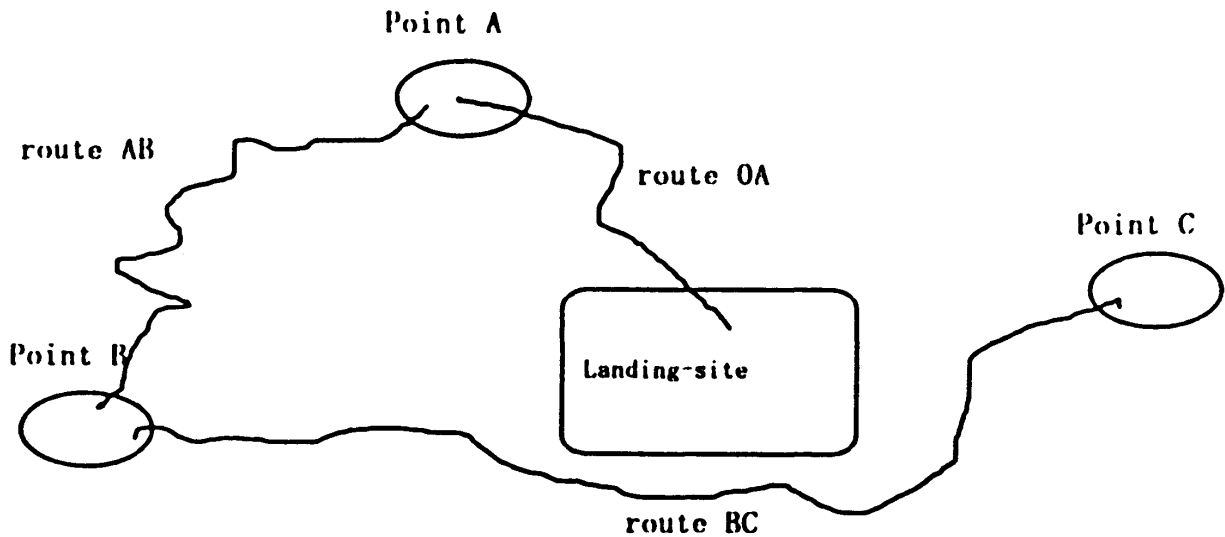


図2. ミッションシナリオ候補案2

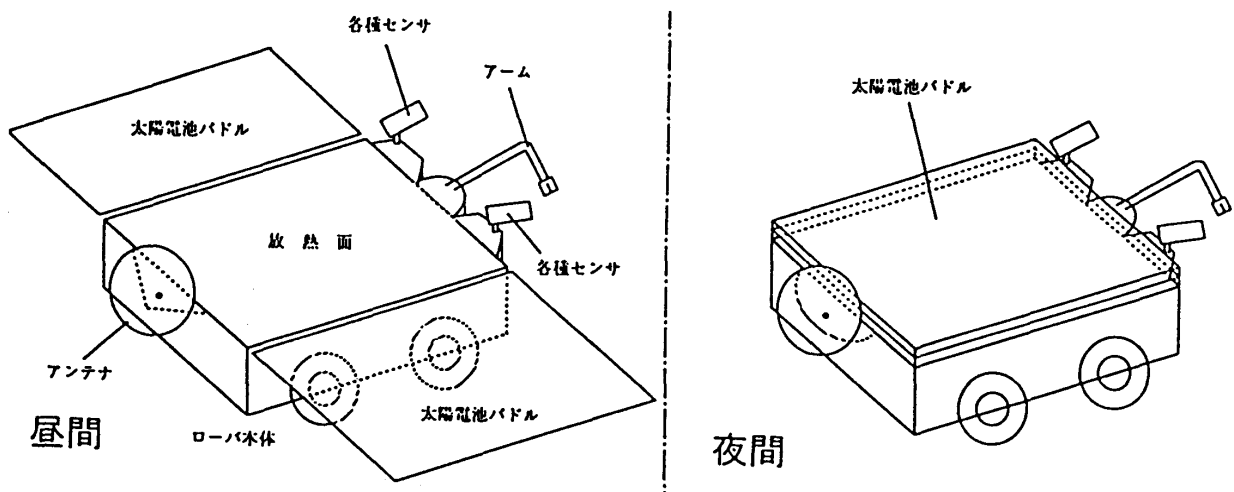


図3. ローバシステム概念(単独型)

