

# 不整地走行ロボットの開発と災害時情報収集活動への応用

吉田和哉 石上玄也 三輪章子 (東北大学)

## Development of Mobile Robots for Natural Rough Terrains and Application to the Robot Network System for Investigation at a Disaster Site

\*Kazuya YOSHIDA, Genya ISHIGAMI and Akiko MIWA (Tohoku University)

**Abstract**— In this paper, a new project of multimedia information search by teleoperated robot network in a disaster site is introduced. In this project, multiple robots are coordinately operated through ad-hoc wireless communication network, including satellite-based IP communication link, for the search and investigation tasks. The robot system consists of a large-scale outdoor robot to serve as a carrier of small robots and a fleet of small robots to be distributed inside a building. Omnidirectional vision is used for real time remote operation and construction of detailed map data. The data will be displayed in a remote site making most of advanced VR technology. This paper presents the design and development of robot test beds in Tohoku University.

**Key Words:** Mobile Robot, Natural Rough Terrain, Disaster-Fighting and Rescue-Oriented Application, Teleoperation, Omnidirectional Vision

### 1 まえがき

東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 宇宙探査工学分野では、将来の月惑星探査において科学的なミッションを担うことができるロボットシステムの開発を目指して、1997 年頃より不整地走行ロボットの研究開発を進めてきている。本稿では、筆者らがこれまでに開発してきたロボットテストベッドの概要を示し、これら不整地走行ロボットの技術が、月惑星探査のみならず災害情報収集ロボットへの応用においても重要であることを述べる。

### 2 不整地走行ロボットのテストベッド

#### 2.1 Nexus 6

Nexus 6 は、NASA の火星探査ローバーで使用されたロッカーリンク・サスペンションシステム [1] の性能を検証するために開発された 6 輪の走行ロボットである。6 つの車輪は DC モーターによってそれぞれ独立駆動され、片側の 3 つの車輪を受動的な平行リンク機構で結び、更に左右のリンクは、本体から伸ばした耳軸のまわりに回転する。本体の姿勢が、常に左右リンクの回転角の  $1/2$  となるような差動機構を構成している。Fig. 1 に示すようにこのサスペンション機構は、非常に不整地踏破性能に優れている。

筆者らは、車輪と地面の接触力学を定式化し、また同テストベッドの動力学モデルを構築することによって、同ローバーの不整地での移動性能の解析を行った。また、各車輪の駆動トルクを適切に制御することにより、段差乗り越えや砂地斜面の登攀性能が向上することなども確認した [2][3][4]。

#### 2.2 Dune Explorer

Dune Explorer は、月や惑星表面にみられるように、砂地のような流動性のある表面を持つ不整地を走行するロボットを主に研究するために開発された 4 輪のテストベッドである。車輪は直径 0.2m、幅 0.1m のアルミ製であり、車軸内に 22W の DC モーターを内蔵している。車輪の表面には、何も突起が無いもの、高さ

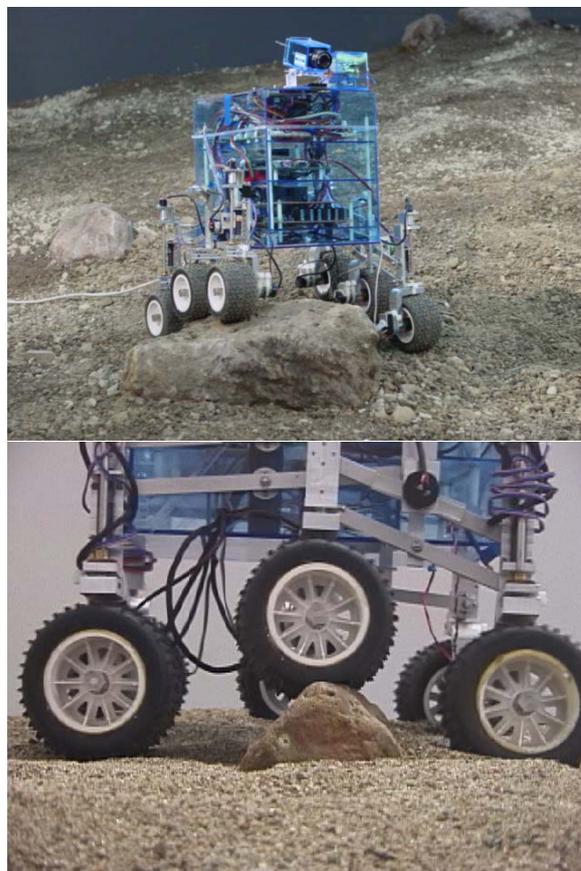


Fig. 1: 6 輪ローバーテストベッド Nexus6 (上: 全景, 下: 障害物乗り越え動作)

