

特集「無人観測ロボット」

月惑星表面探査Roverの火山観測への応用

—移動型遠隔無人観測システム：“SCIFIER”の開発—

國井 康晴¹

2012年4月2日受領, 2012年5月2日受理.

(要旨) 火山活動域における観測活動は、科学的知見の収集、居住者の安全確保などの面において非常に重要である。しかしガス、熱、地盤などの面で非常に厳しい環境となり、また現在の技術レベルでは、火山活動の完全な予測、制御は難しいため、観測には大きな人的リスクを伴う。このためロボット技術活用による観測が期待されている。本論文では、月惑星表面探査技術を応用し、遠隔地から公衆ネット回線などを介し誘導可能な移動ロボットを開発、その構成、制御システム、遠隔誘導システムに関しアルゴリズム、ソフトウェア、ハードウェアの各方面から述べる。また試作システムを用いて伊豆大島三原山においてフィールド試験を実施し、運用試験を通した評価実施結果に関し報告する。

1. はじめに

近年、月惑星探査分野においてロボット技術は必須の技術となり、探査方式に関して様々な可能性を提供している。特に移動技術を伴う表面探査は、注目されており、1997年の米国NASA, JPL の探査機Pathfinder に搭載された移動ロボット(ローバ) Sojourner, 2004年の二台のMER(Mars Exploration Rover) の成功により確固たる地位が築かれた[1,2]。その結果、2020年までに米国、欧州、中国等において様々なミッションが提案され、実際に検討及び計画が始まっている[3,4]。我国に於いても、JAXA や大学を中心に月面、火星表面探査におけるローバの技術的検討や利用法が検討されている[5,6]。

一方、ここ数年、地上では火山などの災害地域に対し、ロボット技術を用いた調査、探査の実現が検討されている。火山活動域における観測活動は、科学的知見の収集、居住者の安全確保などの面において非常に重要である。しかしガス、熱、地盤などの面で非常に厳しい環境となり、また現在の技術レベルでは、火山活動の完全な予測、制御は難しいため、観測には大きな人的リスクを伴う。このためロボット技術活用によ



図1: 遠隔操縦型科学観測ローバ。

る観測が期待されている。火山観測ロボットに関しては、Carnegie Mellon University(CMU)のDante I&IIなど過去にいくつかの試作ロボット及び研究が存在している[7]。また日本においては、雲仙普賢岳における遠隔操縦建機の検討、東北大のMoveの開発、試験運用の実績などがある[8]。しかしこれらのシステムは操縦者による直接的な遠隔操縦システムを採用し、ロボットとしての自律的な機能の搭載には至っていない。そこで我々は、これまで月惑星探査計画のために検討して来た技術の火山地域観測への応用可能性を議論すべく、システムの開発を行い、2011年に伊豆大島にて運用試験を行った。

1. 中央大学
kunii@hmsl.elect.chuo-u.ac.jp

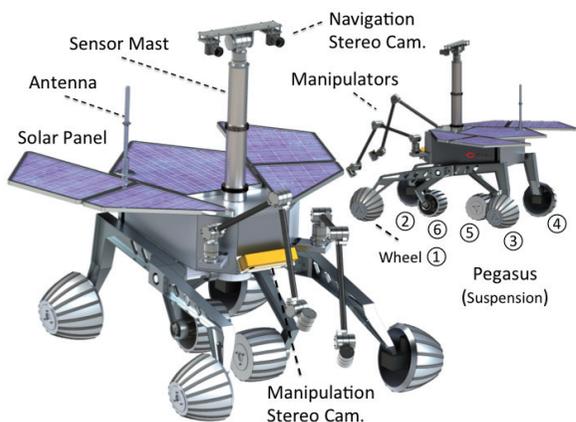


図2：SCIFIERローバ(フルバージョン)。

表1：SCIFIERローバの主性能。

	Rover	Manipulator
Size	L:1280 W:980 H:1250 [mm]	900 [mm] (Length)
Weight	40 [Kg]	3 [Kg]
Wheel Dia.	280 [mm]	—
Sci. Payload	<< 30 [Kg] (total) 5 [Kg] (gimbal)	<< 3 [kg] inc. end-effector
Power Source	Li-Poly & Solar Panel	
Battery	29.6[V], 9200 [mAh]	

以上より本論文では、現在までに月惑星探査遠を目的に検討、開発して来た試作ローバMicro6-02を利用し遠隔地から公衆ネット回線などを介し誘導可能な移動センサプラットフォームシステムSCIFIER (Scientific Intelligence FIEld Rover) の開発を行った。第2節で機能、搭載機器、制御システムのハードウェア、ソフトウェアに関して述べ、第3節で遠隔操縦誘導システムに関し関して述べる。また第4節で試作システムを用い、伊豆大島三原山の裏砂漠において実施したフィールド試験の結果に関して報告する。