小型ローバ)などが挙げられる。単独型ローバでは探査能力を高めるために、探査ロボットや小型ローバと組み合わせたり、作業機と移動／観測機構(台車)を分離させることが考えられる。ローバを用いた月面探査システムはこのような様々な構成様式より、ミッションに適したものを選択することが必要と考えられる。着陸点周辺の探査ではランダと組み合わせた探査を行うことも考えられる。一例として単独型ローバシステム概念を図3に示す。

ローバシステムに影響を与える月面環境としては、温度環境の他、真空、放射線、レゴリス(ダスト)飛散、デブリ等が挙げられる。レゴリスは、月面を覆う粒径 $10\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ の砂の層であり、レゴリス飛散の影響については、アポロ、サーベイヤのミッションレポートで報告されている。その凝集力により堆積すると除去が困難である。また、熱伝導率が低く、高輻射率であるため、このような特質を有するレゴリスがローバの表面に堆積した場合、表面の光学特性、断熱特性が変化する。

結果として、昼間の運用においては、レゴリスの堆積によりラジエータ面温度が上がり、放熱能

力が低下する。また太陽電池パネルについては、セルへの光透過率が低くなるため、電力供給能力が低下する。ラジエータ、太陽電池パネル性能変化は、ローバの重量バジェットに影響を大きく与えることから、レゴリスをふき取るあるいは払う方策が必要となる。尚、夜間の運用においては、レゴリスの堆積により断熱効果が増すことから影響はないと考える。

なお、本概念の検討においては、ローバの運用は国内の1局からの直接運用を基本とした。昼間の運用は、走行のみ、走行と探査、探査のみの3種を想定した。昼間の運用の時間的制約は車体温度の回復、太陽光条件で決定される。また、月の夜明け時は、ホライズングローと呼ばれるレゴリスの巻上がりが発生するため運用の制約を受ける。夜間の運用はバス保持、夜間探査の2種を想定した。