0.01m のラグ板を設けたもの、スパイクを取り付けたものなどを用意し、車輪表面の形状と駆動推進力との関係の検討も行っている。左右の 2 輪をリンクでつなぎ、Nexus 6 と同様に差動機構を用いて本体に接続している。このような簡単なサスペンション機構にもかかわらず、非常に優れた不整地踏破性を発揮している。

また、車輪をつなぐストラット部分を伸縮することにより、走行状況に応じてロボットの重心を前後に変

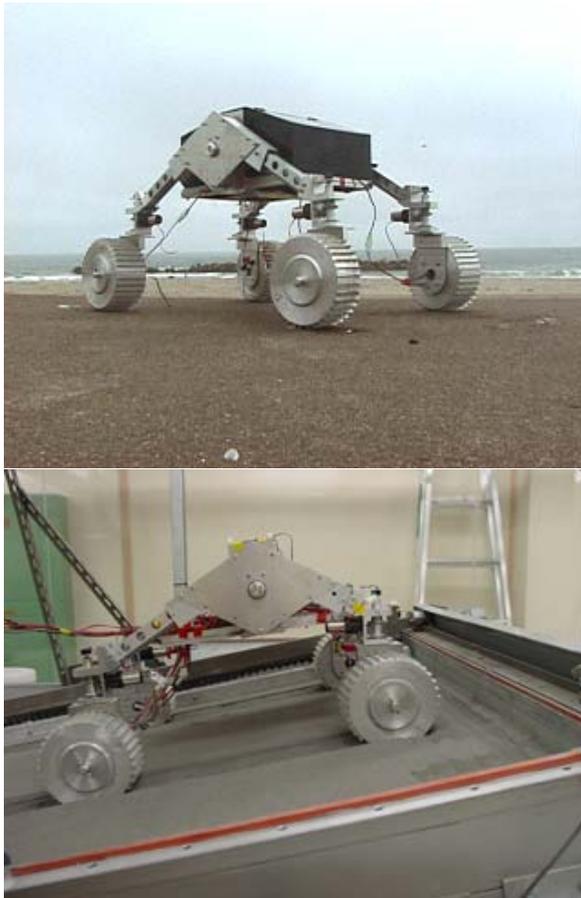


Fig. 2: 4 輪ローパーテストベッド Dune Explorer (上: 全景, 下: 斜面登攀実験)



Fig. 3: 2 輪ローパーテストベッド Desert Crawler

えることもできる(現在の機能は手動による)。Fig. 2 下の写真は、月の模擬砂を敷き詰めたテーブルを傾斜させて、重心の前方移動が斜面登攀性能の向上に寄与することを実験により確認している様子である [5][6][7]。

### 2.3 Desert Crawler

Desert Crawler は、自律移動ロボットの小型化を目指したテストベッドである。車輪の個数をステアリングに必要最小限の 2 個とし、直径 0.15m、長さ 0.23m の筒の中に収納できるサイズとした。全重量は約 1 kg ときわめて軽量である。この大きさ、重さの中に、駆

動用モータ 2 個、バッテリー、制御用計算機を搭載し、さらに自己位置同定用に GPS 受信機も搭載している。車輪が 2 個しかないため段差乗り越え性能は劣るが、Fig. 3 に示すようなフィールドを、連続 3 km に渡って、GPS に基づく自律ナビゲーション走行を行った。移動速度はおよそ 1km/h であった [8]。

### 3 災害時情報収集ロボットへの応用

1995 年 1 月に発生した阪神淡路大地震を契機に、大規模震災時にレスキュー活動を行うロボットシステムの研究が活発に進められている [9]。2004 年 10 月に発生した新潟中越地震ではがけ崩れにより孤立する地域が多発し、電話や防災無線などの地上設備に依存する従来の情報通信網はほとんど機能せず、最初の地震発生翌朝を迎えて明るくなるまで、災害の全容がなかなか把握できないという問題に直面した。筆者らのグループは情報通信の観点から、平成 15 年度より遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究を進めている。この研究では、これまでの開発してきた不整地走行ロボットに関するバックグラウンドを活かし、これに地震の影響を受けない衛星通信を用いた遠隔操縦の機能を付加して、災害発生直後の初動情報収集活動を効率的に行う技術の開発を目指している。そこでの重要項目は以下の 3 点である。

