

応力測定に基づいた車輪型砂上移動ロボットの登坂能力に関する研究¹

佐藤佳祐², 永谷圭司³, 吉田 和哉³

Study on Climbing Ability of Wheeled Mobile Robots on Loose Soil based on Normal Stress Measurement

Keisuke SATO⁴, Keiji NAGATANI, and Kazuya YOSHIDA

⁴ Tohoku University, Aoba 6-6-01, Sendai, 980-8579, Japan

To navigate a mobile robot on a surface of planets covered with loose-soil such as the Moon, it is very important to estimate climbing the ability of slopes. In our previous research, we have developed a traction force model based on directly measured normal stress distribution obtained by pressure sensors attached at the surface of the wheels. In this research, we examine the above on-line estimation approach to estimate the climbing ability (relationship between slip and traction force) and verify the availability of this approach through some experiments.

Key Words : Wheeled Robots, Planetary Rover, Terramechanics

1 はじめに

月・惑星探査において、移動探査ロボット(ローパー)は、広域を詳細に直接探査する上で、非常に重要な役割を担っている。しかしながら、対象環境は、通常細かい砂で構成された軟弱地盤で覆われているため、ローパーの航行には、車輪のスリップが大きな問題となる。このスリップの発生は、目的経路の追従を困難にする、スタックを引き起こすなど、ミッションの達成を妨げる大きな要因であり、このような事態は、探査対象であるクレータのような斜面において、顕著に引き起こされることが考えられる。こういった事態を避けるため、軟弱地盤を走行する車輪の挙動を事前に把握し、それらを考慮した経路計画・走行制御を行うことが重要な課題となっている。

軟弱地盤を走行する車輪の挙動を明らかにするためには、車輪と土壌の力学関係に基づいた走行解析が重要である。このような研究は、1960年頃にM.G.BekkerやJ.Y.Wong等によってテラメカニクスという力学として体系化され、これをベースに、近年に至るまで様々な力学モデルの構築が行われてきた[1][2]。しかしながら、これらのモデルは、走行面が平坦であり、土壌が均一であることが前提とされている場合が多く、さらに、様々な土壌パラメータが既知である必要があることから、惑星探査に代表される未知環境に、これまでのアプローチを直接活用することは困難である。

そこで、筆者等は、テラメカニクスに基づいた車輪のけん引力モデルから見直し、未知環境における斜面登坂能力オンライン推定手法の構築を目指し研究を行ってきた。けん引力モデルを見直すにあた

り、その要素である垂直応力を、垂直応力測定車輪(BFSA-Wheel: Wheel with Build-in Force Sensor Array)を用いて直接取得・観測を行ってきた結果、車輪に加わる垂直応力分布は、車輪の接地面全体ではなく、車輪前方の一部に分布しており、その分布はスリップの上昇に伴い車輪前方へ移動していきことが分かった[3]。これは、既存のモデルでは表現されていない現象である。このことから、新たな垂直応力分布モデルとして、実測した圧力分布をもとにした垂直応力分布推定手法を構築、必要となるパラメータを含め、オンラインでけん引力を推定する方法を提案した[7]。この手法を用いることで、従来に比べ推定するパラメータ数が減り、オンラインで正確な駆動力を推定することができるようになった。しかしながら、これまでの手法では、未走行領域における垂直応力を推定することができないため、未走行領域におけるけん引力を推定すること(登坂能力推定)ができない。また、けん引力を推定するにあたり、垂直応力を直接取得する必要があることから、BFSA-Wheelをローパーに搭載することが求められる。搭載機器に厳しい制約があり、信頼性が求められる惑星探査において、このようなシステムを搭載することは現実的ではない。

そこで、本研究では、BFSA-Wheelを用いた走行実験を行い、得られた垂直応力分布の傾向から、実測値を用いずに垂直応力を推定する方法を検討することで、BFSA-Wheelを用いない登坂能力推定手法の構築を目的とすることとした。