3.1.3 要素技術の検討・試験研究—熱制御系

月面は、 130°C (昼間)から -170°C (夜間)と厳しい温度環境であり、ローバの熱制御は、重要な技術要素の一つとなる。ローバの熱制御系については、

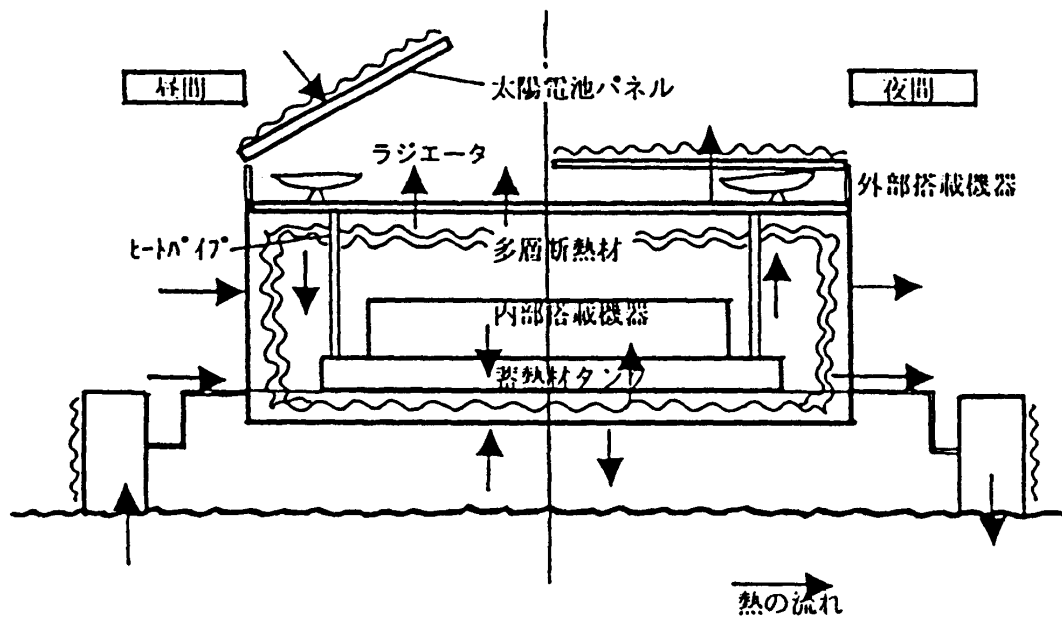


図4. 月面ローバ熱制御系概念

昼夜の熱バランスが取れる熱制御系構成について検討を行い、蓄熱材を利用した夜間保温システムの利用可能性を確認している。図4に本解析に使用した全体重量 500 kg の月面ローバの熱制御系構成を示す。また、本研究では、車輪駆動用モータの走行時の過熱防止策として蓄熱材を利用した熱制御方式について検討し、要素試験を実施している。

3.2 月面ローバロボティクスの研究[6][7][8]

ローバは、宇宙セグメント・地上セグメントか

らなるテレオペレーション型宇宙ロボットであり、特に、下記の4つロボット機能要素が必要となると考えられる。

1. 走破(Mobility)機能：地形を走行・踏破する機構システム
2. 操縦(Driving)機能：障害物回避経路の計画と危険回避を含む走行制御
3. 経路計画・同定(Path-Planning & Path-ID)機能：大局的走行経路の計画とローバ位置方向の同定

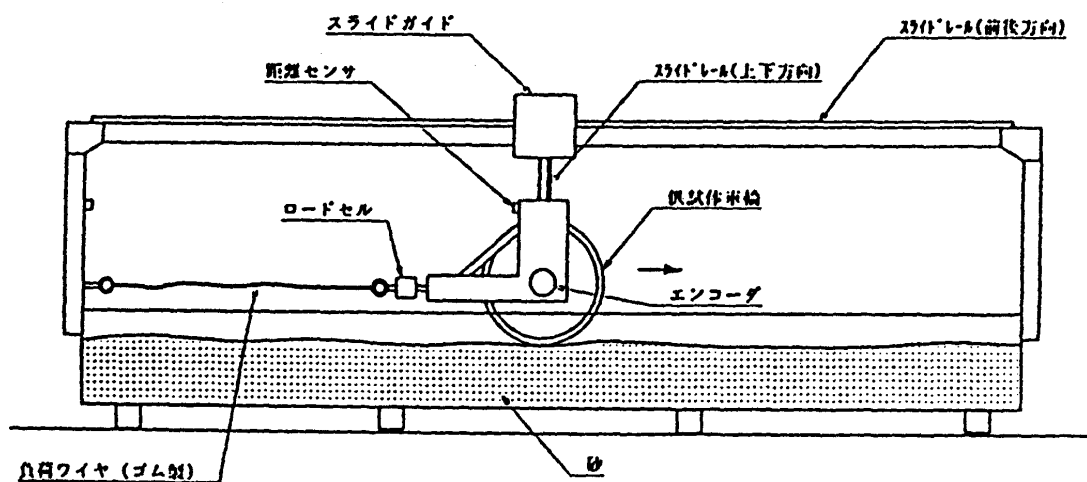
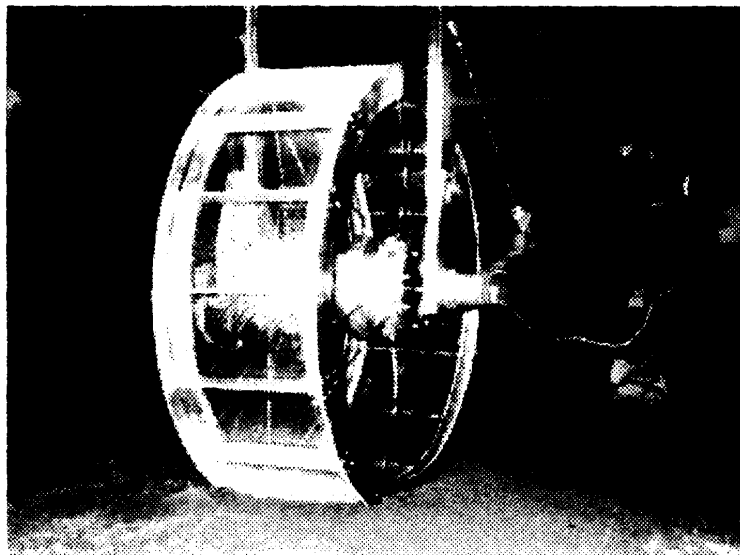