2. 移動型遠隔観測システム:SCIFIER

2.1 ハードウェアシステム構成

図1に開発したローバ(Rover:不整地移動ロボット):Micro6-02 SCIFIERの写真を示す。操縦者は、遠隔地からSCIFIERを操縦し、目的地に誘導、搭載観測器により環境情報を取得可能である。図2に示す様に不整地を走行するために構成された移動機構をベ

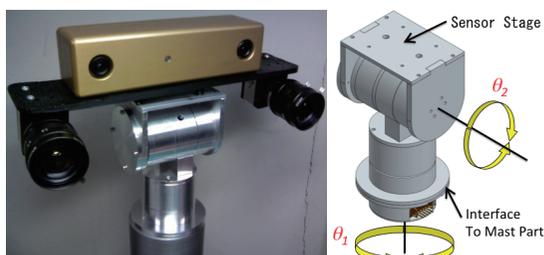


図3：センサマスト搭載ジンバル。



図4：USM駆動型5DOFマニピュレータ。

ースシステムとした本体、センサマスト、通信用アンテナから構成される。この基本構造部には、月惑星表面探査ミッションの実現に向け、中央大学、明治大学、宇宙科学研究所(JAXA)における共同研究により検討、開発されてきたMicro6を用いている[9]。SCIFIERは、Micro6ローバの2号機にあたり、遠隔誘導技術及び遠隔サンプル採取及び観測技術の検討のため、中央大学において研究開発されてきた。表1に主な仕様を示す。以下、各機能に関して概観する。

まず移動機構は、図2に示すように車輪を採用し、乗り越え能力を確保するため、黒田らが提案したサスペンション: PEGASUSを採用する[9]。これにより火星探査で用いられたNASA-JPLのMERローバで採用されるRocker-Bogieサスペンションと同様な不整地踏破機能が提供される[10]。PEGASUSは、図2に示した様に①~⑤の5輪構成により構成され、車輪径の1.5倍上の段差乗り越え能力を有する。しかしPEGASUSの乗り越え能力には異方性があり、後進のため、さらに地形による前輪の脱落防止のため、最終的には6輪目(⑥)の追加が検討されている。設計上の最大登坂斜度は20~25[deg]となっており、最大移動速度は約20[cm/s]としている。なお試作機では遠隔誘導技術の検討を目的とし、全ての障害物を回避するた

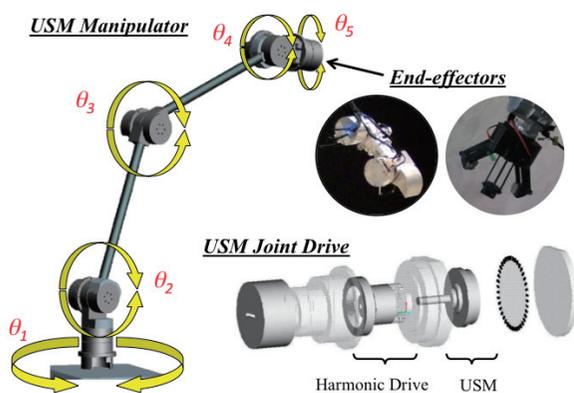


図5：マニピュレータ及びUSM関節ユニットの構造。

め、現状では5輪目(6輪目)は搭載せずに運用されている(図1)。

観測システムは、本体表面、内部及び本体中央前部のセンサマストに搭載可能である。火山学者等の要望により各種観測機器が据え付ける。マスト先端には、図3に示す超音波モータ(USM)により駆動される2軸のジンバルが搭載され、約5[Kg]までの搭載観測機器をPan, Tilt方向に制御可能である。実験機ではステレオカメラを搭載し、地形情報が取得される。さらに本体前方側面部にはUSMを用いた5自由度マニピュレータが搭載される(図4)。マニピュレータ及び関節の構造図を図5に示す。USMは、原理的に摩擦力を駆動力に変換するため、停止時には静止摩擦力によりクラッチ機能を有し、姿勢維持に制御、電力を必要としない。また時間を区切って各軸ごとに制御することにより最大電力を抑える事が可能であり、エネルギーの限られる移動システムに於いては有利になる。マニピュレータ先端には、観測機器やハンドなどが搭載可能で、岩石、土壌などの試料採取、直接観測が可能である。試作機では図4、図5に示す様に3本指のハンドと蓋付きスコープハンドの2タイプが用意されている。ハンドでは4[cm]径の岩石、スコープでは2[cm]径の岩石及び砂を0.5[Kg]程度まで採取可能である。なおハンドは目的に応じ開発し、搭載されるものと考えている。

次に外部からの遠隔制御及び観測データ送信のための通信回線として、図6に示す様に2.4G Wi-Fi(56 Mbps)による直接通信と携帯電話回線を利用した間接通信機能を有する。これらは現地での様々な運用状況

