

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21246122

研究課題名（和文） 地形認識および力学環境に注目した月・惑星・小惑星探査ロボットの運動制御

研究課題名（英文） Robot Control for Lunar, Planetary and Asteroid Exploration with Understanding of Geometry and Physical Characteristics of the Environment

研究代表者

吉田 和哉（YOSHIDA KAZUYA）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00191578

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、月、惑星、小惑星など、地球上とは力学条件の異なる環境において、移動探査を行うロボットの運動制御法の研究を実施し、今後の宇宙開発における探査の多様性に対応するための広範な移動探査技術を構築した。砂で覆われた軟弱地盤に対する車輪／クローラーの推進メカニズムを明らかにして設計指針を示し、画像およびレーザーセンサ等のデータを融合してロボットの自己位置を推定する手法などを開発し、フィールド実験にて検証した。

研究成果の概要（英文）：

Robotics technologies for lunar, planetary and asteroid exploration were investigated with understanding of geometry and physical characteristics of the environment. Traction model of wheels and tracks for traversing over loose-soil terrain was studied. Rover localization with integrating different types of sensors was also investigated and tested in outdoor field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2010年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2011年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2012年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
総計	33,300,000	9,990,000	43,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：月惑星探査、移動ロボット、地形計測、走行制御、スリップ推定、レーザーレンジセンサ

1. 研究開始当初の背景

各国の宇宙機関において、月、火星、小惑星、彗星などの探査、およびその利用が活発に議論されている。これらの探査において、車輪や脚によって移動が可能な探査移動ロボット（ローバー）の利用は、非常に有益であると期待されている。NASA（アメリカ航

空宇宙局）は、1997年のマース・パスファインダー・ミッション以来、火星に複数のローバーを送り込み、大きな成果を挙げてきた。

日本でも、2003年に打ち上げられたJAXA（宇宙航空研究開発機構）の「はやぶさ」ミッションにおいて、小惑星イトカワの探査に成功し、目覚しい科学観測成果を挙げるこ

ができた。本研究を開始した 2009 年には、まだ「はやぶさ」のカプセルは地球に帰還していなかったが、「はやぶさ」で構築された技術を継承・発展させ、探査対象を他の小惑星へと展開するため、「はやぶさ」後継機開発の議論は既に開始されていた。

2005 年に公表された JAXA 長期ビジョンには、今後 20 年間の進むべき方向として、国際協調による宇宙探査の重要性が謳われており、特に着陸や表面移動による月面の探査と利用、および小惑星探査の継続的推進が、主要な戦略として議論されている。わが国の得意分野であるロボット技術を活用し、月・惑星・小惑星の探査を推進することは、今後日本が宇宙開発分野でのリーダーシップを得るために、必要不可欠である。この状況はいまも変わらない。

月、惑星、小惑星表面を走行するローバーと、地球上でのローバーとの最大の相違点は、対象天体の力学的環境である。対象天体の表面の多くは、岩または細かい砂で覆われている。また、重力も地球上と異なり、小惑星上では、きわめて微小な値となる。さらに、月や小惑星の表面は高真空状態である。このような、力学環境の異なる場所では、地球上での動作を目的として設計されたローバーでは、期待通りの動作を実現することはできない。

以上のような背景のもと、本研究では、地形認識および力学環境に注目した月・惑星・小惑星探査ロボット（ローバー）の運動制御に関して、包括的な学理研究を実施し、今後の日本の月惑星探査計画に対して、いつでも貢献できる技術基盤を構築することを目指して、本研究を計画した。

2. 研究の目的

本研究課題では、月、惑星、小惑星など、地球上とは力学条件の異なる環境、たとえば、高真空、異なる重力、砂や岩に覆われた地表面などにおいて、移動探査を行うロボットの運動制御法の研究を推進し、今後の宇宙開発において探査対象の多様性に対応できる、広範な移動探査技術を確立することを目的とする。