図5. レゴリス走行模擬試験概要

4. ミッション支援(Mission support)機能：試料の観察・採取・分析、掘削・設置等

本研究では、低速での走破性能の確保と高速移動性の確保について試験研究を実施しており、その一部を以下に紹介する。

3.2.1 走破技術(Mobility)の試験研究

車両は、地表の浮力(Flotation)によって支持されつつ、接地面での相互作用により推進力(traction)・駆動力を得て走行する。土壌は、走行地耐力(trafficability)で示される走行させる強さを持つ。車輪はスリップ率で示される接触状態での相互作用を通して土壌に歪みを与え、歪みはタイヤの縦力となる剪断応力を生むことで、走行抵抗に打ち勝って車両を推進させる。本試験研究では、ローバの走破技術の一環として、既知データに基づき、月面土壌と車輪の相互作用の解析を行い、Mobility設計のための基礎的データベースを作成している。走行地耐力を推定するために、車両にか

かる荷重・抵抗、出し得る推進力、滑り及び沈下などと地勢条件との関係を求めるものである。

また、ローバの固有技術要素である車輪・モータ等を含む駆動系については、図5に示すワイヤメッシュ製試作車輪を使用して、形状や土壌パラメータを含めたレゴリス走行模擬実験を実施している。この走行特性データの取得により解析データとの比較検討を行っている。

3.2.2 操縦技術(Navigation)の試験研究

ローバの操縦技術に関しては、図6に示す研究モデルを使用し、マニュアル操縦・予測操縦に係る基礎実験を行い、モニタ画面・操縦モード・通信遅延時間等の各種支援情報等の操縦に影響する基本要素の特性を把握している。また、位置予測支援(画像オーバーレイ支援プログラム)の有無による遠隔操縦性についての評価も行っている(図7)。

