

# クローラの接地荷重情報を利用した多自由度クローラ型移動ロボットの走行制御

Motion Control of a multi-D.O.F. Tracked Vehicle Using the Information of Contact Load.

○野寄 敬博 (東北大), 永谷 圭司 (東北大), 吉田 和哉 (東北大), 小柳 栄次 (千葉工大)

○Takahiro NOYORI, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA, Tohoku University,  
{noyori, keiji, yoshida}@astro.mech.tohoku.ac.jp  
Eiji KOYANAGI, Chiba Institute of Technology, koyanagi@furo.org

To plot people's evacuation from volcanic disasters, robotic remote observation system would be quite useful. Thus, we performed several field tests in some volcanic environments using tracked vehicles. As the result of those experiments, We have discovered some problems of locomotion of tracked vehicles in weak and uneven terrain. To solve those problems, we developed a multi-D.O.F. tracked vehicle. In this research, to solve the problem of slippage in case of slope climbing, we developed sensing system to measure the contact load of the robot and propose a control scheme of 2-D.O.F subtracks which is relied on the contact data. In this paper, we introduce the system and the scheme and report the result of indoor experiments.

Key Words : Tracked vehicle, Volcano exploration

## 1 はじめに

活火山が多い日本では、火山の火口付近の状況を観察することは、火山による災害を防ぐ上で非常に重要である。しかしながら、火山の活動レベルが高い状況下で、人間が火口付近まで立ち寄り、観察することは非常に危険であるため、噴火警戒レベルが高い火山では、人間の立ち入りは禁止される。そこで、本研究グループでは、小型移動ロボットによる火山観察が有用と考え、地下街・不整地走行用ロボットQuinceや、不整地・軟弱地盤走行用ロボットTrackWalker・TrackWalkerIIを用いて、実際の活火山において走行実験を行ってきた[1]。これら2つのロボットは、これまで研究開発されてきた小型の不整地走行用ロボットと比較して高い走行性能を発揮したが、火山環境の走行にいくつかの問題点が見られた。

まず、斜面横断時の横滑りや進行方向の変化である。小浅間山の試験において、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、15m以上の斜面横断はできず、ときおり斜面上向きに旋回をするか、15度ほど登坂する方向で走行することが必要であった。

次に、斜面直登時に生じるスリップや、スリップによって地盤を深く削ってしまうことによって動けなくなる現象であるスタックである。25度を超える斜面では、斜面上の凹凸に乗り上げる際、接地面積が減少することでスリップが生じ、地面を掘ってしまうことによってスタックが生じることもあった。

そこで、本研究グループでは、QuinceやTrackWalkerよりも火山環境において高い走行性能を持つことを目的に、多自由度クローラ型移動ロボットELF(図1)を開発した。ELFは、中央2つのメインクローラと、外側4つのサブクローラの合計6つのクローラで構成されるロボットであり、合計11自由度を有する。ELFのサブクローラ



Fig. 1: Overview of the robot

は、1本のリンクを介してメインクローラと接続されており、リンクの回転とサブクローラの回転の2自由度の回転が可能なサブクローラ(以下2自由度サブクローラ)となっている。また、2つのメインクローラは、スライド機構で接続されており、2つのメインクローラの相対的な上下位置を変更できる。

過去に、斜面横断時の問題に対して、2自由度サブクローラとスライド機構を用いてクローラの接地角を変化させることで斜面横断時の走行性能が向上することを報告した[2]。

続いて、本研究では、斜面直登時の問題に対して、2自由度サブクローラを地形に合わせて適切に操作し、大きな接地面積で接地圧を低く保ったまま走行することで、凹凸のある軟弱地盤での低スリップの走行を目指す。しかしながら、4つの2自由度サブクローラの合計8自由度を人の手で適切に操作することは困難である。そこで、本研究では、クローラの接地荷重を計測するクローラを開発し、それから得られる情報を利用した2自由度サブクローラの制御を提案する。本稿では、開発した接地荷重計測クローラの概要と2自由度サブクローラの制御手法、室内環境で行った提案手法の評価について述べる。