具体的には、車輪型、脚型、クローラ型の惑星・小惑星探査ロボットに関して、以下に示す研究項目について重点的に研究を実施した。

- 車輪およびクローラ型ロボットにおける駆動力学のモデル化
- 真空環境における車輪／クローラ／脚と土壌との力学的相互作用の検討

- 地形の 3 次元計測と環境地図の構築
- 探査経路生成とその追従制御法
- 微小重力環境における移動探査法の開発
- 移動ロボットの力学シミュレーション手法の確立

3. 研究の方法

本研究で扱う研究項目は上述のように多岐にわたるが、以下の基本的な方法論に従って研究を実施した。

(1) 実験による基本現象の確認

力学に立脚したロボットの設計法や制御手法の開発においては、まず実際の物理現象の観察が不可欠である。例えば、ロボットと土壌の相互作用については、ロボットのテストベッドを砂箱の上で走行させ、様々な力学関係を計測することが全ての出発点となる。この実験プロセスにおいては、本来 3 次元でおこる現象を、1 次元や 2 次元に単純化して検証したり、本来、微小重力環境下で起こる現象を 1 G の実験室内で行うなど、現象の本質を捉えるための単純化を行った。

(2) 数学モデルの構築

上記の力学現象の観察に基づいて、現象を適切に記述する数学モデルを抽出した。数学モデルを導出し、実験により基本的なパラメータが同定できると、未経験の現象を適切に予測できるようになる。しかし多くの場合、このプロセスは容易ではなく、(1)と(2)の間で試行錯誤を繰り返した。

(3) 数学モデルに基づく計算機シミュレーション

ひとたび数学モデルが構築されれば、ロボットの動作を計算機によりシミュレーションすることが可能となる。シミュレーションの利点として、(1)のプロセスにおいて低次元で実験していたものを 3 次元に展開する、1 G 環境でしか実験できない事象に対して、微小重力環境での挙動を適切に予測できる、などのメリットが得られる。

(4) 実機モデルへの実装とフィールド試験

(1)～(3)のプロセスを経て開発した制御方式を研究評価モデル（実機テストベッド）に実装し、月惑星を模擬したフィールド環境で試験を行い、その性能を評価した。また、フィールド実験の結果を(1)～(3)にフィードバックすることにより、それぞれ、基礎実験の妥当性、数学モデルの妥当性、数値シミュレーションの妥当性などを評価した。

4. 研究成果

本研究において明らかにすることができた成果について、以下の 5 項目について要約

する。

(1) 車輪／クローラと軟弱土壌との相互作用力学のモデル化と設計指針の明確化

月の表面のほとんどの部分はレゴリスと呼ばれる粉末状の土壌で覆われており、車輪／クローラが推進力を及ぼすと、容易にすべり変形をする性質を持っている。火星は岩礫で覆われたエリアが多いものの、NASAの探査ローバーミッション(MER)においては、一見平坦なレゴリス上において立ち往生するなどのトラブルが起き、軟弱土壌における駆動力発生メカニズムの理解とその制御の重要性が注目されるようになった。

本研究では、図1に示すような斜面登攀の実験装置を用いて、車輪およびクローラの牽引力に関する定量的な評価と力学モデルの導出を行った。車輪表面にGrouserと呼ばれる板状の突起を設けることで牽引力が増大することが知られているが、Grouserの数や高さを変えて系統的な実験を行うことにより(図2参照)、以下の点を明らかにした。

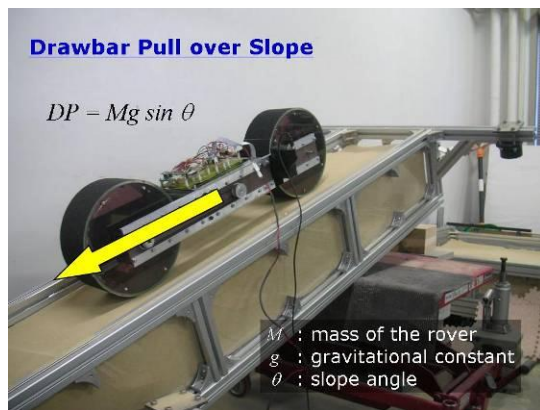


図1：砂斜面を用いた車輪登攀性能評価実験(土壌として豊浦砂および月レゴリス模擬砂を用いた)