前述した通り、ローバは一種の遠隔操作ロボットであり、その制御構造には種々の構成・要素分割が考えられるが、本研究で用いるローバロボテ

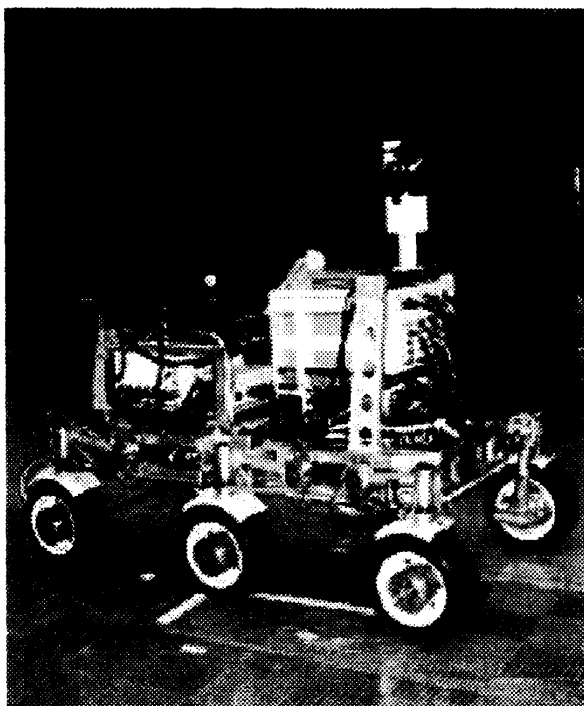


図6. ローバ研究モデル

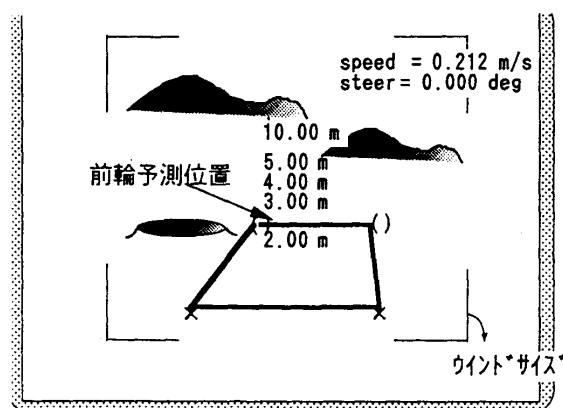


図7. 位置予測支援画面(例)

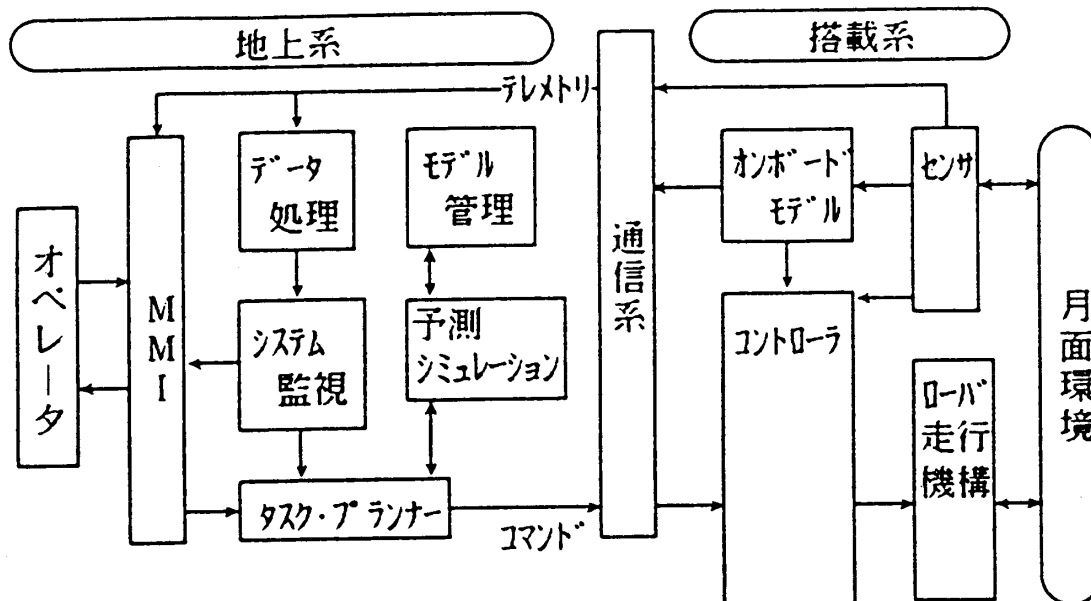


図8. ローバの制御構造

イクスの制御構造を図8に示す。本制御構造は、典型的なスーパーバイザリ型のシステムであり、通信時間遅延は数~10[sec]が想定される。このようなシステムでは、従来から、搭載系での高速性を要する制御の補償と、地上系での予測計算に基づく操作が有効であることが明らかになっている。つまり、ロボット運用の「操作・制御」機能について制御のリモート化(オンボード補償)及び、操作のローカル化(予測支援技術)の有効性が確認されている。加えて、高い操作信頼性を要求されるシステムの運用では、「監視」機能が重要となり、能動的(操作に応じた)な監視技術として、ローカル系での実行前指令チェック等の適用が考えられる。