Fig. 2: FSR-402

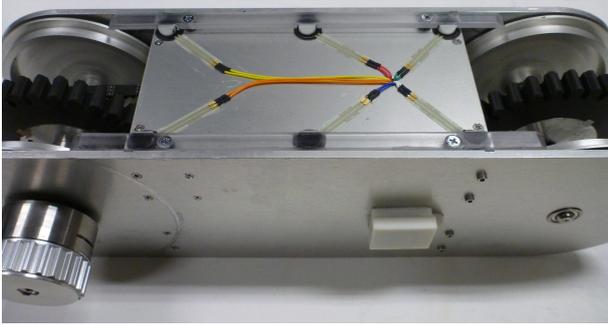


Fig. 3: Bottom view of the subtrack

## 2 接地荷重計測クローラの開発

### 2.1 使用したセンサとセンサの設置

クローラの接地荷重を計測するため、クローラベルトとの摺動部であるクローラのボディに接着されているベルトガイドと、クローラのボディとの間に、厚みが0.46[mm]と薄型の、Interlink社製の感圧抵抗素子FSR-4022を挿入した。図3は、クローラベルトを外したサブクローラの底面である。図中上下の透明の角棒がベルトガイドであり、この下に片側3個、合計6個のセンサが挿入されている。メインクローラ底面にも同様に、片側8個、合計16個のセンサを挿入した。

横方向から見たセンサ設置図を図4に示す。センサの感圧部全体に均等な分布で荷重をかけることに加え、感圧部ではないセンサ縁の部分へ荷重がかからないようにするため、感圧部の大きさと等しいゴムシートをセンサ表面に接着した。さらに、ベルトガイドの幅がセンサの大きさに対して小さいため、ベルトガイドに大きさを補うパッドを取り付けた。また、センサを取り付けると、ベルトガイドをボディに密着して固定することが不可能になる。そこで、ベルトガイドにボルトを埋め込み、リニアブッシュの中を通し、センサに荷重がかからない位置でセルフロックナットを用いて固定した。このことにより、ベルトガイドが抜け落ちことを防ぐとともに、ベルトガイドにかかる水平方向の力はこのボルトで受け止められ、垂直方向の力のみがセンサ面にかかる構造となる。

### 2.2 基本評価試験

本センサシステムの性能を検証するため、基本的な評価試験を行った。実験は、サブクローラを独立して水平面を速度10[cm/s]で走行させ、各センサの履歴を0.1秒ごとに記録した。

図5にサブクローラ単体で走行したときのセンサの履歴を示す。この図は、サブクローラに配置した6つのセンサについて、クローラ前後方向の位置が等しい2つのセンサの和をとり、荷重に変換した前中後の3つの値と

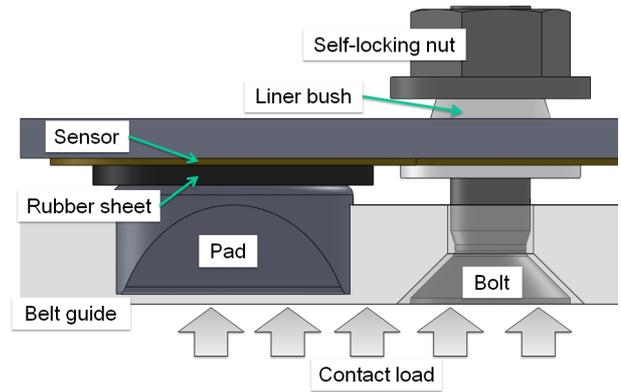


Fig. 4: Sensor layout

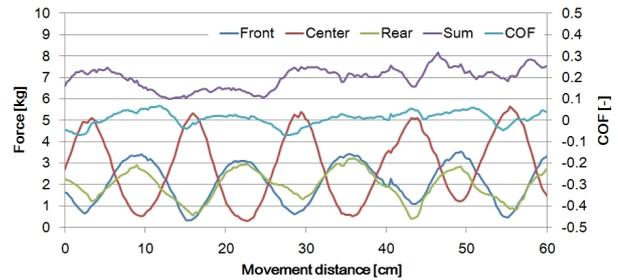


Fig. 5: サブクローラのみで水平面を走行したときの荷重履歴

その合計値、次式で求めた荷重中心位置COFをプロットしたものである。

$$COF = \frac{\sum x_n f_n}{LS} \quad (1)$$

ここで、センサで得られた荷重値を $f_n$ 、センサの前後方向の位置(クローラ中央を原点とし、前方を+とする)を $x_n$ 、センサで得られた荷重値の総和を $S(S = \sum f_n)$ 、クローラ軸間距離を $L$ とする。