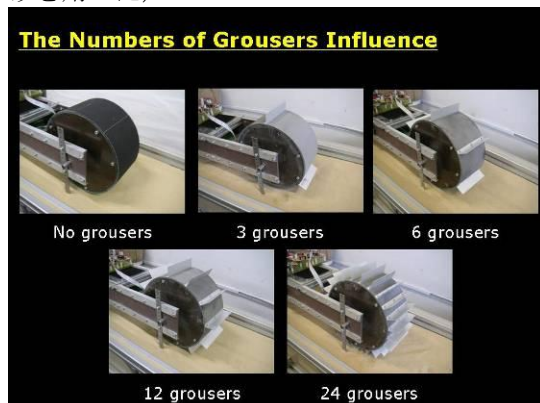


図2：車輪表面Grouserの違いによる比較検討実験の様子

- ① 車輪の砂斜面に対する登攀性能は、車輪径およびグラウザーの高さ・枚数に依存する。

車輪径を大きくすることにより性能は向上する。Grouserの効果も大きいですが、高さ・枚数の増大とともにその効果は飽和する。車輪のプロポーションを適切に設計すれば、斜度25度以上の登攀も可能である。

- ② クローラが斜面に密着できる場合には、高い登攀性能を発揮することができ、Grouserを適切に用いると、斜面のせん断限界(豊浦砂の場合30~35度)にまで迫ることができる。
- ③ 月レゴリスの模擬砂(内部摩擦角約37度)を用いた実験においても、①と同様の結果が得られた。月面は真空環境であるため、装置全体を簡易真空槽に入れる実験も行ったが、大気中のデータとの有意差は認められなかった。

(2) 分割型クローラを用いた急斜面への挑戦

(1)で明らかにしたようにクローラは原理的に高い牽引性能を発揮するが、クローラ一長よりも短い起伏がある地形では、クローラを地面に密着させることができない。そこで図3に示すTrackWalkerと名づける3つのクローラ体を能動リンク機構で結合した機構を考案した。

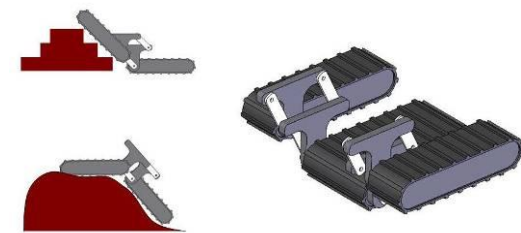


図3：TrackWalkerの構成図(右)。凹凸のある地形への適応のイメージ(断面図)(左)



図4：TrackWalker-IIのフィールド実験

この機構を用いると、図3左に示すように凹凸のある地形に適応できることがわかる。また、凹凸のない面上においては、2組のクローラをペダルのように交互に接地させることができ、せん断すべりを生じさせにくい効果があることが確認できた。

2012年3月、静岡県中田島砂丘にて、JAXAによって主催された月ロボットチャレンジでは、TrackWalkerの改良版であるTrackWalker-IIを用いてフィールド実験を行い、図4のように岩石と砂地が混在する斜面にて、高い登攀性能を実証することができた。

(3) レーザーレンジセンサによる3次元計測と環境地図の構築

未知の遠隔地においてローバーを走行させるためには、まず環境を適切に認識して地図情報を作成し、移動しながら地図エリアを拡大していかなければならない。地形情報の計測にはレーザーレンジセンサによる方式が有力である。さらに、移動の過程で得られた複数の地図をつなぎ合わせながら自己位置を同定する方法が重要であり、これはSLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 技術として知られている。

本研究の前半では、El-Dorado-IIと名づけた4輪型のローバーモデル(図5(a)参照)を用いて、そこに搭載されたレーザーレンジセンサ(Hokuyo-URG)によって得られた3次元のポイント・クラウド・データに、Iterative Closest Point (ICP) と呼ばれるアルゴリズムを用いて図5(b)のような3次元環境地形地図を作成するプログラムを開発した。