本稿では、まず、テラメカニクスに基づいた軟弱地盤における車輪のけん引力のモデルについて紹介する。その後、本研究で行ったBFSA-Wheelによる垂直応力分布測定実験の結果を示し、垂直応力分布に見られる傾向について紹介する。さらに、登坂能力推定の必要要素である垂直応力分布の推定方法、土壌パラメータの推定手法を紹介し、推定結果を示す。ここで、BFSA-Wheelを用いない登坂能力推定

¹原稿受付 2010年1月12日

²学生員, 東北大学(〒980-8579, 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-1)

³正員, 東北大学

Email: keisuke@astro.mech.tohoku.ac.jp

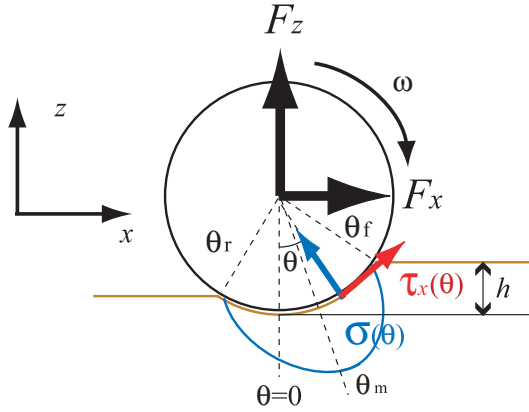


Fig. 1: Wheel-soil contact model

を行うために、垂直応力に関してはスリップと沈みこみ量の関係から垂直応力分布を推定する手法を提案する。最後にこれらの要素技術を用いた、登坂能力推定手法の提案、および、推定結果を示す。

2 軟弱地盤上における車輪のけん引力

本章では、軟弱地盤を走行する車輪に発生するけん引力について、テラメカニクスに基づいたモデルを示すと共に、その必要要素である、せん断応力の本研究で用いるモデルについて述べる。

2.1 けん引力モデル

軟弱土壌上における車輪のけん引力は

$$F_x = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{\tau_x(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta\} d\theta \quad (1)$$

と表すことができる。

ここで、 r 、 b はそれぞれ車輪半径、車輪幅を表す。また、(Fig. 1) に示すように、 θ_f 、 θ_r はそれぞれ、鉛直下向きを基準に、垂直応力が発生する始点・終点の角度を表す。つまり、車輪に発生するけん引力は、垂直応力応力 σ およびせん断応力 τ_x の水平方向成分を、応力発生範囲において積分することによって求められる。

2.2 せん断応力分布モデル

本研究において、せん断応力分布のモデルについては、Janosi, Hamamoto 等によって定式化された式

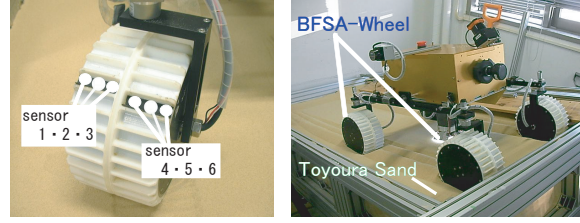
$$\tau_x(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan \phi) [1 - e^{-j_x(\theta)/k_x}] \quad (2)$$

を用いることとした [5]。

ここで j_x は土壌変形量と呼ばれ、次式で表される。

$$j_x(\theta) = r[\theta_f - \theta - (1 - s)(\sin \theta_f - \sin \theta)] \quad (3)$$

c 、 ϕ はそれぞれ、土壌の粘着係数と内部摩擦角と呼ばれる土壌固有の値であり、 k_x はせん断変位と呼ばれる車輪形状と土壌に依存する変形係数である。



(a) BFSA-Wheel

(b) Overview

Fig. 2: Test bed and test field

また、 s はスリップ率と呼ばれる車輪の滑りを示す割合であり、並進速度 v_x 、車輪回転速度 $r\omega$ を用いて次式のように表される。

$$s = \begin{cases} \frac{r\omega - v_x}{r\omega} & (r\omega > v_x : \text{driving}) \\ \frac{r\omega - v_x}{v_x} & (r\omega < v_x : \text{breaking}) \end{cases} \quad (4)$$

