

車体の重心移動が移動ロボットの 軟弱斜面横断時の走行性能に与える影響の評価

Study on the Effect of Shifting Center of Gravity on Mobile Robots Traversing Loose Soil Slopes Laterally

猪爪 宏彰 (東北大), 須藤 真琢 (東北大), 正 永谷 圭司 (東北大), 正 吉田 和哉 (東北大)

Hiroaki Inotsume, Tohoku University, 6-6-01 Aoba-ku, Sendai 980-8579

Masataku Sutoh, Tohoku University, 6-6-01 Aoba-ku, Sendai 980-8579

Keiji Nagatani, Tohoku University, 6-6-01 Aoba-ku, Sendai 980-8579

Kazuya Yoshida, Tohoku University, 6-6-01 Aoba-ku, Sendai 980-8579

Abstract: Mobile Robots, which explore craters on the Moon or the Mars, are required mobility to negotiate with sandy slopes on which slippage can easily occur. It is known that such slippage can be reduced by shifting the center of gravity on robots. In this paper, we quantitatively discuss the effect of shifting of the center of gravity on wheeled mobile robots on side slip. We conducted slope-traversing experiments using a wheeled mobile robot under various roll angles and slope angles. Based on the experiments, we found the relationship between robot's roll angle and side slip. Furthermore, we also found that the slip is able to be minimized not by just making the robot horizontal, but by inclining it toward uphill direction more than such attitude. It indicates that to minimize side slip over slopes we have to focus on the mechanics model of wheels and optimize their load distribution.

Key Words: Planetary rover, Sandy slope, Side slip, Reconfiguration.

1. 緒言

現在, 各国の宇宙機関により, 移動ロボット(ローバー)を用いた月や火星表面の探査が計画されている。しかし, 月の大部分や火星の一部は, 非常に粒径の細かい砂で覆われた軟弱地盤であり, ローバーがその表面を走行する際に, 車輪の滑りが容易に発生するため, 設計の際にこの滑りを考慮に入れる必要がある。特に, クレーターのような斜面を走行する際, その滑りが顕著となり, ローバーが斜面下方向に横滑りして目標経路から外れ, 最悪の場合, 砂に埋まって脱出不能となる可能性がある。そのため, このような探査ローバーには, 滑りを起こしにくい移動機構や滑りを補償した制御手法が求められる。

このような課題に対して, Helmicらは, ステレオカメラを用いたビジュアルオドメトリにより車体の滑りを検知し, 滑りを補償した経路追従手法を提案した。また, Ishigamiらは, 車輪と地面との間の力学(テラメカニクス)から滑りを予想し, 経路追従を行う制御手法を提案した⁽²⁾。

これに対して, Wettergreenらは, 斜面横断時に, Fig. 1に示すように, ローバーを斜面山側に倒すことにより, 横滑りの低減が可能であることを実験的に示した⁽³⁾。これに代表されるような, 姿勢を変形することが可能なローバーは, "Reconfigurable Robot"と呼ばれ⁽⁵⁾, このようなロボットに対する, 不整地走行時のトラクションや, 転倒に対する安定性の向上に関する研究が行われてきた^(4, 5, 6, 7, 8)。特に軟弱斜面走行時の重心位置の影響については, 三輪らにより, 斜面を垂直登坂する際の, テラメカニクスに基づいた登坂能力解析が行われた⁽⁹⁾。しかし, 姿勢を変更した際の, 軟弱斜面走行時の横滑りに関する力学的な解析は, 詳しく行われていないのが現状である。車輪に働く力を解析的に求めることができれば, 任意の斜面において, 姿勢を最適化することで, 走行時の横滑りを最小限に抑えることが期待できる。

そこで本研究では, 軟弱斜面を走行する際に滑りを生じにくい移動手法を検討するため, まず, ローバーが斜面を横断する際に, 重心移動が横滑りに与える影響の評価を行うことを目的とした。この評価を行うため, 本研究では, ローバーの姿勢を変化させて軟弱斜面を走行させる実験を行った。本稿では, まず,