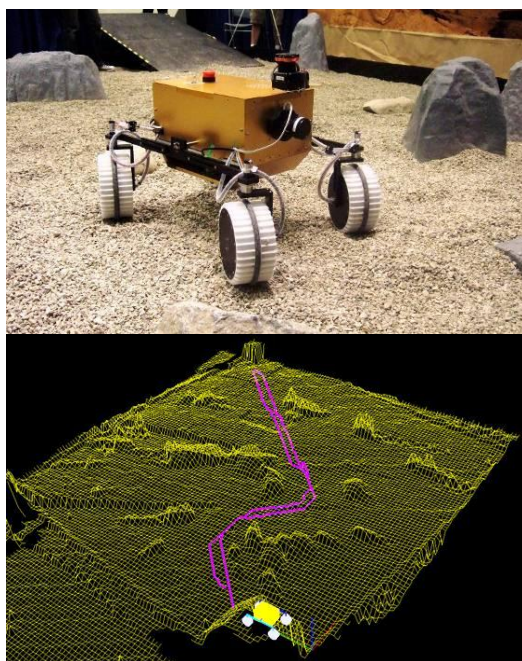


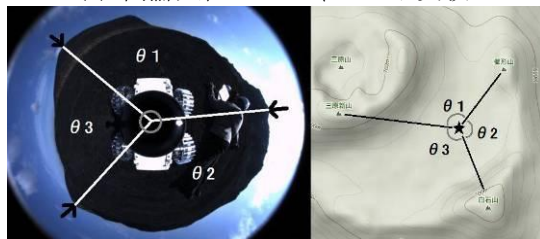
図5: (a) 4輪型ローバーモデル El-Dorado-II (上) (b) レーザーレンジセンサによって得られたポイント・クラウド・データにIterative Closest Point (ICP)アルゴリズムを用いて3次元地図を構築した例 (下)

2011年以降には、新たなセンサの組み合わせ方として、全方位カメラとレーザーレンジセンサ (InfiniSoleil FX8) を搭載したローバーモデル MoonRaker (図6(a))を開発した。

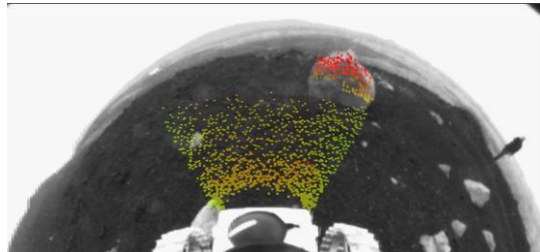
全方位カメラを用いると、1枚の画像の中にローバー近傍から遠方までの360度パノラマ画像を映し撮ることができる。遠方画像に注目し、山の頂点など既知のランドマークを同定することができると、図6(b)のようにローバーのグローバルな位置を推定することができる。中間域の画像については、連続する複数枚の画像差分よりオプティカルフローを抽出することにより、ローバーの移動方向および速度を推定することができる。近傍域の画像からは、ローバー自身の姿と近距離にある障害物を認識することができる。



(a) 阿蘇火山でのフィールド実験



(b) 山頂をランドマークとした自己位置推定



(c) 全方位画像 (一部) とレーザーレンジセンサの重畳による障害物認識

図6: 4輪型ローバーモデル MoonRaker

これら3種類(遠方、中間、近傍)の情報を適切に抽出して、ローバー本体に搭載した慣性センサの情報を融合することによって、実用的なSLAMが可能なることを、人工物のない自然環境(火山地形)でのフィールド実験を通して、技術的な見通しをつけることが

できた。図 6 (c) は、全方位画像の上にレーザーレンジセンサによる 3 次元データを重畳したものであり、ローバーを遠隔制御する場合を想定した操縦画面の例である。

(4) 小惑星探査に適した移動ロボットの技術開発

小惑星探査ローバーが動作する環境は、砂や岩に覆われた地形であることに加えて、微小重力であることが重要である。微小重力下で表面移動を行うためには、車輪やクローラー型は機能しない。はずみ車を内蔵し、ローバー全体が転げまわることによってホッピング（跳躍）を行う方式が、これまでに考えられてきた。本研究では、これに代わる新方式として、①脚機構を用いて積極的に表面にしがみ付き、伝い歩きをする方法、および②ロボット表面を絨毛で覆い、絨毛を振動させることにより、表面をなぞるように微小ホップを繰り返しながら移動する方法、の 2 つの方式について重点的な検討を行った。