3 垂直応力分布測定実験

実際に登坂走行しているローバーにおいて、車輪に加わる垂直応力分布の傾向を直接取得し、解析を行うため、本研究では圧力センサによる垂直応力分布測定実験を行った。本章では、この実験について、実験方法、および、測定結果から見られる傾向について示す。

3.1 実験概要

本実験では、車輪に圧力センサ等を内蔵した、垂直応力測定車輪 (BFSA-Wheel: Wheel with Build-in Force Sensor Array, Fig. 2-(a)) [3] を車輪型移動ローバー (El-DoradoII) の右前後輪それぞれに取り付け、様々な斜度に設定したテストフィールド (幅:1.0[m], 長さ:2.0[m]) (Fig. 2-(b)) での走行実験を行うことで、異なるスリップ率に対する垂直応力分布を測定した。

スリップ率は、当研究室において開発したテレセントリックカメラを用いたビジュアルオドメトリ (TMMS: Telecentric Motion Measurement System) によって獲得した本体の並進速度、および、車輪に設置エンコーダより獲得した車輪の周速度を用い、式 (4) から算出する。

実験における車輪周速度は、実際に惑星探査を行う際の走行速度を加味し、9.15[mm/sec] に設定した。また、フィールドの設定斜度 0, 4, 8, 10, 12 [deg] に対し、それぞれの斜度において、4 回ずつ測定を行った。テストフィールドには、豊浦標準砂と呼ばれる粒径が均一で、粘着力 c がほぼゼロとされる砂を使用した。