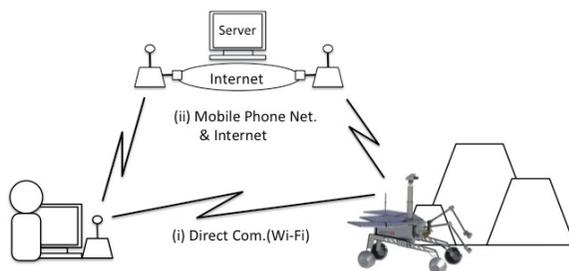


図6：遠隔制御の概要。

により使い分けられる。図6に示すように直接通信(i)では、ホスト側をサーバとしてローバと接続するが、携帯電話回線(ii)では固定IPが提供されないため、インターネット上に中継サーバを用意し、ホスト、ローバともにクライアントとして接続している。

またエネルギー源としては、リチウムイオンバッテリーを搭載し、6時間以上の運用の実績を有する。また本体上面には太陽電池パネルが搭載されバッテリーの充電が可能である。今後、補助電力の供給機能も付加される予定である。

2.2 制御システム

図7に制御システムの構成を示す。全てのサブシステムは、EtherによるLAN構成し接続される。これにより各機器の接続はネットワーク上で仮想的に実現される。仮想化することで、異常時のアクセス性向上による情報取得性向上、機能補完等のため柔軟性を高めている。メインCPUは、ナビゲーション用、試料採取観測用の2つを搭載する。これは処理速度の向上に加え、研究開発の利便性を考慮しての設計となる。移動用CPUは、基本的に車輪及びセンサジンバルの管理、走行に関わる周囲環境計測(画像処理等)、遠隔地の操縦者との通信を担当する。試料採取観測用CPUでは、マニピュレータの制御及び作業空間の計測を担当する。また各車輪や各センサなどは日立SH2マイコンを用いてネットワーク上に接続される。車輪などにおいては、必要に応じ、SH2のCPU間シリアル通信機能を用いて同期情報をやり取りし、車輪の滑り制御などが実現される。

2.3 3層構造をもつ制御ソフトウェア

本論文で提案する移動型環境情報収集システムは、

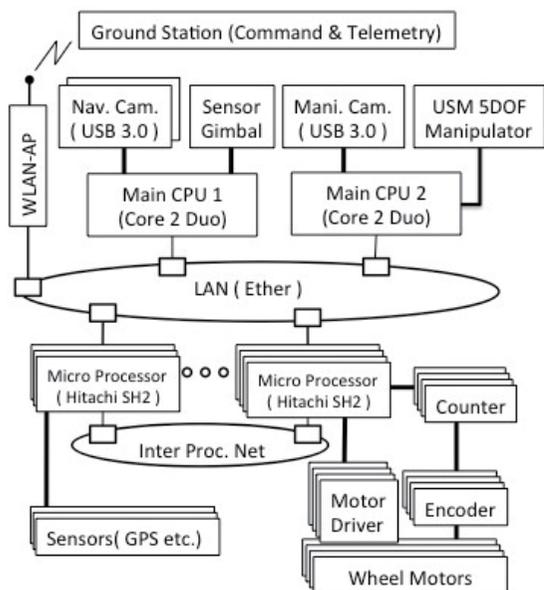


図7：SCIFIERローバのシステム構成.

火山活動地区など人の存在が難しい地域に投入され、遠隔地から運用される。噴火などによりその環境は、事前情報から変化している事もあり、必ずしも想定環境及びパラメータ内に当てはまるとは限らない。このため現地の状況に合わせ、搭載機能の再構築や再プログラミングなどが必要になる事が想定される。一方、安全なシステム運用のためには、システムの状態把握、特に異常時には重要となる。また状況改善のため不良機能の排除や機能再構築が必要になる場合もある。以上より、本システムでは、

- ・機能構造の柔軟性(可変性)
- ・情報取得性の向上(データ透過性)

を重視しシステム設計を行なった。そのため前述したハードウェア接続では、ネットワーク化による接続構造の仮想化を実施した。これにより各機器間の物理接続による接続関係の固定化を防ぎ、ソフトウェア制御により様々な接続関係への対応可能性を残すと共に、直接アクセスによる情報取得性の向上を果たしている。さらにソフトウェアにおいても、各機能をモジュール化しネットワーク上で接続する事で、可変性及びデータ透過性を確保した。各機能またはタスクは、ソフトウェアモジュールを接続しフローとして表現、実現される。何らかの事態により機能変更する場合は、モジュールの追加、組み替え、削除などにより対応可能と

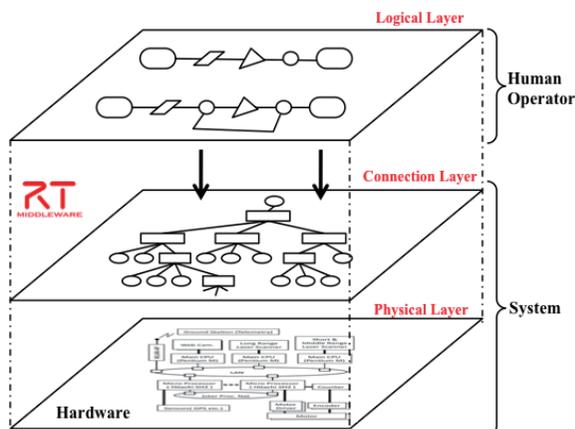
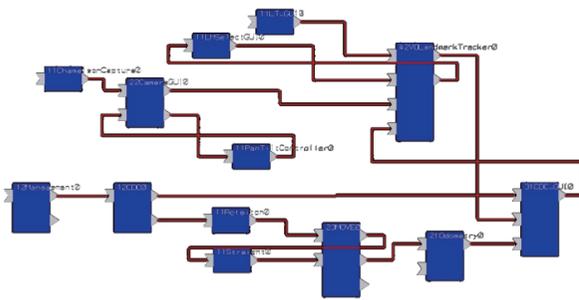


