

# 能動接地角制御およびT型ラグの利用による クローラ型移動ロボットの斜面横断走行性能の向上

山内 元貴<sup>\*1</sup>, 永谷 圭司<sup>\*1</sup>, 吉田 和哉<sup>\*1</sup>, 茂木 正晴<sup>\*2</sup>, 藤野 健一<sup>\*2</sup>

## Improvement of Slope Traversability for a Tracked Vehicle with Active Reconfiguration and T-shaped Grousers

Genki Yamauchi<sup>\*1</sup>, Keiji Nagatani<sup>\*1</sup>, Kazuya Yoshida<sup>\*1</sup>,  
Masaharu Moteki<sup>\*2</sup> and Ken'ichi Fujino<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University  
6-6-01, Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan

<sup>\*2</sup> Public Works Research Institute(PWRI)  
1-6, Minamihara, Tsukuba, Ibaraki, 300-2621, Japan

When an active volcano erupts, it is expected for tele-operated robots to observe its condition in restricted area, remotely. However, the target environment includes slopes made by loose soil, and it has a potential to fail a traversal on such fields. To relieve the problem, in this study, two approaches are presented for a multi-D.O.F. tracked vehicle. The first one is a contact angle control of tracks with changing configuration of the robot. The second approach is to use T-shaped Grousers instead of usual I-shaped them. They have lugs in both longitudinal and lateral directions to reduce the side-slip. In this paper, we model the target robot, called Elf, and evaluate our two methods based on the field and indoor experiments.

**Key Words** : Slope traversability, Reconfigurable tracked vehicle, T-shaped grouser

### 1. 緒 言

日本は、数多くの火山を有する火山大国である。現在、日本国内に110もの活火山が存在しており、これまでも、火山噴火により発生する火砕流や、降灰と降雨により発生する土石流といった自然災害によって、周辺地域に甚大な被害がもたらされてきた<sup>(1)</sup>。そのため、火山噴火による危機回避のために、噴火予測や住民の避難計画の策定を行う上で、活動中の火山監視を行うことは、非常に重要である。しかしながら、火山噴火が活発になり、噴火警戒レベルが高くなると、周囲数kmが立ち入り禁止となるため、事前に設置した観測装置が噴火等により故障した場合は、得られる情報に制限が生じる可能性がある。また、火山噴火が終息した後も、土石流などの災害が懸念され、一般に人の立ち入りが長期にわたり禁止される。このような背景の下、立ち入り禁止区域内における移動ロボットによる火山探査・観測の実現が期待されている。

そこで、我々の研究グループでは、不整地移動ロボッ



Fig. 1 Mobile robot in rough terrain "Quince"

ト Quince や TrackWalker を用いて、浅間山や三原山などの活火山にて走行試験を行ってきた<sup>(2)(3)</sup>。これらの走行試験では、軟弱地盤走行を想定し、複数の突起(ラグ)をこれらのロボットのクローラに取り付けることで、砂利で覆われた火山環境において高い走破性能を発揮した(図1)。しかしながら、Quinceが斜面横断(等高線方向に走行)中、横滑りや進行方向の急激な変化といった問題が生じた。例えば、浅間山での

<sup>\*1</sup> 東北大学 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01) {yamauchi, keiji, yoshida} @astro.mech.tohoku.ac.jp

<sup>\*2</sup> 土木研究所 (〒 300-2621 茨城県つくば市南原 1-6) {moteki, fujino} @pwri.go.jp

走行試験において、Quince が斜度 30 度の斜面を横断走行したとき、斜面下向きに絶えず横滑りを起こしたため、目標経路を追従することが困難であった。また、斜面を直登（最大傾斜方向に走行）中に、クローラの一部が地面を深くえぐり、走行不能になるといった問題も生じた。

以上より、軟弱地盤が広範囲に存在する火山における探査を地表面移動して行うロボットには、高い斜面走行能力を有している必要があることがわかる。そのため、特に火山探査を行う移動ロボットに関して、斜面走行性能の研究を行うことは非常に重要である。