本研究では、部分自律型遠隔操縦のポイントの一つとなるオンボード補償に関して、「指令された走行領域にある障害物をオンボード系で自動的に検出して停止させる」補償法を解析検討している。一定の速度走行、加速度ブレーキング、監視センサ観測周期の条件においては、ある規定領域範囲を一度に監視する必要がある、この領域を監視域(Window of Attention)と称し、センサ処理能力に対

する要求仕様を決める重要なパラメタとなる(図9)。以上の操作・制御・監視の3要素について、搭載系&地上系の機能分担を臨機応変に組み替えられるような「Shared Autonomous System」が全体的操縦性の向上に寄与できると考えられる。

3.2.3 経路計画・同定(Path-Planning & Path-ID)の試験研究

遠隔操縦のポイントの一つとなる月面地勢のオペレータ提示、地勢環境獲得、自己位置同定等に関する視覚処理技術(オフライン処理)として、CCD

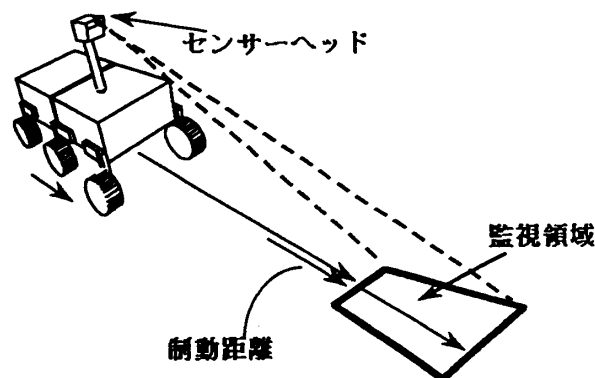


図9. 走行監視域(WOA)概念

カメラ／レーザレンジ・ファインダ(LRF)等によるデータ取得試験を実施し、各種照明条件・地勢条件等における各センサの特性を解析している。

これらのセンサ取得データに基づいて、局所経路計画の自動生成技術に関する解析を行っている。また、既存の月面デジタル等高線データを活用した、パターンマッチング処理に基づく自己位置同定処理に関する基礎解析を実施している。

3. まとめ

本章では、月面ローバの技術動向を概観し、宇宙開発事業団(NASDA)における月面ローバ研究について一部紹介した。蓄積の少ない新規システムであるため、今後も関連する新規技術の修得を図りつつ、創造的な技術方式の可能性を探り、月面ローバシステム概念の確立及びロボティクス等の主要技術を目処づける研究を実施していく。

参考文献

- [1] Burke, J. D., 1994: 惑星探査ローバのアメリカにおける研究と開発, 日本ロボット学会誌 **12**, 986-992
- [2] 狼, 若林, 足立, 1994: 月・火星探査ローバ, 日本ロボット学会誌 **12**, 979-985
- [3] Kubota, T., Nakatani, I., and Yoshimitsu, T., 1995: Path Planning for Planetary Rover Based on Traversability Probability, *Proc. of ICAR95*, 739-744
- [4] Wakabayashi, Y., Nishio, Y., and Yoshioka, N., 1995: Lunar Rover System launched by H-II Rocket, *Proc. of 5th. Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics*, 340-344.
- [5] 若林, 西尾, 吉岡, 1996: 月面ローバのミッションシナリオ, 第40回宇宙科学連合講演予稿集, No.2A-16.
- [6] Yoshioka, N., Nishio, Y., and Wakabayashi, Y., 1995: Integrated Test System for a Six-Powered-Wheel Lunar Rover, *Proc. of ICAR95*, 285-291.
- [7] 若林, 吉岡, 1996: 月面ローバの遠隔操縦技術, 電子情報通信学会, 宇宙・航行エレクトロニクス講演集, 19-24.
- [8] Yoshioka, N., Wakabayashi, Y., and Nishio, Y., 1996: Driving Technology and Preliminary Tests of a Lunar Rover, *Proc. of IFAC96*, 23-28.