まず、総荷重に注目すると、最大で8.1[kg]、最小で6.0[kg]、時間平均は7.1[kg]であった。サブクローラの質量は、6.6[kg]であるため、誤差はそれぞれ、+23[%]、-9[%]、8[%]となった。この誤差の原因としては、キャリブレーションのずれや接触するラグが移り変わる際の動的要因、ベルトの張力による影響などが考えられる。

次に、センサにかかる荷重は、クローラの並進によって大きく変化していることが分かる。この原因は、クローラに取り付けられているラグの位置が変化するためである。クローラの荷重は、接地しているラグにかかるため、センサ直下にラグが位置するとき荷重が大きく測定される。移動距離が10[cm]付近のときは、前後それぞれのセンサの直下にラグが位置し30[cm]付近のときは、中央のセンサの直下にラグが位置している。

さらに、荷重中心位置COFに注目する。サブクローラの重心はサブクローラのほぼ中央にあるため、 $COF = 0$ となることが理想的である。図より、荷重中心位置は、-0.1から0.1の間に収まっており、荷重の分布は大きく変化するものの、荷重中心位置は正しく測定できていると言える。

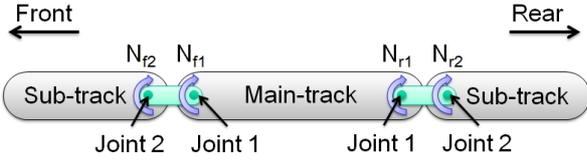


Fig. 6: Definition of the Origin

### 3 制御手法

軟弱地盤を低スリップで走行する際には、接地圧を低く保ちながら走行することが望ましい。接地圧を低くするには、荷重が特定の部分に集中しないように、ロボット全体を均等に接地させればよい。そこで、提案手法では、センサで取得した各クローラの総荷重が目標総荷重となり、荷重中心位置がクローラ中央となるように、2自由度サブクローラの各関節の回転数指令値を決定し接地の制御を行う。

目標総荷重 $S_{mref}$ 、 $S_{sref}$ は、次式に示すようにロボット全体の質量 $W$ を各クローラの軸間距離 $L_m$ 、 $L_s$ に応じて分配した値とする。添字の $m$ は、メインクローラを表し、添字の $s$ はサブクローラを表す。

$$S_{mref} = W \frac{L_m}{2(L_m + 2L_s)} \quad (2)$$

$$S_{sref} = W \frac{L_s}{2(L_m + 2L_s)} \quad (3)$$

また、荷重中心位置 $COL_m$ 、 $COL_s$ は、式(1)と同様に、次式で求めた。

$$COL_m = \frac{\sum l_n x_n}{L_m S_m} \quad (4)$$

$$COL_s = \frac{\sum l_n x_n}{L_s S_s} \quad (5)$$

なお、2自由度サブクローラのリンクの回転を行う軸を第1関節、サブクローラの回転を行う軸を第2関節とし、2自由度サブクローラの関節角度の原点は、図6に示す姿勢とする。また、図中で示すように各関節の回転数 $N_{f1}$ 、 $N_{f2}$ 、 $N_{r1}$ 、 $N_{r2}$ を定義する。

#### 3.1 第1関節

第1関節の制御は、メインクローラの総荷重が目標総荷重となることと、メインクローラの荷重中心位置がメインクローラ中央にあることを目標に行う。

まず、第1関節の回転により、メインクローラの総荷重や荷重中心位置がどう変化するかを考える。図6の姿勢から、前方の第1関節をリンクが上向きなるように回転させると、サブクローラの荷重がリンクを通してメインクローラにかかるので、メインクローラの総荷重が増加し、荷重中心位置はメインクローラ前方に移動する。逆に、前方の第1関節をリンクが下向きになるように回転させると、メインクローラの荷重がリンクを通してサブクローラにかかるので、メインクローラの総荷重が減少し、荷重中心位置はメインクローラ後方に移動する。