3.2 測定結果

実験により得られた各斜度における垂直応力分布の平均値を Fig. 3 (実線) に示す。ここで、wheel

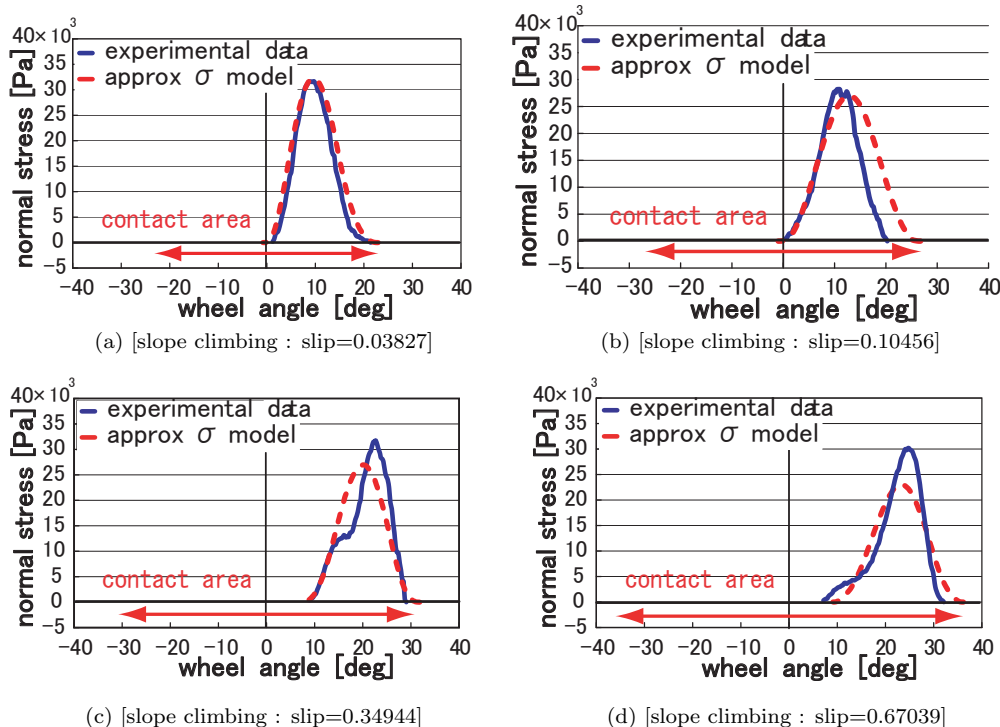


Fig. 3: Comparison of normal stress distribution for each slip ratio

angle は、地面垂直方向下向きを基準とし、車輪前方向を正とした際の角度である。また、contact area は、車輪の接地している領域 (角度) を示している。なお、実験では前後輪の垂直応力分布を測定したが、それぞれの結果に大きな違いは見られないため、ここでは後輪の実験結果を示すこととする。

Fig. 3 から、測定した垂直応力分布が、接地面全体に分布しておらず、車輪前方の一部に分布していることが分かる。また、スリップ率と応力分布 (Fig.4) の関係を見ると、スリップ率の上昇に伴い、応力の発生範囲が車輪前方へ移動していることが分かる。

Bekker のモデルに代表される既存のモデルの多くは車輪接地面全体に垂直応力が分布するものと考えており、離脱角 θ_r を地面に垂直な車輪の基準線とするものなどもあるが、どちらも測定結果から見られる傾向を表現できていないと考えられる。

このことから、本研究では、垂直応力モデルとして、既存のモデルを用いず、BFSA-Wheel によって直接測定した応力分布を解析することで、新たな垂直応力分布の推定法を構築することとした。

4 登坂能力推定の必要要素

本章では、オンラインで登坂能力を推定するために必要になる要素技術について述べる。ここで、登坂能力を “斜面登坂に必要とされるけん引力に対する滑り度” と定義する。つまり、登坂能力推定とは、スリップがあまり生じない低斜度領域において取得可能なデータから、滑りの生じやすい高斜度領域におけるスリップ率とけん引力の関係を推定できれば

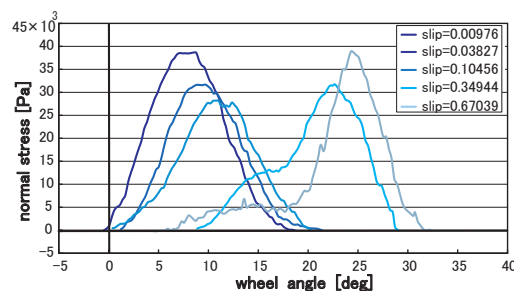


Fig. 4: Relationship between slip ratio and normal stress distribution

良いことになる。このような推定を行う上で必要な要素として以下の3点が挙げられる。

1. 垂直応力の実測値を用いない垂直応力分布モデルを構築する
2. 低斜度において、スリップ率と垂直応力発生範囲の関係を推定する
3. 低斜度において、式 (1) からけん引力を求めるために用いる各種パラメータの同定を行う

なお、本研究においては、低スリップ率を $slip = 0.2$ 以下 (低スリップが発生する領域を低斜度)、高スリップ率をそれ以上 (高スリップが発生する領域を高斜度) と定義する。

5 応力測定に基づいた垂直応力分布推定

本研究では、BFSA-Wheel によって直接測定した応力分布の傾向をもとに、車輪に加わる垂直応力分布を推定することとした。本章では、第3章で取得

したデータをもとに、BFSA-Wheel を用いずに垂直応力分布を推定する方法について検討する。

5.1 分布形状

まず、垂直応力の分布範囲に注目する。Fig. 3 の各グラフにおける実測値(実線)に見られるように、応力発生開始角 θ_f は、ほぼ車輪が接地し始める(contact area の始点)角度に等しいことが分かる。このことから、車輪の沈みこみ量 h を用いて θ_f は

$$\theta_f = \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) \quad (5)$$

と表すことができる。

一方、 θ_r に関しては、スリップ率の小さな領域において、ほぼゼロとなっており、また、分布の幅に注目すると、全スリップ率においてほぼ一定の幅をとっていることがわかる。