1. 大規模震災等の広域災害において適切な情報収集を行うため、使用可能なさまざまな有線・無線の通信システムを有機的に結合してネットワークを形成する危機対応通信管理技術を開発する。(災害時におけるアドホックネットワークの構築と活用)
2. ヘリによって現場展開が可能な遠隔操縦型情報収集ロボットを開発し、さらにロボットによって収集された画像情報等を再構成し的確な状況把握を可能にするための拡張現実感の技術を開発する。(移動探査ロボットの開発とその遠隔操縦技術の確立、および拡張現実感を用いた臨場感の高いデータ表示技術の開発)
3. 打ち上げが予定されている日本の技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII) 通信実験衛星を用い、以上の技術を統合した実証実験を行う。(衛星通信を用いた実用化試験)

本稿では、上記項目 2. の移動探査ロボットの開発を中心に研究開発の概要を示す。

### 4 想定するシナリオと開発するロボットの概念

ここでは、広域自然災害(主に地震災害)の被災地における初動情報収集活動を行うシステムの開発を目指す。具体的には都市部での大規模震災を想定する。建物は主にコンクリート建造物であり、震災によりその何割かは倒壊、あるいは半壊の状況にあるものとする。また、舗装道路の地割れ、車両の放置などにより地上交通は混乱し、通常の消防車等によるアクセスが困難な状況を想定する。

このような震災発生直後の初動時において効果的な情報収集を可能にする探査ロボットシステムとして、ヘリ空輸等による現地展開が可能であり、コンクリート等の瓦礫上を走破して倒壊建物に接近し、かつ上層階

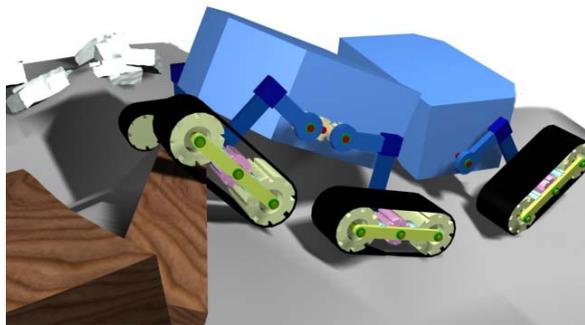


Fig. 4: 大型瓦礫移動ロボットの基本構想図

へもアプローチすることによって倒壊建造物内の人命捜索が可能なシステムを開発する。この全てのミッションを単一のロボットで実施することは困難ある。そこで、大型の瓦礫移動ロボットとそれに搭載される小型の屋内探索ロボットのように、複数のロボットで構成されるシステムを構築し、それらを有機的に協調させることを考える。

公衆通信回線は、地上インフラの被災や通話殺到により使用不能であり、その場に持ち込まれる仮設の無線通信局および衛星通信を経て、インターネットとの接続が可能な状況を想定する。探索ロボットによって得られた画像情報は、無線 / 衛星通信を介して被災現場外に置かれる災害対策本部（オペレーションセンター）に送られ、そこで効果的に再構成提示され、捜索・救援活動の立案・指揮に用いられる。また、ロボットシステムはオペレーションセンターの拡張現実感端末から無線 / 衛星通信を介して遠隔操縦されるものとする。

## 5 遠隔移動ロボット

### 5.1 ロボットの基本設計

上述の大型移動ロボットについては、瓦礫上を移動する高い踏破能力が求められ、また急傾斜地を安定的に登る能力も求められる。災害現場へはヘリコプターを用いた展開も想定し、一般的なヘリの可搬重量を越えないことを考え 500kg 以下であることを要件とする。ヘリによって投入された地点から 100m 単位の不整地移動が可能でなければならない。瓦礫のような不整地を移動するための足回りとして、これまでの研究において有効性が示されているロッカーボギーサスペンション方式と、建設機械等によく見られるクローラ（無限軌道）走行方式を組み合わせた機構を検討中である。Fig. 4 に大型瓦礫移動ロボットの基本構想図を示す。

同ロボットの任務は、倒壊建物の概観画像を撮影することおよび建物内の探索を行う小型ロボットを搭載・運搬することである。1 機当たり 10kg 以下程度の小型の屋内探査ロボットを複数台搭載し、はしごを伸展することによりそれらを中層階まで持ち上げ、窓などの開口部から建物内に展開する能力を持つことを要件とする。なお、屋内探査用の超小型ロボットとして、Fig. 3 に示した Desert Crawler 型の設計は有力な候補である。