Fig. 1 Scarab Rover traversing on a sandy slope ©CMU⁽³⁾

斜面を横断する車輪に働く力について説明する。次に, テストベッドを用いた走行実験とその結果を示し, その結果に対する考察を行う。

2. 重心位置に基づく軟弱斜面上のローバーの力学モデル

2-1. 軟弱斜面を横断する車輪に働く力 Fig. 2に示すような, 斜度 α の斜面に沿って走行する車輪の目標進行方向に x 軸, 斜面上側の車軸方向に y 軸, 斜面垂直上方向に z 軸をとった右手系の車輪座標系を考える。車輪には, 土壌を押し上げて走行する際, その反力として, x 方向にけん引力 F_x , y 方向にサイドフォース F_y , z 方向に垂直抗力 F_z が作用する。また, 車輪には, y 軸および z 軸の負の向きに重力による力が働く。これらの力により, 車輪は, x 方向の速度 v_x , y 方向の速度 v_y を得て, 進行速度 v で走行する。

2-2. 走行性能の評価指標 車輪が軟弱な地盤を走行する際の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 β は, 目標進行方向速度 v_x と横方向速度 v_y のなす角として, 次式で定義される。

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

β は, ローバーの横滑りの度合いを表し, 走行する斜面の斜度に対して, β が小さいほど, 走行性能が高いことになる。

2-3. ローバーの重心位置と車輪の負荷の関係 斜度 α の斜面上を斜面に沿って横断する質量 m の四輪型ロボットのモデルをFig. 3に示す。ローバーの重心が, 斜面垂直上方向に h , 谷側と山側の車輪からそれぞれ L_1, L_2 の位置にあるとする。このと

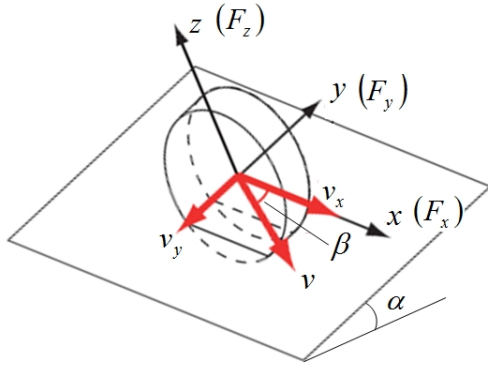


Fig. 2 Wheel coordinate system on a slope

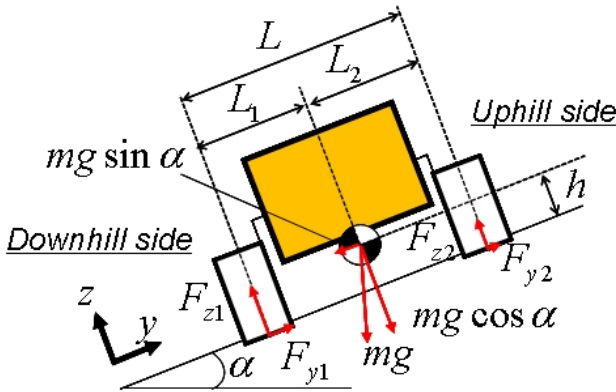


Fig. 3 A rover model on a slope

き、前後輪に働く力が等しいと仮定すると、谷側と山側の車輪に働く垂直抗力 F_{z1} , F_{z2} は、幾何学的に、それぞれ以下の式で与えられる。

$$\text{Downhill side: } F_{z1} = \frac{mg(L_2 \cos \alpha + h \sin \alpha)}{2L} \quad (2)$$

$$\text{Uphill side: } F_{z2} = \frac{mg(L_1 \cos \alpha - h \sin \alpha)}{2L} \quad (3)$$