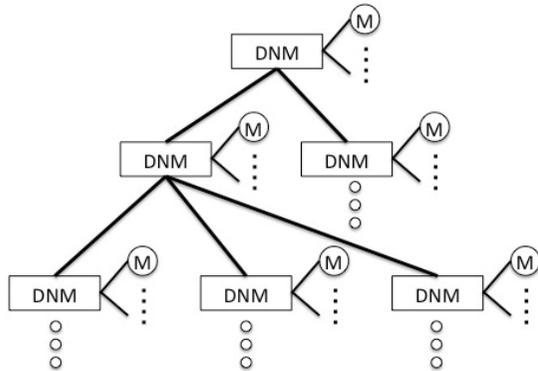
図8：制御ソフトウェアのアーキテクチャ.

なる。各機能、またはタスクフローはネットリストとして表現可能なため、再プログラミングが搭載機能のみで構成される場合、遠隔地からネットリスト情報のみをアップロードする事で対応可能になる。機能モジュールが搭載されていない場合でも、必要最低のデータの転送にて実現できる。さらにモジュール化により、高機能化、複雑化するロボットシステム開発における過去のプログラム資産の有効活用にも有利に働く。またモジュール化は、一般プログラム言語に比べて機能を大きな粒度で扱え、直感的に構成できるため開発効率の向上への寄与も大きくなる。

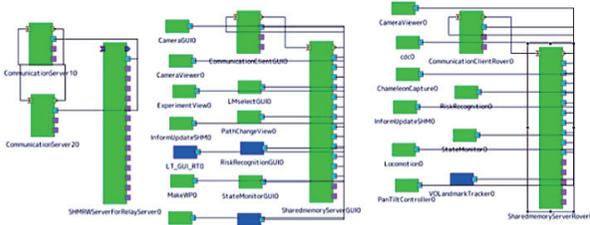
以上から、本システムでは図8に示す様な3層構造システムアーキテクチャを提案し、採用している。第1層と第2層がソフトウェア層、第3層がハードウェア層(物理層)である。ここではソフトウェア層に関して説明する。第1層は、前述のモジュールを用いたタスクフローによる機能実現をユーザに提供し、論理層と呼ばれる。論理層では、図9(a)に示すようにユーザはGUIを用いフローチャートの様にタスクが実現可能である。また各要素の組み替えもここで実現される。ここで実現されたタスクフローに基づき生成されたネットリストは、遠隔地のロボットに転送され実際にモジュール間接続が実現される。しかしタスクフロー表現は、可変性とデータの透過性の観点からシステム管理上、必ずしも最適な形態とは言えない。このため実際には各モジュール接続は、第2層の接続層において仮想的に実現される。ここでは各モジュールが、データベースノードモジュール(Database Node



(a)論理層におけるタスクフロー表現(第1層)



(b)接続層におけるDNMによる木構造(第2層)



(c)RTコンポーネントによる接続層の実現例

図9：モジュールによる制御ソフトウェア実現。

Module: DNM)と呼ばれるシステムモジュールの下に配置, 接続される. DNMは図9(b)に示される様に Tree構造を持ち, 各モジュールは従属性, 通信データ量に従い各DNMの下に配置される. 各モジュールはDNMの管理する共有メモリを介して通信し, モジュール間接続はDNMが提供する参照アドレスとして管理される. このため接続変更は, ポート変更ではなく, 参照先アドレスの変更として実現される. またモジュール間通信は全てDNMで参照可能なため, 通信ログの管理や異常時のデータ読み出しが容易になる. 図9(c)に接続層における実際のモジュール配置例を

示す. 各ブロックがモジュールを表し,縦長で大きいモジュールがDNMである.

なおモジュール化, ネットワーク化に際しては, (独)産業総合技術研究所のRT Middlewareを利用し構成している[11]. また提案アーキテクチャ実現のため, 共有メモリを用いた通信及びデータ共有機能など必要な機能に関しては, 独自に拡張, 追加し実装し, 研究開発を進めている.