いずれの場合も微小重力環境の模擬実験に工夫を必要とする。微小重力の近似方法として、石定盤の上で実験モデルを圧縮空気により浮上させ、摩擦の無い状況を作り出す方式が知られているが、本研究では定盤をわずかに傾け、小惑星表面における微小重力状態を模擬した。

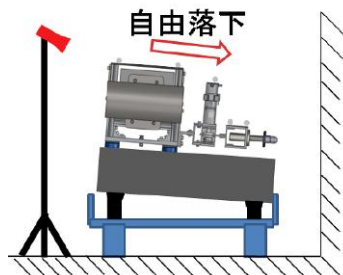


図 7: 傾けた定盤と空気浮上型モデルを用いた微小重力模擬実験

なお、本研究の発展として、「はやぶさ 2」に搭載される予定の小惑星表面移動探査用小型ロボットの開発を、大学研究コミュニティーを中心に実施することを検討した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① 永谷圭司, 大木健, Nathan Britton, 佐藤毅一, 野寄敬博, 高橋悠輔, 山内元貴, 秋山健, 吉田和哉, 伊豆大島における不整地移動ロボットの走行試験および自己位置推定試験, 日本惑星科学会誌, 査読有, Vol. 21, No. 2, 2012, pp. 121–129. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009477301>
- ② Masataku Sutoh, Junya Yusa, Tsuyoshi Ito, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, “Traveling Performance

Evaluation of Planetary Rovers on Loose Soil”, Journal of Field Robotics, 査読有, Vol. 29, 2012, pp.648–662.

DOI: 10.1002/rob.21405

- ③ Takeshi Ohki, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, “Local Path Planner for Mobile Robot in Dynamic Environment based on Distance Time Transform Method”, Advanced Robotics, 査読有, Vol. 26, 2012 pp.1623–1647. DOI:10.1080/01691864.2012.694648
- ④ Keiji Nagatani, Hiroaki Kinoshita, Kazuya Yoshida, Kenjiro Tadakuma, Eiji Koyanagi, “Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain”, Journal of Field Robotics, 査読有, Vol. 28, 2011, pp.950–960. DOI: 10.1002/rob.20415
- ⑤ Liang Ding, Zongquan Deng, Haibo Gao, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, “Planetary rovers' wheel-soil interaction mechanics: new challenges and applications for wheeled mobile robots”, Journal of Intelligent Service Robotics, 査読有, Vol.4, 2011, pp.17–38. DOI:10.1007/s11370-010-0080-5
- ⑥ Liang Ding, Haibo Gao, Zongquan Deng, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, “Experimental study and analysis on driving wheels performance for planetary exploration rovers moving in deformable soil”, Journal of Terramechanics, 査読有, Vol. 48, 2011, pp.27–45. DOI: 10.1016/j.jterra.2010.08.001
- ⑦ Giulio Reina, Genya Ishigami, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, “Odometry Correction Using Visual Slip-Angle Estimation for Planetary Exploration Rovers”, Advanced Robotics, 査読有, Vol. 24, 2010, pp.359–385. DOI:10.1163/016918609X12619993300548
- ⑧ Genya Ishigami, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, Slope Traversal Controls for Planetary Exploration Rover on Sandy Terrain, Journal of Field Robotics, 査読有, Vol. 26, 2009, pp. 264–286. DOI: 10.1002/rob.v26:3
- ⑨ Kazuya Yoshida, Achievements in Space Robotics, IEEE Robotics and Automation Magazine, 査読有, Vol. 16, 2009, pp. 20–28. DOI: 10.1109/MRA.2009.934818

[学会発表] (計 16 件)

- ① Nathan Britton, Kazuya Yoshida, Micro-Rover Design and Navigation with Minimal Sensors, 2012 PISCES Conference, 2012 年 11 月 13 日, Hawaii, U.S.A.
- ② Hiroaki Inotsume, Masataku Sutoh, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, “Slope Traversability Analysis of