スリップの小さな領域($s < s_{small}$, $s_{small} = 0.2$)において、 θ_r はゼロと考えられるため、垂直応力の分布幅は θ_f に等しくなる。よって、スリップ率の小さな領域における分布幅の平均 θ_w を

$$\theta_w = \frac{\sum_{k=1}^n \theta_{fk}}{n} \quad (s_k < slip_{small}) \quad (6)$$

のように取得し、 θ_r を以下のように取得することとした。

$$\theta_r = \begin{cases} 0 & (s < slip_{small} : \text{small slip ratio}) \\ \theta_f - \theta_w & (s > slip_{small} : \text{large slip ratio}) \end{cases} \quad (7)$$

続いて、分布の形状については、Fig. 3 における分布形状(実線)に類似した簡易な近似式として($1 - \cos\theta$)を採用し、上記で示した θ_f θ_r を用いて、垂直応力分布を

$$\sigma_{app} = M \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\theta_f - \theta_r}(\theta - \theta_r)\right) \right] \quad (8)$$

とした。ここで、 M は絶対値を調節するための係数である。

上記手法で推定した垂直応力分布を Fig. 3 (破線)に示す。Fig. 3 に見られるように、本手法によって推定した垂直応力分布形状は、ほぼ、実測値の分布と重なっていることから、本手法の有用性が示された。

5.2 全垂直応力の推定

けん引力を推定するにあたり、車輪全体に加わる垂直応力が必要となるが、車輪幅方向の分布は上記の垂直応力推定手法では推定できない。しかしながら、実験結果から、各センサの車輪周方向の分布形状は、同じ斜度であれば、ほぼ同じような形状をとっていることが分かった。このことから、車輪幅方向に関して、周方向の垂直応力分布の形状は相似形であり、異なるのはその絶対値であると考えることが

できる。ここで、けん引力を推定するうえで必要となるのは、車輪に加わる垂直応力の幅方向の綿密な分布形状ではなく、周方向の形状および幅方向の総和である。幅方向に対する周方向分布形状は相似形であることから、その平均値を持った垂直応力分布が求められれば、総和は平均値と車輪幅の積として表すことができる。つまり、けん引力を推定するためには、幅方向の平均値を絶対値を持った垂直応力分布を推定できればよいということになる。

そこで、本研究では、上記 M により、式(8)の値が、車輪幅方向の垂直応力分布の平均値となるよう、 M を調節することで、車輪に加わる垂直応力を推定することとした。

6 スリップ率に対する垂直応力分布推定

Fig. 4 に見られるように、垂直応力分布はスリップ率の上昇に伴い車輪前方へ移動する。斜度の小さな領域において登坂能力推定を行うためには、ほぼスリップの生じない平坦な領域において、スリップ率が0.2を越える比較的高いスリップが生ずる際の垂直応力分布発生範囲を推定する必要がある。

6.1 推定手法

式(8)から、沈み込み量 h が求まれば、垂直応力が求められる。よって、斜度の小さな領域において、前後の車輪回転速度に違いを持たせることにより片輪に人工的なスリップを作り出し、その際の沈みこみ量を測定することでスリップ率が0.2を越える場合の垂直応力分布を推定することとした。この際、スリップ率の高い方の車輪がもう一方に比べ大きく沈み込むために、ローバーと地面が水平を保てず、車輪の基準線が実際とずれてしまうという問題が発生する。これに関しては、レーザ距離センサを利用し、地面と本体の相対関係を取得することで補正をかけることとした(Fig. 5)。

6.2 実証実験

上記の手法を実証するため実証実験を行った。テストベッド、テストフィールドは第3章と同様に El-DoradoII、豊浦標準砂を用いた。車輪周速度は、高スリップを発生させる前輪を前章の実験と等しい9.15[mm/sec]に、後輪を9.15[mm/sec]から作り出すスリップ率に合わせて遅くした値に設定した。本実験で作りに出した slip 率は0.04, 0.13, 0.16, 0.25, 0.36, 0.43, 0.68, 0.83 でそれぞれ5回実験を行った。