3. 観測目的地への誘導

3.1 遠隔操縦及び遠隔誘導技術の課題

歴史上, 最初に月惑星表面に送られ遠隔操縦されたロボットは, 月に向け旧ソ連が1970, 1973年に打ち上げたLunokhod-1&2である. コマンドを送信し, その結果を待つラジコン方式の直接遠隔操縦で月面の海を37[Km]を走破している[12]. しかし当時と比べ, 現在求められるミッション及び探査環境は複雑であり, ラジコンの様な手動操縦では対応が難しくなっている. ここで月惑星表面では, 一般に遠隔地のシステムとの間で十分な通信速度, 容量が得られない. また同様に火山地域でも通信回線及びその容量の確保は容易ではない. 低通信速度下において遠隔地の環境を把握し, システムを操縦することは, 小さな穴から世界を覗いて散歩をするようなものである. 非常に困難かつストレスの溜まる行為であることが容易に想像され, 何らかの対策が求められる.

一般に遠隔誘導方式は, 自律方式と手動方式に大別出来る. 自律方式は, システム自体が高い知能を有し, 自律的に行動可能である. コマンド受信後は自律的判断に基づき目的を達成する. したがって作業効率, 操作ミスなど, 安全性を考慮した場合, 完全自律方式による運用が理想的となる. しかし, システム自身に未知の不整地環境での柔軟かつ高度な判断を期待することは, 環境の複雑性, センサの信頼性の面から現在の技術レベルでは現実的ではない. 一方, 手動方式では, 操縦者の能力によって目的へと達成し, 人間の高度な判断能力と適応性による高い信頼性が期待できる. 特に時間遅れや通信容量制限の存在する環境では, 動作指令の結果確認による指令待ち, 操縦者の精神的重圧から動作しては停止することを繰り返すMove&Wait

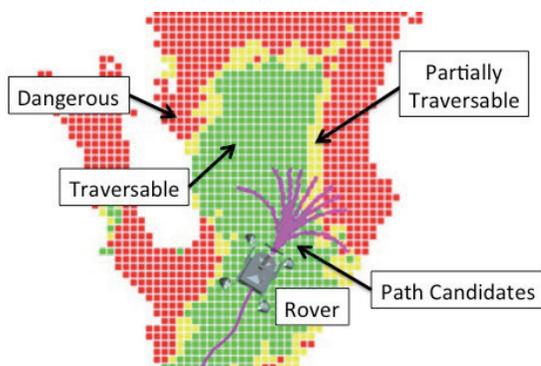


図10: JPLによる Morphine Navigation.

現象が発生する。このため、操作性は低下し、著しく作業効率が悪化する。結果、操縦者の能力が発揮できず、加えてストレス増加により人的ミスが発生が、大きな損失を招く[13]。これに対し手動方式において一部機能を自律化する作業分担方式(半自律方式)は、両者の中間に位置し現実的なシステムである。直接的な手動遠隔操縦をベースに様々な自律機能を付加することで、操縦者との協調により安全性と効率の維持が可能になる。

ここで近年、話題となった2台の火星探査ローバ Mars Exploration Rover: MER(2003), その後継機 Mars Science Laboratory: MSL(2011)では、1996年にCMUにて提案されたMorphine Navigationを搭載自律機能としたGESTALTを採用する[14,15]。指示通過点(WayPoint: WP)に向かう際、図10に示す様に計測地形を格子状に区切り、各点においてローバを全方位に回転し、車体の傾きなどから危険度を数値化する(図の結果は、著者による)。そして予め決められた複数の円弧をローバ前方に用意し、各軌道に対し通過地形の危険度値、目標WPまでの距離等を考慮し、最適であると考えられた円弧上を移動する。これを繰り返すことで目的のWP近傍に到達する。本方式の有効性はMERにて比較的単純な地形において確認されたが、走行軌道が操縦者の意図を必ずしも反映しない事、WPへの到達が保証されない事、WPの設定誤差が考慮されない事などの課題を有し、障害物の多い複雑な走行環境下で大きな課題となる。

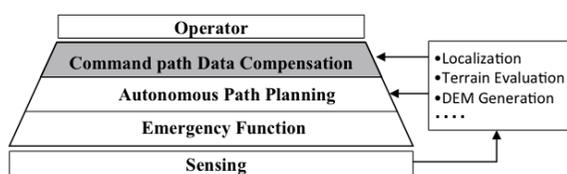


図11: SCIFIERにおける自律機能構成.

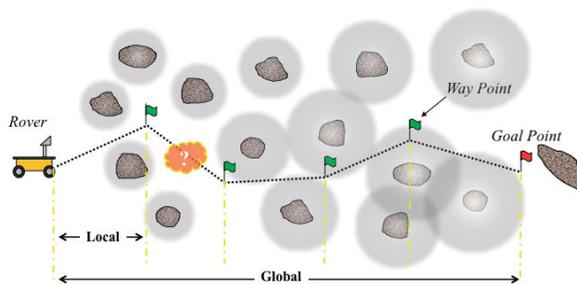


図12: CDCを用いた遠隔誘導方式.