これまでに、斜面横断走行性能に関する研究として、いくつかの報告がなされてきた。Wettergreen �らは車輪型移動ロボットを用いて、車輪を昇降させて斜面横断時に、横滑りを低減できることを実験的に示した<sup>(4)</sup>。Inotsume らは、斜面横断時における車輪型移動ロボットのモデル化と横滑りの低減要因の検討を行い、その要因として挙げられる車輪接地角の変化と重心位置の変化のうち、車輪接地角の変化が支配的であることを報告した<sup>(5)</sup>。上述の通り、これまでの斜面走行に関する研究の多くは、対象環境が月などの地球外環境を想定していたため、走行効率や機構の簡略化等から走行機構として車輪が選ばれてきた。

これに対し、対象が地球上の火山などの広範囲不整地環境では、一般に車輪よりも不整地走破性能は高いとされるクローラを有するロボットが適している。しかしながら、クローラ型移動ロボットに関して、接地角を変化させた際の斜面横断性能を定量的に検証した例は見受けられない<sup>(7)</sup>。

一方、車輪型移動ロボットが軟弱地盤を走行する際に、ラグの長さや個数を最適化することで、走行性能が向上することが知られている<sup>(8)</sup>。しかしながら、ラグの長さや個数の変化させた際の走行性能の評価が行われてきた一方で、ラグの形状を変化させて軟弱地盤上で走行性能を評価した報告は多くない<sup>(9)</sup>。

そこで、本研究では、斜面に対してクローラの接地角を変化させた際の斜面横断性能を検証すると共に、進行方向及び横滑り方向に垂直なラグ（以下、T型ラグ）をクローラに取り付け、斜面横断時における走行性能の評価を行うこととした。

本稿では、まず、本研究で用いる移動ロボットについて説明する。次に、斜面横断時におけるクローラに働く力を示した後、接地角変化およびT型ラグの利用による斜面横断走行性能の向上手法について説明する。最後に、走行実験とその結果を示し、結果に対する考察を行う。



Fig. 2 Mobile robot in rough terrain "Elf"

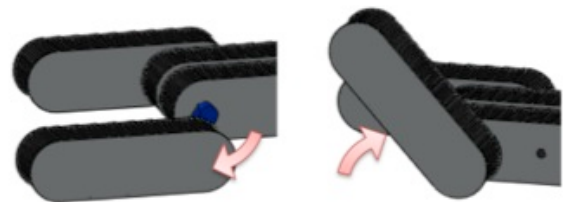


Fig. 3 Oscillation and rotation

## 2. 制 御 対 象

本研究では、図 2 に示す移動ロボット"Elf"を制御対象とした。Elf は、火山等の軟弱地盤走行を想定し、筆者の所属する研究室で開発されたクローラ型移動ロボットであり、6つのクローラから構成され、合計 11 自由度を有している<sup>(6)</sup>。ロボットの中心にある 2つのクローラ（以下、メインクローラ）は、クローラ間のスライド機構が動作（昇降動作）することにより、上下方向にメインクローラ間の相対位置を変更することができる。また、前後左右にある 4つのクローラ（以下、サブクローラ）は、メインクローラと 2 自由度のリンク機構で接続されているため、姿勢を変えずに位置を変化させる揺動動作ならびに姿勢を変化させる回転動作を同時に行うことが可能である（図 3）。斜面が一様である場合、上述の昇降動作、揺動動作を行うことにより、Elf は、図 4 に示すように、クローラの接地角を変化させることができる。なお、各クローラには、進行方向に対して垂直に長さ 5 cm のラグを取り付けている。Elf の諸元を表 1 に示す。

Elf には、内界センサとして、3 軸ジャイロセンサ、3 軸加速度センサおよび 11 自由度分の各駆動モータにエンコーダが搭載されている。ロボットの姿勢（ロール角、ピッチ角、ヨー角）は、3 軸ジャイロセンサおよび 3 軸加速度センサから推定する。



Fig. 4 Normal/Leveled configuraion

Table 1 Specification of "Elf"

Length	max 1490 [mm]
Width	630 [mm]
Height	236 [mm]
Weight	48 [kg]
Main-track (L × W × H)	699 [mm] × 120 [mm] × 136 [mm]
Sub-track (L × W × H)	452 [mm] × 120 [mm] × 136 [mm]