実験結果を Fig. 6 に示す。この図から分かるように、作り出したスリップが大きい領域においての沈みこみ量が、急激に大きくなっている。また、この値は登坂実験での結果とも大きくことなっている。これは、作成したスリップが大きい状況では、上述したように、片輪が大きく沈み、そちらに重心が移動することで、登坂時の状況より車輪にかかる重量が大きくなるためであると考えられる。

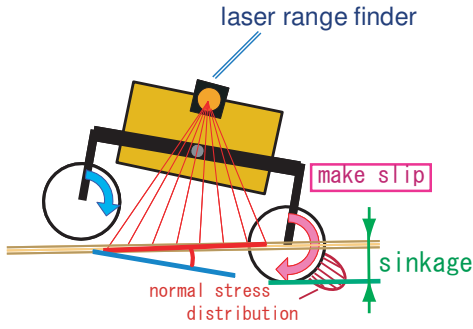


Fig. 5: Overview of making slip ratio with difference between front and rear wheel velocity

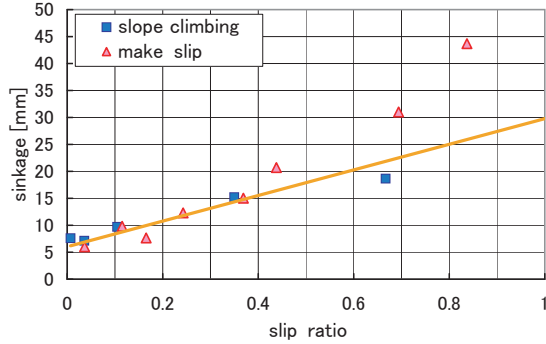


Fig. 6: Results of slip ratio vs. sinkage estimation

ここで、スリップ率と沈みこみ量は線形関係であることから、ローバーの傾きが大きくないスリップ領域において得られたデータを最小二乗法により線形近似することで、この式を用いてスリップ率の大きな領域での沈み込み量を推定することとした。Fig. 6に見られるようにこの近似直線は、登坂実験の結果とよく一致しており、この手法の有用性が示されたといえる。

7 パラメータ同定

本章では、まず、けん引力推定に必要な土壌パラメータの同定手法を提案する。続いて、この手法を用いた際の同定結果を示す。

けん引力の推定を行うため、求める必要のあるパラメータは、粘性係数 c 、内部摩擦角 ϕ 、土壌と車輪表面の形状に依存する土壌変形係数 k_x 、および倍率係数 M である。

7.1 同定手法

ローバーが斜面を走行する際、その斜度が α [deg] であった場合、けん引力 F_x および垂直抗力 F_z は以下の等式を満たす。

$$F_x = mg \sin \alpha \quad (9)$$

$$F_z = mg \cos \alpha \quad (10)$$

また、測定した沈み込みから推定した垂直応力 (式 (8)) および、せん断応力 (式 ((2)) を応力発生範囲で積分することにより、 n 番目の車輪に加わる力、 F_{x_n} 、 F_{z_n} は以下のように表すことができる。

$$F_{x_n} = rb \int_{\theta_{r_n}}^{\theta_{f_n}} \{\tau_{x_n}(\theta) \cos \theta - M_n \sigma_{s_n}(\theta) \sin \theta\} d\theta \quad (11)$$

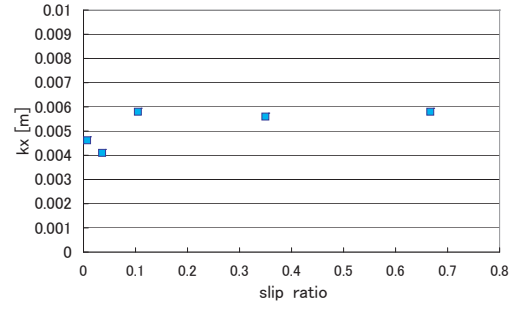


Fig. 7: Results of k_x estimation

$$F_{z_n} = rb \int_{\theta_{r_n}}^{\theta_{f_n}} \{\tau_{x_n}(\theta) \sin \theta + M_n \sigma_{s_n}(\theta) \cos \theta\} d\theta \quad (12)$$