- Reconfigurable Planetary Rovers”, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012年10月10日, Faro, Portugal
- ③ 永岡健司, 吉田和哉, 小惑星探査ローバのための織毛式マイクロホップの動力学解析, 第30回日本ロボット学会学術講演会, 2012年9月17日, 札幌
- ④ Kenji Nagaoka, Riku Takano, Takayuki Izumo, Kazuuya Yoshida, “Ciliary Micro - hopping Locomotion of an Asteroid Exploration Robot”, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2012年9月4日, Turin, Italy
- ⑤ 永岡健司, 高野陸, 出茂嵩之, 吉田和哉, 次期小惑星探査ロボットのための織毛推進機構の移動特性, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012年5月28日, 浜松
- ⑥ Masataku Sutoh, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuuya Yoshida, “Evaluation of Influence of Surface Shape of Locomotion Mechanism on Traveling Performance of Planetary Rovers”, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012年5月16日, St. Paul, U.S.A.
- ⑦ Hiroaki Inotsume, Masataku Sutoh, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, Kazuuya Yoshida, “Evaluation of the Reconfiguration Effects of Planetary Rovers on their Lateral Traversing of Sandy Slopes”, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012年5月16日, St. Paul, U.S.A.
- ⑧ M. Sutoh, K. Nagatani, K. Yoshida, “Analysis of the Traveling Performance of Planetary Rovers with Wheels Equipped with Lugs over Loose Soil”, Earth and Space 2012, 2012年4月16日, Pasadena, U.S.A.
- ⑨ Sutoh, M., Yajima, R., Nagatani, K., Yoshida, K., “Traveling performance estimation for planetary rovers over slope”, 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2011年12月22日, Kyoto, Japan
- ⑩ Ohki, T., Nagatani, K., Yoshida, K., “Safety path planning for mobile robot on rough terrain considering instability of attitude maneuver”, 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2011年12月20日, Kyoto, Japan
- ⑪ Masataku Sutoh, Keiji Nagatani, Kazuuya Yoshida, “Evaluation of influence of surface shape of wheel on traveling performance of planetary rovers over slope”, The 17th International Society of Terrain Vehicle Systems International Conference, 2011年9月22日, Blacksburg, U.S.A.
- ⑫ Ishigami, G., Nagatani, K., Yoshida, K., “Path Planning and Evaluation for Planetary Rovers Based on Dynamic Mobility Index”, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011年9月26日, San Francisco, U.S.A.
- ⑬ Masataku Sutoh, Tsuyoshi Ito, Keiji Nagatani, Kazuuya Yoshida, “Influence Evaluation of Wheel Surface Profile on Traversability of Planetary Rovers”, SI International 2010, 2010年12月21日, Sendai, Japan
- ⑭ M. Sutoh, J. Yusa, K. Nagatani, K. Yoshida, “Traveling Performance Evaluation for Planetary Rovers on Weak Soil”, 10th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2010年8月31日, Sapporo, Japan
- ⑮ K. Nagatani, H. Kinoshita, K. Yoshida, K. Tadakuma, E. Koyanagi, “Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain”, 2010 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, 2010年7月27日, Bremen, Germany
- ⑯ Liang Ding, Keiji Nagatani, Keisuke Sato, Andres Mora, Kazuuya Yoshida, Haibo Gao, Zongquan Deng, “Terramechanics-based High-Fidelity Dynamics Simulation for Wheeled Mobile Robot on Deformable Rough Terrain”, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010年5月6日, Anchorage, Alaska, U.S.A.

[その他] ホームページ

<http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 和哉 (YOSHIDA KAZUYA)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00191578

(2) 研究分担者

永谷 圭司 (NAGATANI KEIJI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80314649

中西 洋喜 (NAKANISHI HIROKI)
東北大学・大学院工学研究科・助手
研究者番号：90361120
(平成 21 年度)

永岡 健司 (KENJI NAGAOKA)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：60612520
(平成 23～24 年度)

(3) 連携研究者

なし