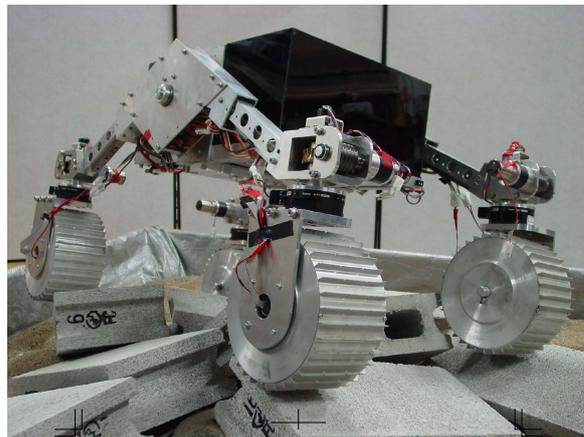


Fig. 5: Dune Explorer による瓦礫乗り越え動作

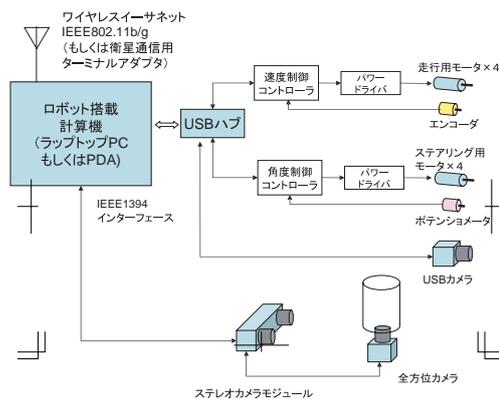


Fig. 6: ロボット搭載系の概念図

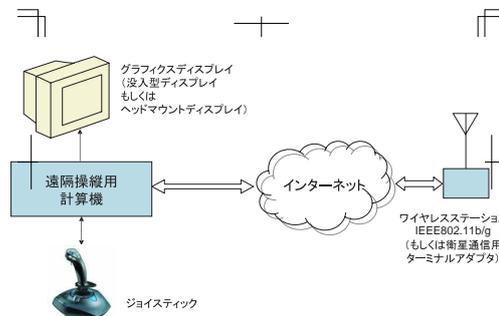


Fig. 7: ロボット地上系の概念図

### 5.2 災害情報収集ロボットのテストベッド

上記の大型・小型ロボットの製作に先立ち、これまでに開発してきた4輪ロボットテストベッド Dune Explorer をベースにして、走行制御系、通信系、遠隔操縦系、視覚系、情報提示系などの各要素技術の試験を簡便に行える研究用プラットフォームを整備した。Fig. 5 に同テストベッドによる瓦礫乗り越え動作を示す。

Fig. 6, 7 にロボット搭載制御系および地上系の概念図を示す。搭載・地上制御系は、可能な限り汎用的なラップトップ PC およびその周辺機器をもって構成することを考え、制御機器のインターフェースは USB 接続に統一した。この分野では、USB 対応の製品が増えつつあるが、ここではイクシスリサーチ社の超小型 USB 接続 4ch モーターコントローラおよび対応するモーター

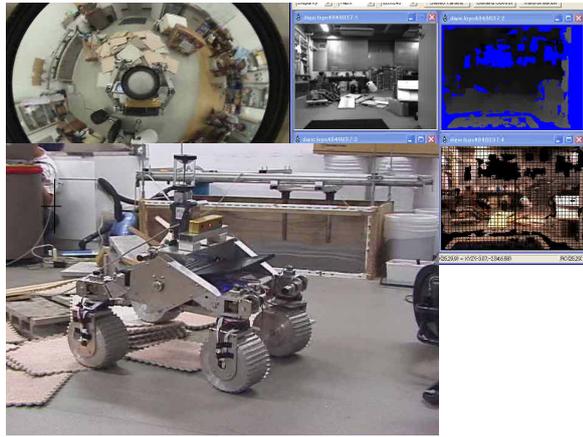


Fig. 8: テストベッド走行実験の様子

イバを使用した。視覚関係は、全方位ミラー、USB カメラや IEEE1394 インターフェースを持つ Bumblebee など、必要に応じて様々な視覚系を搭載して実験を行うことを想定している。