### 3. 斜面横断時の静力学モデル

図5に、斜度 $\alpha$ の斜面に沿って、横断走行する移動ロボットの力学モデルを示す。ロボットのロール角 $\theta_{roll}$ は、重力加速度方向を0degとし、クローラの接地角 $\varphi$ は、斜面とクローラがなす角とする。図5の場合、接地角 $\varphi$ が0degで斜度 $\alpha$ の斜面にロボットを接地させているため、 $\theta_{roll} = \alpha$ となる。接地角と斜度、ロボットのロール角の関係を式(1)に示す。

$$\alpha = \theta_{roll} + \varphi \quad (1)$$

ロボットには、ロボット自身の質量による重力 $W$ が働く。また、その反力として、各クローラには $F_i$ が働く。ここで、 $i$ はクローラの番号である。 $F_i$ は成分として、 $y$ 方向の抗力 $F_{yi}$ （以下横滑り抗力）、 $z$ 方向に垂直抗力 $F_{zi}$ を持つ。

ロボットが斜面上で静止している場合、以下の数式が成り立つ。

$$\mathbf{W} = \sum_{i=1}^6 \mathbf{F}_i \quad (2)$$

一般に、横滑り抵抗は、クローラ表面と地面間に生じる摩擦である。ロボット質量による重力 $W$ が、 $y$ 方向に働く力 $W \sin \alpha$ が $F_{yi}$ よりも大きくなった場合に、横滑りが生じる。

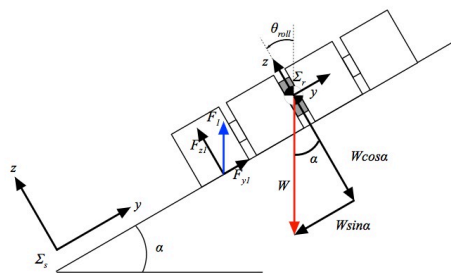


Fig. 5 Normal contact

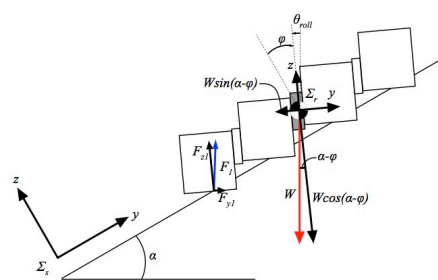


Fig. 6 Leveled contact

### 4. 能動接地角制御による斜面横断性能の向上手法

Inotsume らは、車輪の接地角を変化させることで、斜面横断性能の向上<sup>(5)</sup>ことを報告した。クローラ型移動ロボットでも同様に、クローラの接地角を制御することで、斜面横断性能の向上を図る。

**4.1 接地角変化時における力学モデル** 図6に、接地角を変化させた状態のロボットに働く力を示す。

図5と同様に、静止座標系は、斜面法線方向に $z$ 軸、斜面方向に $y$ 軸をとる。また、静止座標系をロボットのロール角だけ回転させたロボット座標系を定義する。クローラの接地角が $\varphi$ のとき、ロボットに働く力は、 $y$ 方向に $W \sin(\alpha - \varphi)$ 、 $z$ 方向に $W \cos(\alpha - \varphi)$ となる。各クローラが地面から受ける力は、垂直抗力 $F_{zi}$ と横滑り抗力 $F_{yi}$ である。

**4.2 制御手法** ロボットは、斜面走行中に斜面の実際の斜度を知ることは、測域センサ等を用いて環境を認識しない限り困難である。また、接地角とは軟弱砂利斜面とクローラとの相互作用によるものであり、クローラの接地角を計測することも難しい。一方で、走行中であってもロボットに搭載されたジャイロセンサや加速度センサから、ロボットの姿勢を推定することは可能である。式(1)において、外界センサを用いない場合、ロール角 $\theta_{roll}$ は推定可能である一方、斜度 $\alpha$ および接地角 $\varphi$ を知ることはできない。

そこで、ロボットの姿勢を変化させることでロール

角  $\theta_{roll}$  を制御することにより、接地角  $\varphi$  と斜度  $\alpha$  を等しくさせることを考える。(1)式より、ロボットのロール角  $\theta_{roll} = 0$  のとき、 $\varphi = \alpha$  となる。よって、 $\theta_{roll} = 0$  となるように、メインクローラの昇降動作とサブクローラを揺動動作を制御する。

メインクローラの昇降に関しては、ロール角  $\theta_{roll}$  を入力とし、昇降速度を出力としたPID制御を実行する。また、各クローラを均等に接地させるため、揺動動作によるサブクローラの上下方向の変位量は、メインクローラの昇降部の変位量と同じにする必要がある。この動作を実現するために、揺動動作はメインクローラの昇降変位と同期させる。