本研究では、簡単のためロール角がゼロとなるように斜面を平坦に均しているため、左右の力が等しいとし、前後輪のそれぞれに加わる力を式 (11)、(12) から計算すればよい。これにより前後輪に加わる力を F_{x_f} 、 F_{z_f} 、後輪に加わる力を F_{x_r} 、 F_{z_r} 、とすると、以下の式が成り立つ。

$$F_x = 2(F_{x_f} + F_{x_r}) \quad (13)$$

$$F_z = 2(F_{z_f} + F_{z_r}) \quad (14)$$

斜度 α はジャイロセンサおよび加速度センサを用いて取得され、車輪半径 r および車輪幅 b は既知である。また、土壌変形量 j_x の算出に必要なスリップ率は、車輪エンコーダから $r\omega$ を読み取り、車体並進速度 v_x に関しては、TMMS を用いて測定することで、式 (4) から求める [6]。さらに、 θ_f 、 θ_r はレーザ距離センサを用いて測定した沈みこみ量から求めることができる (式 (5)、(6)、(7))。結果、式 (9) および式 (13)、式 (10) および式 (14) から 2 つの等式が満たされ、これらは、異なる斜度において独立に成り立つ。よって、少なくとも 3 種の斜度において走査実験を行えば、 c 、 ϕ 、 k_x 、およびそれぞれの斜度における M が同定されることが分かる。ここで、 M は、土壌パラメータ c 、 ϕ 、 k_x を同定する際に推定が必要となる、中間的かつ確率的なパラメータである。よって、 M は、その値に直接的な意味を持たないパラメータである。

本稿では、問題を簡易化するために、ひとまず c および ϕ を既知の値とし k_x の同定を行う。尚、豊浦標準砂の土壌パラメータより、 $c = 0$ 、 $\phi = 38.0$ [deg] である。

7.2 同定結果

k_x の同定結果を Fig. 7 に示す。なお、本推定は、第 3 章で行った走行実験のデータをもとに行った。ここで、 k_x は土壌と車輪の表面形状によって決まる係数であることから、土壌および車輪が変化しない本実験において、 k_x は一定値であると考えられる。一方、Fig. 7に見られるように、 k_x の推定値はほぼ一定値をとっている。このことから、前述した推定方法が有用であることが示されたといえる。

8 登坂能力推定

本章では、これまでの結果を用い、オンラインで登坂能力を推定する提案手法を、実証実験の結果を交えながら説明すると共に、その有用性を評価する。

8.1 推定手法

前述したように、登坂能力を推定するためには、けん引力 F_x とスリップ率の関係を推定すればよい。本稿では、簡単のため、土壌パラメータのうち、 c と ϕ が既知であるという条件のもと、斜度 $0, 4, 8[\text{deg}]$ の3種の斜面を走行した際のデータから、登坂能力の推定を行った。以下に、推定の流れを示す。

1. 低斜度において、7.1節で述べた方法により各種パラメータの同定を行う。

この際、Fig. 7に示される、最初の3点が推定されることとなる。土壌パラメータはスリップ率に関わらず一定であるため、これらの平均値をけん引力推定に用いる。また、この際、実測値として、Fig. 8-(a)の四角点の関係が得られる。