3.2 軌道補正を用いた誘導システム

図11にSCIFIERに搭載された自律システムの構造を示す。システムは3層からなり、最下層はセンサーデータの異常から緊急停止を行う。中間層が自律軌道計画機能であり、周囲環境に対応した走行軌道の生成を行う。そして最上位層が自律指示軌道補正機能となり、中間層に加え、操縦者との協調機能となる。一般に、遠隔移動ロボットへの走行指令は、図12に示す様にロボットが観測した環境データに基づき、操縦者が指定した軌道をWP列に変換して伝達される。しかしWP自体は、走行前に計測対象遠方から計測された誤差を含むMapデータに基づき決定される。図12において障害物は、円で表現されに存在確率内に存在し、計測距離に応じて曖昧になる傾向を有する。このため走行に伴い、指示軌道が障害物等に接触する可能性が生じ、何らかの対策が必要となる。そこで初期の環境計測データに基づいて作成された指示走行軌道を、最新の環境データへ適応する指示軌道補正により信頼性を確保する軌道補正アルゴリズム(Command Data Compensation: CDC)を用いた遠隔誘導方式を提案し、上位層に搭載した[16]。本方式では、走行中、周囲の特徴地形(LandMark: LM)の位置を計測し、移動中、LMの位置関係の差異をMapの歪みとして捉え、その歪みを指示走行軌道にも適応する事で最新環境データに対



図13：特徴地形(Land-Mark)の追従。



図14：特徴地形追従計測例。

応させる。このため走行中、画像を用いて複数のLMを追従し、その位置から歪みを計算する。LM計測は、図13に示す様に画像の動きからローバの運動推定(Visual Odometry)を実施し、LMの移動先推定(テンプレート探索範囲の推定)と移動に伴うテンプレートサイズの推定を実施する事でロバストな追従から行われる。図14に追従中のLMを示す。正方形で囲まれたそれぞれのLMをステレオ計測し、その位置を求めている。

次に、走行中に於ける中間層と上位層による操縦者との協調に関して、図12を用いて概説する。まず取得された環境データに基づき操縦者が走行軌道(WP列)を設定する。ローバは次のWPを目指して移動を開始するが、次のWPまでは中間層の自律軌道計画機能により軌道決定される。これは計測地点から見えず、観測出来なかった障害物、割れ目などを回避するためである。そして走行に伴いWPの信頼性が低下するため、CDCによりWP列を最新の環境計測データに適応させる事で補正、信頼性を回復し障害物への衝突を回避する。図15にCDCのシミュレーション結果を示す。まず操縦者は、誤差を含む初期環境計測データ(灰色)を用いて指令軌道(Command Path)を設定する。

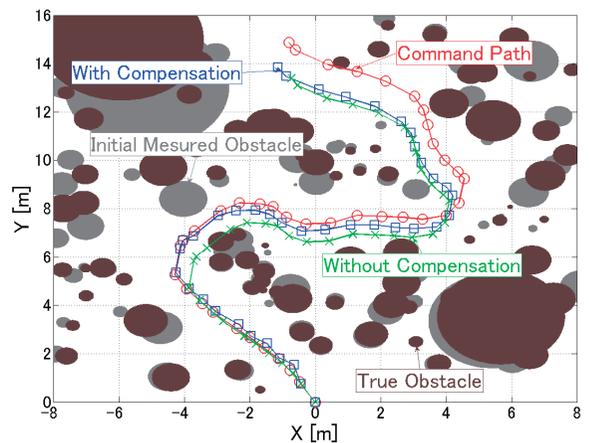


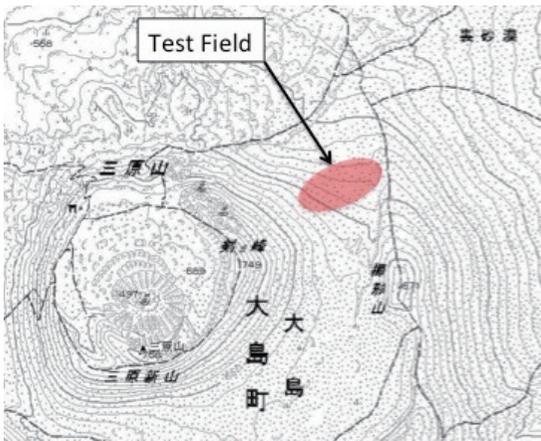
図15：CDC遠隔誘導によるシミュレーション結果。

この指示走行軌道は、実際には実障害物(黒)と接触していることが分かる。次に計測誤差と車輪の滑りが存在する中、指示軌道を追従走行する。指示軌道のWPを単に追従した場合は、途中で実障害物(黒)へ接触してしまう(Without Compensation)。一方、CDCによる軌道補正を実施した場合は、障害物へ衝突せず最終目的地に到達できている(With Compensation)。ただし目的地は、誤差を含むMAP上にて設定されているため最終目的地は、補正指令軌道と同様に周囲の障害物との相対位置から定義される。