### 5. T型ラグの利用による斜面横断性能の向上手法

4章では、接地角変化による斜面横断性能の向上手法に関して説明した。ロール角  $\theta_{roll}$  を  $0\text{deg}$  に維持するところで、接地角を斜度と等しくなり、横滑りの低減が期待できる。しかしながら、これまでの研究により、車輪型移動ロボットでは、接地角変化を行った場合についても、走行する斜面によって一定の横滑りが発生することが確認されている<sup>(10)</sup>。これは、斜度が大きくなるに従い、斜面表面の土壌が崩れやすくなるため、移動機構が接地している土壌が斜面下方向に崩壊することが原因であると考えられている。

同様の問題は、斜面を直登する場合にも存在する。斜面直登時には、斜度に応じて、斜面と平行に下方向へ働く力が大きくなる。その結果、斜面表面とロボットの接地している箇所間に働く摩擦力が大きくなり、斜面が崩れることで、スリップを生じる。この問題の対策として、軟弱地盤を走行する多くの車輪/クローラ型移動ロボットには、ラグが取り付けられている。

一方で、斜面横断走行時の発生する横滑りに対して、4章で述べた姿勢変化による横滑りの低減を試みている研究はあるが、ラグの形状を変化させている研究は見受けられない。そこで、本研究では、クローラの接地角変化に加えて、横滑り方向に垂直にラグ(図7)を取り付けることにより、同情から支持力を得る手法の検証を行うこととした。

ただし、対向型のクローラは、旋回時に横滑りを生じながら回転するが、進行方向と平行にラグを取り付けることにより、旋回時にラグが大きな抵抗になる。そこで、本研究では、ロボットは信地旋回をしないこととする。

ラグは長さ  $10\text{ cm}$   $\times$  高さ  $5\text{ cm}$  の硬質ゴムをT型になるよう構成したものを、メインクローラ部のみに取り付けた。サブクローラも含めたすべてのクローラに、T型ラグを取り付けると、旋回性能が著しく低下する

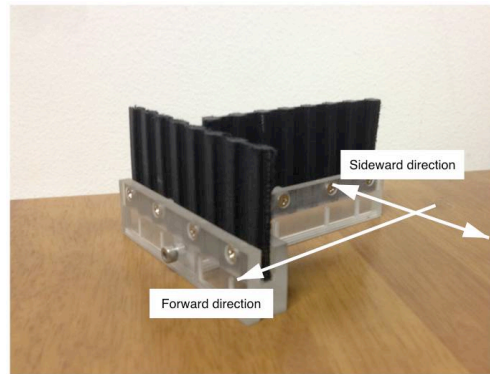


Fig. 7 T-shaped grouser

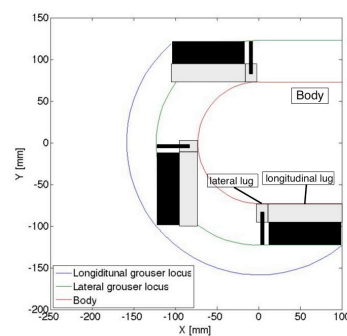


Fig. 8 Grousers locus

ことが予想されたため、サブクローラ部には、通常のラグを取り付けることとした。また、T型ラグに関して、進行方向と垂直なラグは、クローラベルトが回転した際にもクローラ本体との相対距離が変わることはない。一方で、進行方向と平行なラグは、図8に示すように、クローラの円弧の部位では、クローラ本体との相対距離が変化する。そのため、T型ラグの進行方向と垂直なラグ部のみ、クローラベルトに固定することとした。

## 6. 実験

**6.1 評価指標** 軟弱斜面の横断走行性能の評価指標の一つとして、スリップ角がある。スリップ角とは、ロボットの目標進行方向と、実際の進行方向がなす角のことである。目標方向の速度を  $v_x$ 、目標方向と垂直な方向の速度を  $v_y$  とした時、スリップ角  $\beta$  は、次式で定義される。

$$\beta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x} \quad (3)$$

$\beta$  は、斜面横断時におけるロボットの横滑り量の度合いを示した数値であり、 $\beta$  が小さいほど、走行する斜面に対して、ロボットの走行性能が高いと言える。