また、通信系にはワイヤレスイーサネット (IEEE802.11b/g) を使用して、操縦卓のホスト PC とロボット搭載のリモート PC との間の通信を行う。ワイヤレスイーサネットに関しては、屋内で無線 LAN を構築するための機器が数多く販売されている。また、専用アンテナを用いて最大 20 km での高速無線 LAN を可能とするブリッジシステムも実用化されており、これは屋外大型移動ロボットに対して有効である。更に、今後予定している ETS-VIII を用いた衛星通信実験では、重量約 10 kg の専用のターミナルアダプタを用いることにより、衛星経由の無線 LAN (イーサネット) が構築可能である。

### 5.3 ロボットテストベッド走行実験

ワイヤレスイーサネットを介して、操縦者用ホスト PC およびロボット搭載リモート PC のそれぞれの上で動作するプロセス間をソケット通信によって結び、データ通信を行うことによりロボットを遠隔制御するシステムを開発した。操縦者はホスト PC の画面を見ながらジョイスティックによって入力を与えればよい。なお、遠隔操縦系のソフトについては今後 JAVA テクノロジーを使って、汎用性の高いものへと発展させていく予定である。

Fig.8 に屋内環境でテストベッドの走行実験を行った様子を示す。同図には、ロボットの走行中の写真に加えて、全方位映像および Bumblebee によるステレオ視処理画像を、周囲の様子を示している。

全方位視覚は周囲全体の状況を把握するのに有用であるが、移動ロボットにおいては特に進行方向に高い解像度が必要である。この問題を解決するため、非等方的性全方位視覚の研究も進められている [10]。また、不整地走行時には、足回りを注視する専用カメラ画像を合わせて参照することも重要であると考えられる。

## 6 あとがき

本稿では、筆者らが最近力点をおいて進めている不整地移動ロボットのテストベッドの開発状況を紹介し、移動ロボットの技術に衛星通信による遠隔操縦の技術を付加することにより、災害発生直後の初動情報収集

活動を効率的に行うためのネットワークロボットシステムを構築するコンセプトについて述べた。

今後は、これらの技術を搭載した屋外用大型ロボット、屋内探索用小型ロボットなどの複数のロボットを開発し、これら一群のロボットが協調的に情報収集活動を行うシステムを構築してゆく予定である。

## 7 謝辞

本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度「遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究」として実施中のものである。また、ロボットテストベッドの開発には、大川情報通信基金およびカシオ科学振興財団の支援もいただいた。

## 参考文献

- [1] [http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft\\_rover\\_wheels.html](http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft_rover_wheels.html)
- [2] 吉田, 濱野, 地面とタイヤの力学に基づいた探査ローバーのモデリングと制御, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会, 1J31, (2002), CD-ROM.
- [3] Kazuya Yoshida, Hiroshi Hamano, Motion Dynamics of a Rover With Slip-Based Traction Model, Proc. of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, May (2002), 3155-3160.
- [4] Kazuya Yoshida, Hiroshi Hamano, Toshinobu Watanabe, Slip-Based Traction Control of a Planetary Rover, Experimental Robotics VIII, Eds. by Siciliano and Dario, Springer (2003), 644-653.
- [5] 吉田, 渡辺, 水野, 石上, 月・惑星探査ローバーテストベッド「The Dune Explorer」の開発, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会, 3G13, (2003), CD-ROM.
- [6] 吉田, 渡辺, 水野, 石上, 月・惑星探査ローバーの砂地登坂における力学解析, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会, 3G12, (2003), CD-ROM.
- [7] Kazuya Yoshida, Toshinobu Watanabe, Noriyuki Mizuno, and Genya Ishigami, Slip, Traction Control, and Navigation of a Lunar Rover, Proc. of the 7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space: i-SAIRAS 2003, NARA, Japan, May 19-23, (2003), CD-ROM.
- [8] Genya Ishigami, Noriyuki Mizuno, Akiko Miwa and Kazuya Yoshida, Long Range Navigation on Desert by a Dual-Wheel Micro Rover, The 24th International Symposium on Space Technology and Science, Miyazaki, Japan, ISTS2004-k-07, (2004), 1-6.
- [9] 大都市大震災軽減化特別プロジェクト, III 被害者救助等の災害対応戦略の最適化, 平成 14 年度成果報告書 (2003)
- [10] 近藤, 八木, 谷内田, ロボットナビゲーションのための非等方的全方位視覚, Meeting on Image Recognition and Understanding 2004, 493-498, (2004).