したがって、メインクローラの総荷重が目標よりも小さい(大きい)場合には、第1関節をリンクが上(下)向きになるよう回転させ、メインクローラの荷重中心位置が前(後)寄りにあるときは、前の第1関節をリンクが下(上)向きに、後ろの第1関節をリンクが上(下)向きになるよう回転させればよい。

以上より、第1関節の回転数 $N_{f1}$ 、 $N_{r1}$ は、式6と式7に示すように、メインクローラの総荷重と荷重中心位置にそれぞれ定数 $C_{m1}$ 、 $C_{m2}$ をかけた和とした。ただし、荷重中心位置は、総荷重が小さいときには大きな意味を持たないため、荷重中心の項に総荷重と目標総荷重との比を掛け、そのときの荷重中心位置の影響を小さくすることとした。

$$N_{f1} = +C_{m1} \frac{S_{mref} - S_m}{S_{mref}} - C_{m2} \frac{S_m}{S_{mref}} COF_m \quad (6)$$

$$N_{r1} = -C_{m1} \frac{S_{mref} - S_m}{S_{mref}} - C_{m2} \frac{S_m}{S_{mref}} COF_m \quad (7)$$

#### 3.2 第2関節

第2関節の制御は、サブクローラの総荷重が目標総荷重となることと、サブクローラの荷重中心位置がサブクローラ中央にあることを目標に行う。第1関節の場合と同様に、第2関節の回転によるサブクローラの総荷重や荷重中心位置の変化を考慮し、第1関節の回転数 $N_{f1}$ 、 $N_{r1}$ を次式で指定した。

$$N_{f2} = -C_{s1} \frac{S_{sref} - S_s}{S_{sref}} + C_{s2} \frac{S_s}{S_{sref}} COF_s \quad (8)$$

$$N_{r2} = +C_{s1} \frac{S_{sref} - S_s}{S_{sref}} + C_{s2} \frac{S_s}{S_{sref}} COF_s \quad (9)$$

なお、定数 $C_{s1}$ 、 $C_{s2}$ は、経験的に決定した。

## 4 段差踏破実験

### 4.1 実験条件

制御手法の有効性を検証するため、平面上に高さ10[cm]の段差を構築し評価実験を行った。この環境において、ロボットを速度4[cm/s]で走行させ、段差を登る動作を行う間の各センサの計測荷重を0.5秒ごとに記録した。

このとき、2自由度サブクローラについて、2つの関節を固定した場合(以下0自由度制御)と本手法のうち第2関節のみに制御を適用し、1自由度サブクローラとして用いた場合(以下1自由度制御)、本手法で第1第2両方の関節を制御した場合(以下2自由度制御)の3つの場合について実験し、比較検討を行う。

### 4.2 実験結果

図7は、2自由度制御で段差を登ったときの様子である。2自由度サブクローラの第1関節と第2関節が地形に合わせて制御されている様子が見て取れる。

ここで、3者の場合において、特に接地面積に差が見られたのが図8に示すそれぞれ20[s]の時点の姿勢である。

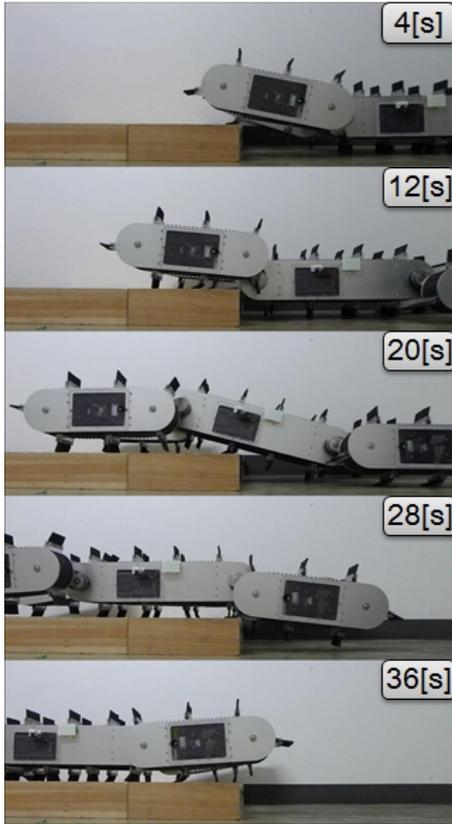


Fig. 7: Sequence image with 2-DOF subtracks

0自由度制御では、メインクローラ下部の1点と後ろのサブクローラ後部のみでの接地となり、接地面積が非常に小さい。1自由度制御だと、メインクローラ下部の1点に加え、前サブクローラの先端と後サブクローラの全面が接地する。さらに2自由度制御の場合には、メインクローラ下部の1点と前後のサブクローラの全面が接地し、大きな接地面積で走行できており、2自由度サブクローラの機構の有用性ならびに本制御手法の有用性を確認できる。