Fig. 9 Experimental field

なお、本試験では、移動ロボットの移動量を逐次的に計測する装置がなかったため、ロボットの走行開始地点から走行終了地点までの x 方向および y 方向の移動量 ( $l_x, l_y$ ) を用いて、次式で定義する平均スリップ角  $\bar{\beta}$  を評価指標とすることとした。

$$\bar{\beta} = \tan^{-1} \frac{l_y}{l_x} \quad (4)$$

**6.2 模擬斜面における走行試験** クローラの接地角制御および T 型ラグが横滑りに与える影響を評価するため、軟弱砂利斜面フィールドを構築し、”Elf”を用いて斜面走行試験を行った。

軟弱砂利斜面は、土木研究所内の無人化建機の遠隔操作実験場内に、関東ローム層を斜面形状に締め固め、碎石で覆い、その表面をならすことで構築した。構築した斜面は、長さ 5m × 幅 3[m]、斜度約 20 度、碎石の粒径は 2~10 cm である (図 9)。

接地角制御およびラグ形状に関して、以下の条件で走行試験を行った。ロボットの目標走行速度は 10cm/s に設定し、試験は各条件につき 3 回、計 12 回行った。

- (1) 接地角制御なし、T 型ラグなし
- (2) 接地角制御なし、T 型ラグあり
- (3) 接地角制御あり、T 型ラグなし
- (4) 接地角制御あり、T 型ラグあり

なお、斜面横断走行性能の評価指標にスリップ角を用いる場合、斜面下方向への移動が、横滑りによるものか、ロボットの進行方向の変化によるものか判断することはできない。そこで、本試験では、ロボットの進行方向が一定となるように、左右のクローラの回転数を制御することで、進行方向の変化による横滑り量の影響を取り除いた。

**6.3 実験結果** 図 10 に、移動距離から計算した平均スリップ角を示す。また、図 11 に走行中のロボットのロール角および旋回角 (ヨー角) の変動を示す。

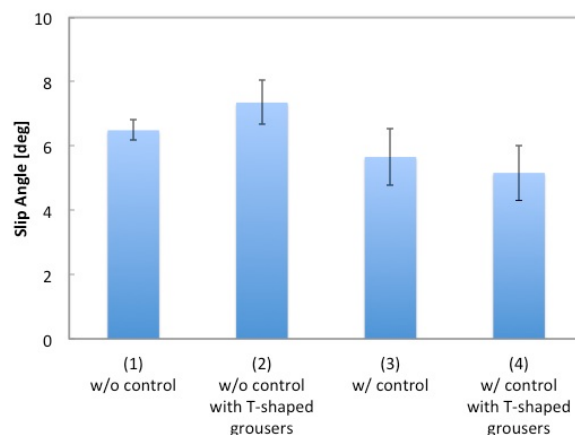
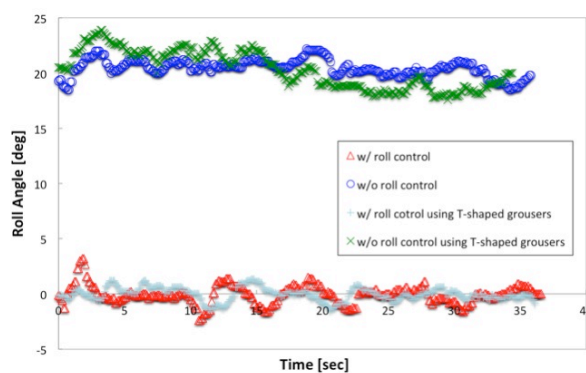
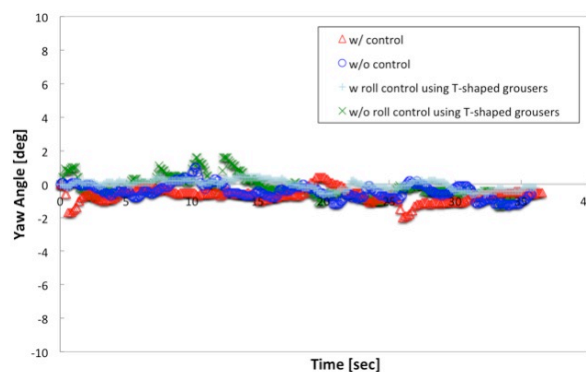


Fig. 10 Experimental results (slip angle)



(a) Roll Angle



(b) Yaw Angle

Fig. 11 Experimental results (robot posture)