ここでNASAの採用するMorphin NavigationはWP間における自律協調機能であり短距離の自律軌道計画に相当する。一方、CDCを用いた遠隔誘導方式はWP全体の補正を対象とする中距離の自律軌道計画にあたり、この2つは融合して用いる事も可能である。なお実装システムでは、Morphin Navigationの他、電界ポテンシャル法、 A^* 、 D^* など一般に使用される軌道計画方式が選択的に利用可能である[17]。前述した様に中間層の自律軌道計画の長距離適用の信頼性には不安があるが、環境により比較的短距離においては十分な信頼性が確保される。提案遠隔誘導システムではWP間隔にて中間層への依存度(自律度)が操縦者の判断にてシームレスに調整可能である。すなわちゴール点のみを指定した場合は、完全自律走行になり、障害物が少ない地形などでは信頼性を確保したまま、走行効率の向上が可能となっている。次章では提案アルゴリズム及びシステムを用いた実践的な評価としてフィールドテストを行い、報告する。



(a)試験フィールド

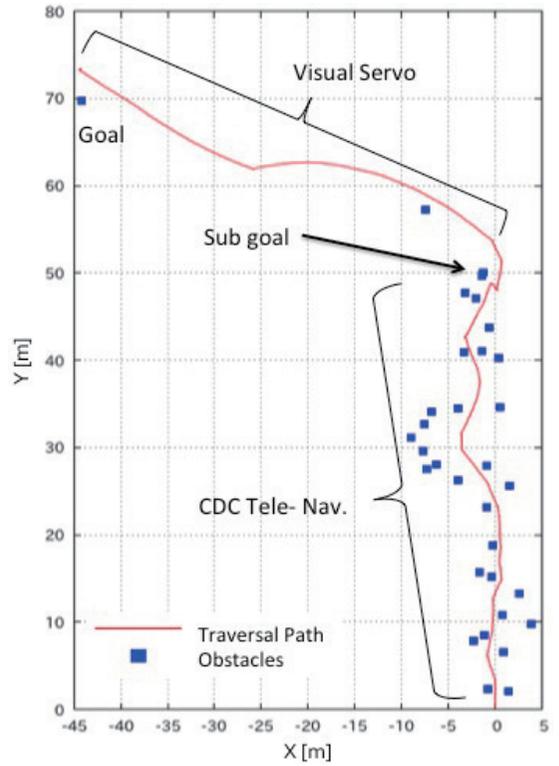


(b)試験走行地点
(国土地理院電子国土Webシステムより)

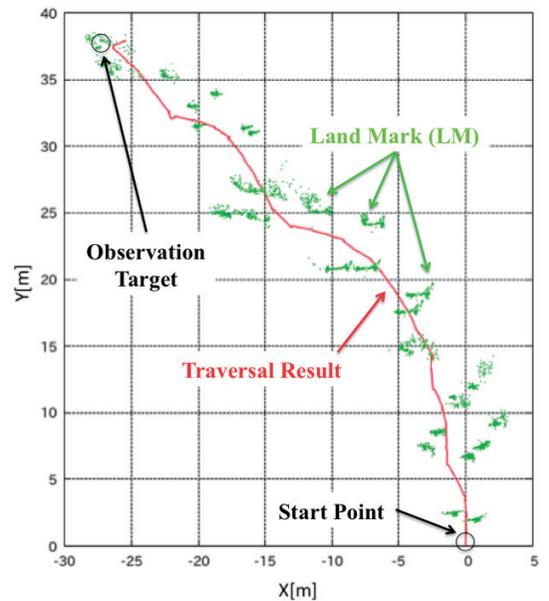
図16: 伊豆大島三原山裏砂漠におけるフィールド試験.

4. 運用及びフィールド試験

2011年に伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムの実証試験に参加し、フィールド試験を行った。本実験では、観測などのため指示された目的地までロボットを移動することを想定し、第3節で述べた遠隔誘導方式及びシステムの動作を実際のフィールドにて確認する事を目的とした。図16(a)にテストフィールドの風景を、(b)に三原山の地図と試験を行った裏砂漠の位置を示す。遠隔操縦ホストシステム、通信アンテナ、位置の真値計測用測量機を設置したベースキャンプを現地に用意し、離れた位置からローバの遠隔操縦による障害物回避、目的地への誘導実験を行った。5輪目(6輪目)は搭載せず、実験目的と環境保全から岩



(a)長距離走行試験結果の真値



(b)搭載機器による走行及び計測結果

図17: CDC遠隔誘導方式による走行試験結果.

などの全ての障害物を回避する。スタート地点から約50[m]地点の大型岩石を中間観測目標とし、約70[m]

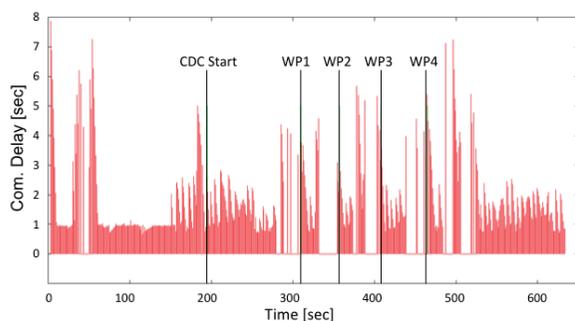


図18：長距離間における遠隔誘導時の時間遅れ。

先の大型岩石を最終観測目標に設定した(図17(a)). 図17(a)中の走行軌道及び障害物の位置はレーザ測量機を用いて計測した真値である。まず障害物が多い中間観測地点までを前述したCDC遠隔誘導方式によってローバを移動させた。次に中間観測地点から障害物がほとんど存在しない最終観測地点までは、LM追従機能を応用し、走行中、目標物を画像中心に固定追従させる様に制御し、追従目標の選択と接近を繰り返し、最終観測地点を目指した。図17(b)に中間観測地点までのCDCによる誘導結果を示す。図中の軌道がローバ搭載コンピュータ上で走行したと認識された軌道である。CDCでは周囲の特徴地形をLMとして利用するが、その際に利用したLMを図中に示す。LMデータは、LM及び周辺の地形データとして表示している。