続いて、定量的な評価として、まず、センサで取得した接地荷重の最大値と分散の議論を行う。特定の部分に荷重が集中すると、その部分の接地圧が大きくなりスリップが起きやすいため、最大接地荷重や接地荷重の分散を小さく保つことは、軟弱地盤での走行に有利となる。

まず、段差を登る際にかかった0[s]から40[s]の最大接地荷重の時間平均を求めると、0自由度制御で6.0[kgf]、1自由度制御で5.7[kgf]、2自由度制御で5.1[kgf]となる。よって、2自由度制御を行うことで最大接地圧を低く保って走行することができるといえる。さらに、段差の角とメインクローラが接触していた20[s]から28[s]のみで時間平均を取ると、0自由度制御で7.3[kg/cm]、1自由度制御で6.8[kg/cm]、2自由度制御で5.3[kgf]であった。このとき、2自由度制御を行った場合の接地荷重は、0自由度制御の27[%]、1自由度制御の22[%]減少した。

さらに、接地荷重の分散の時間平均を求めると、20[s]から28[s]の間では、0自由度制御で3.7[kgf<sup>2</sup>]、1自由度制御で3.2[kgf<sup>2</sup>]であったのに対して、2自由度制御では、2.6[kg/cm]と、0自由度制御の19[%]、1自由度制御の16[%]の減少が

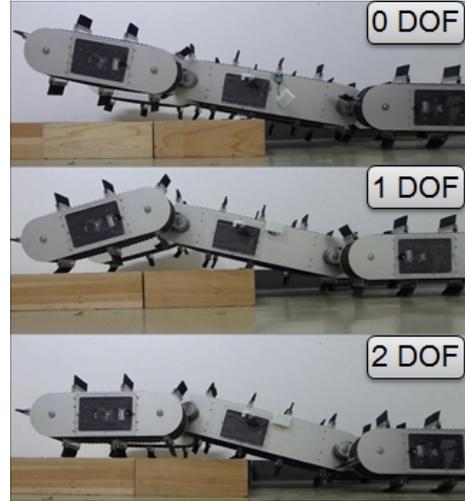


Fig. 8: Images of the robot at 20[sec]

見られた。

以上より、最大接地荷重と接地荷重の分散についても明らかな改善が見られ、提案手法を用いることで、凹凸のある軟弱地盤において低スリップの走行が期待できる。

## 5 おわりに

本研究では、11自由度を持つ多自由度クローラ型移動ロボットELFについて、クローラの底面の接地荷重を計測するクローラを開発し、その情報を用いて、2自由度サブクローラの制御手法を提案した。また、提案手法について基礎的な実験を行い、凹凸のある軟弱地盤において低スリップの走行が期待できることを示した。

今後は、本ロボットの持つスライド関節も用いて合計9自由度の制御を行い、ロボットの左右方向についても接地の制御を行う。また、本研究で提案した2自由度サブクローラの制御手法が実際の火山環境において有用であるか検証するため、フィールド実験を行う。

## 参考文献

- [1] 永谷圭司, 木下宏晃, 西村健志, 小柳栄次, 油田信一, 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—浅間山での走行試験—, 第11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, pp.555-558 (2010-12) .
- [2] 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 (2012-05).

Table 1: Time-averaged Contact Load of each sensor

	Maximum [kgf]		Variance [kgf <sup>2</sup> ]	
	0[s]-40[s]	20[s]-28[s]	0[s]-40[s]	20[s]-28[s]
0 DOF	6.0	7.3	3.7	4.8
1 DOF	5.7	6.8	3.2	4.3
2 DOF	5.1	5.3	2.6	3.1