図 11(a) では、接地角制御を行っている場合、ロボットのロール角は、多少振動しているがほぼ 0 deg に保たれている。このことから、接地角制御により、クローラの接地角は斜面の斜度と、同じ値を維持していることがわかる。一方で、接地角制御を行っていない場合、ロール角は、斜面の斜度になっている。また、接地角制御の有無にかかわらず、ロボットのヨー角もほぼ 0deg に保たれており、走行後に計測した y 軸方向への移動

## 参 考 文 献



Fig. 12 Grousers on the slope

量のほとんどは、横滑りに生じたものであると言える。

接地角制御を行っていない条件(1,2)に対し、接地角を制御している条件(3,4)では、平均スリップ角が小さくなる傾向があった。しかしながら、条件(3,4)の走行中に、平均スリップ角は条件(1,2)とほぼ同等の数値になることがあった。これは、接地角制御によりエッジを立てたラグが、碎石の上を走行する際に、接地が局所的になることでロボットを支える摩擦力を得ることができず、横に滑り落ちたことが原因と考えられる。

一方で、T型ラグの利用による、横滑りの減少は認められなかった。締め固められた関東ローム層や斜面の粒径に対して、ロボットの重量が比較的軽かったため、図12に示すように、ラグが土壌に十分に刺さらず。その結果、土壌から支持力を得ることができなかったことが原因であると考えられる。

## 7. 結 言

本研究では、接地角制御およびT型ラグの利用による軟弱砂利斜面における横断走行性能を評価した。クローラの接地角を制御することにより、横断走行性能の向上がみられた。一方で、進行方向および横滑り方向に垂直にラグを取り付けたT型ラグを利用した場合、本研究で行った斜面横断走行試験において、斜面横断性能は向上しないことを確認した。

今後は、複数の斜度や粒径において走行試験を行い、接地角変化およびラグ形状が、斜面走行性能に与える影響を検証する予定である。

- (1) 杉本伸一, 長井大輔, "雲仙火山 1991 年 6 月 3 日の火砕流による人的被害", 九大理研報 (地球惑星), Vol. 22, Issue 3(2009), pp. 9-22
- (2) 永谷圭司, 桐林星河, 西村健志, 吉田智章, 小柳栄次, 羽田靖史, 油田信一, 中里邦子, 久武経夫, 森山裕二, "小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察 高出力の無線通信を用いた浅間山でのフィールド実験", 第 12 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 論文集 (2011), pp.54-57.
- (3) Keiji Nagatani, Hiroaki Kinoshita, Kazuya Yoshida, Kenjiro Tadakuma and Eiji Koyanagi, "Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain", *Journal of Field Robotics*, Vol. 28, Issue 6(2011), pp. 950-960.
- (4) D. Wettergreen, S. Moreland, K. Skonieczny, D. Jonak, D. Kohanbash, and J. Teza, "Design and Field Experimentation of a Prototype Lunar Prospector", *The International Journal of Robotics Research*, vol.29, No.12(2010), pp.1550-1564.
- (5) Hiroaki Inotsume, Masataku Sutoh, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida, "Modeling Analysis and Control of Actively Reconfigurable Planetary Rover for Traversing Slopes Covered with Loose Soil", *Journal of Field Robotics*, Vol. 30, Issue 6(2013), pp.1-22.
- (6) 野寄敬博, 永谷圭司, 吉田和哉, 小柳栄次, "クローラ接地角変化による不整地移動ロボットの斜面横断走行性能の向上", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2012, 1P1-G11 (2012).
- (7) 山本博昭, "揺動クローラ型不整地走行車両の開発 (第 1 報) 試作車両と走行部の特性", 農業機械学会誌, Vol. 56, Issue 1(1994), pp. 3-12.
- (8) Masataku Sutoh, Junya Yusa, Tsuyoshi Ito, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, "Traveling Performance Evaluation of Planetary Rovers on Loose Soil", *Journal of Field Robotics*, Vol. 29, Issue 4(2012), pp.648-662.
- (9) Kojiro Iizuka and Takashi Kubota, "Study of Flexible Wheels for Lunar Exploration Rovers: Running Performance of Flexible Wheels with Various Amount of Deflection", *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vo. 7, Num. 2(2009).
- (10) 猪爪宏彰, 須藤真琢, 永谷圭司, 吉田和哉, "車体の重心移動が移動ロボットの軟弱地盤横断時の走行性能に与える影響の評価", 日本機械学会 第 12 回 運動と振動の制御シンポジウム (MOVIC2011), B108.