今回のフィールド試験においては各実装機能が有効に機能する事が確認できた。しかし撮像画像からの目標設定の際、解像度及び撮影距離、角度などの問題から個体の認識が難しく間違った目標を設定することがあった。その結果、図17(a)では最終観測地点から逸れてしまい、今後の課題となった。また天候などの時間的な環境変化などへの対応など実用に向けた課題も認識された。なお現地にて東京からの携帯電話回線を用いた制御試験も実施し動作を確認した。しかし時間の都合により、誘導実験は実施出来なかった。携帯電話回線では、回線速度及び通信容量の関係から大きな時間遅れが発生する。そのため第3節で議論したMove&Wait現象などの動作不良が懸念される。しかし本システムは時間遅れのある環境でも有効に機能する事が事前のハンガリー・東京間の遠隔制御実験にて確認されている。図18にハンガリー・東京間遠隔誘導実験の際の通信遅れ時間を示す。“CDC Start”以前

が、走行前の環境情報(Map等)の取得及び指示軌道の伝達過程となる。“CDC Start”にて実際にローバが走行を開始し、“WP1”から“WP4”と自律走行を続けている。平均して約1[s]、大きいところで約7[s]の遅れが確認出来るが、走行前のMapデータや指令軌道データの送受信のために時間を要するもの、誘導操縦の操作自体は、遅れ時間に関わらず室内実験や大島フィールド試験同様にスムーズかつストレス無く実施できた。また走行中はMove&Wait動作(第3節参照)は確認されず、通信距離、時間遅れを気にする事無く誘導が可能であった。したがって大島から離れた安全な地点からの遠隔操縦においても、今回の大島実験と同様な操作環境及び結果が提供可能であると判断する。

5. まとめ

本論文では、これまで月惑星探査のために検討して来た技術を、火山観測ロボットシステムとして活用を検討するため、遠隔移動観測ローバ: Micro6-02 SCIFIERを構築した。そしてハードウェア、ソフトウェア及び遠隔誘導システムに関して議論し、その詳細に関して述べた。提案するアルゴリズム、システムの実フィールドでの評価のため実施した2011年の伊豆大島、三原山の裏砂漠におけるフィールド試験及びその結果を紹介、結果及び課題に関して議論を行った。実環境においても検討技術は有効に機能したものの、システム及びアルゴリズムのロバスト性において課題を残した。また操作においては、受信画像における目標の誤認識など、オペレーション上の課題も明らかになった。今後の課題として実装システムの安定化に加え、地質学者を交えた実観測など、より実践的な試験結果からの考察と改良などが考えられる。

本研究の成果の一部は、中央大学理工学研究所共同研究プロジェクトによるものである。

参考文献

- [1] Lindle, C., 2004, IAC2004, IAC-04-IAA.4.9.2.05.
- [2] Biesiadecki, J. et al., 2006, IEEE Robotics Automation Magazine 13, 63.
- [3] Woods, M. et al., 2009, Field Robotics 26, 458.
- [4] Smith, M., 2005, Library of Congress. Congressional

Research Service, RS21641.

- [5] Okada, T. et al., 2006, *Advances in Space Research* 37, 88.
- [6] 内閣官房宇宙開発戦略本部報告書 我が国の月探査戦略, 2010.
- [7] Krishna, M. et al., 1997, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1100.
- [8] 谷口宏充 他, 2003, 地球惑星科学関連学会予稿集, 80.
- [9] Kubota, T., 2001, *Proc. of 10th International Conference on Advanced Robotics*, 451.
- [10] Harrington, B. and Voorhees, C., 2004, *Proc. of 37th Aerospace Mechanisms Symposium*, 185.
- [11] Ando, N. et al., 2011, *Journal of Robotics and Mechatronics* 23(3), 350.
- [12] Basilevskii, A. et al., 1977, *The Moon* 17, 19.
- [13] Michael, A. et al., 2001, *Proc. of the IJCAI01 workshop*, 1624.
- [14] Way, D., 2001, *Proc. of IEEE 2011 Aerospace Conference*, 1.
- [15] Carsten, J. et al., 2007, *Proc. of IEEE Aerospace Conference*, 1.
- [16] Kunii, Y. et al., 2005, *Proc. of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1275.
- [17] Ferguson, D. and Stentz, A., 2006, *J. of Field Robotics* 23(2), 79.