2. 低斜度において、6章で述べた方法によりスリップ率と垂直応力発生範囲の関係を推定する。

これにより、Fig. 4の関係が得られる。

3. 手順2で調べた各スリップ率（各斜度）において、式(13)からけん引力 F_x を推定する。

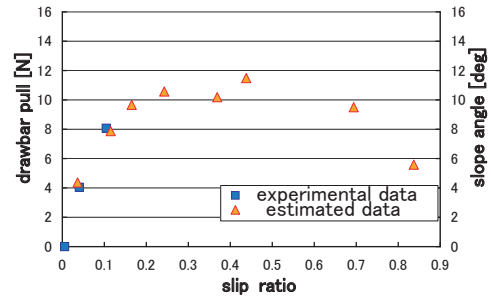
これにより、Fig. 8-(a)の三角点の関係が得られる。

Fig. 8-(b)に、スリップ率とけん引力の関係について、上記推定手法を用いた結果と、斜面登坂実験より得られた結果を比較する。Fig. 8-(b)に見られるように、推定結果はスリップ率が0.5以下の領域において、実験結果の傾向と概ね一致しており、この領域において、本推定手法の有用性が示されたといえる。

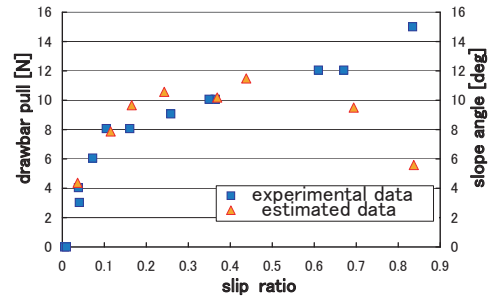
スリップ率が非常に大きな領域においては、沈み込みから推定した垂直応力分布が、実測値より車輪前方に推定された。これにより、けん引力の推定値が小さくなったと考えられる。

9 おわりに

本稿では、車輪移動型ローバーの登坂能力オンライン推定に必要な要素技術を述べると共に、垂直応力の実測値を用いない登坂能力推定手法を提案した。けん引力推定に必要な垂直応力分布に関しては、BFSA-Wheelを用いた直接測定の結果から、既存のモデルでは表現できていない現象を提示した。これより、既存のモデルから離れ、直接取得した垂直応力分布の傾向をもとに、スリップ率と沈み込み量から垂直応力を推定する方法を提案した。また、けん引力推定に必要な各種パラメータについて、その推定方法を示すと共に、実証結果を示した。そして最後に、これらを踏まえた登坂能力オンライン推定手法を提案し、その実用性を示した。



(a) Estimated data



(b) Comparison of estimated and experimental data

Fig. 8: Estimation of climbing ability

今後は、土壌、車輪形状等の実験条件を変化させ、提案手法の有用性を示すと共に、スリップ率の非常に大きな領域における垂直応力分布を精確に推定する方法を検討する。また、車輪側面に加わるサイドフォースを考慮することで、直登以外の条件に拡張した登坂能力推定、およびそれを用いた経路計画、経路追従の実現を目標とする。

参考文献

- [1] M.G.Bekker : "Off-The-Road Locomotion," Ann Arbor, MI, USA, *The University of Michigan Press*, 1960.
- [2] J.Y.Wong : "Theory of Ground Vehicles," John Wiley & Sons, 1978.
- [3] 吉田和哉, 永谷圭司, 山名克尚, 石上玄也 : "応力分布測定ホイールを用いた土壌パラメータの推定," ロボティクス・メカトロニクス講演会'08講演会論文集, pp. 2P2-A19, 2008.
- [4] Bekker, G : "Introduction to Terrain-Vehicle Systems," Ann Arbor, MI, USA, *University of Michigan Press*, 1969.
- [5] Z.Janosi, B.Hamamoto : "The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicle," *Proc of the 1st Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems*, Torio, 1961.
- [6] 池田礼子, 永井伊作, 石上玄也, 永谷圭司, 吉田和哉 : "テレセントリックカメラを用いた車輪型砂上移動ロボットのオンラインスリップ推定," 第8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. 1F4-3, 2007.
- [7] K.Nagatani, A.Ikeda, K.Sato and K.Yoshida : "Accurate Estimation of Drawbar Pull of Wheeled Mobile Robots Traversing Sandy Terrain Using Build-in Force Sensor Array Wheel," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2373-2378