式 (2), 式 (3) より分かるように、 $L_1 = L_2$ となる姿勢で斜面を横断する場合、山側の車輪よりも谷側の車輪の方に大きな負荷が働く。一方で、車輪の負荷が大きくなると、それに伴って、車輪が土壌を斜面下方向に押しつける力が大きくなる。この車輪から受ける力に土壌が耐えきれなくなると、斜面下方向に土壌が崩壊する⁽¹⁰⁾。この崩壊により、土壌が車輪を斜面上方向に支えるサイドフォース F_y が不足して、車輪の横滑りが生じると考えられる。これに対し、Fig. 4 に示すようにローバーの姿勢を変化させ、重心位置を山側へ移して車輪負荷のバランスを取ることにより、横滑りの低減が期待できる。

そこで、斜面を走行するローバーの各車輪の負荷の均一さを表す指標として、負荷比率 δ を次式で定義する。

$$\delta = \frac{F_{z1}}{F_{z2}} \quad (4)$$

式 (4) において、 $\delta = 1$ となるとき、各車輪に均等に負荷が加わっていることを意味する。

3. 軟弱斜面の横断走行実験

軟弱斜面を走行するローバーの重心位置の変化が横滑りに与える影響の評価を行うため、テストベッドを用いた走行実験を行った。

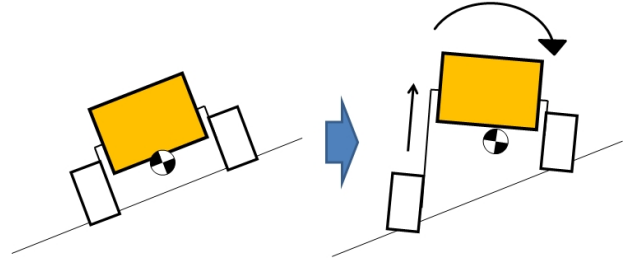


Fig. 4 Shift of the center of gravity

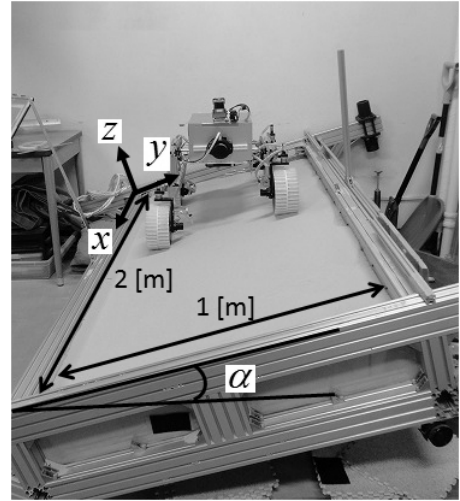


Fig. 5 Test bed and test field

3-1. テストベッドおよびテストフィールド 本実験で使用したテストベッドおよびテストフィールドを Fig. 5 に示す。テストベッドには、我々の研究室が所有する四輪型ローバー El-Dorado II を使用した。Table 1 に、本テストベッドの仕様を示す。本テストベッドは、車輪取り付け部を手動でスライドさせることで、Fig. 4 に示すように姿勢を変化させ、重心位置を移動させることができる。

また、テストフィールドには、長さ 2 [m] × 幅 1 [m] のフィールドを使用した。このフィールドは、ジャッキにより片側を持ち上げることで、20 [deg] 程度までの任意の角度の斜面を形成することが可能である。このフィールドに、豊浦標準砂と呼ばれる、粒径が均一で粘着力がほぼゼロの砂を平たんとなるように敷き詰め、実験を行った。

3-2. 実験内容 Fig. 6 に示すように、水平面上でのテストベッドのロール角 ψ_h を定義する。本実験では、Fig. 7 に示すように、ローバーの姿勢を $\psi_h = 0, 5, 10, 15$ [deg] と変化させて、斜度 $\alpha = 5, 10, 15$ [deg] の斜面に沿って直線走行させたときのスリップ角を測定した。スリップ角は、Fig. 8 に示すように、目標軌跡と実際の走行軌跡とがなす角 β が走行時の平均スリップ角であると仮定し、この β を測定値とした。また、テストベッドの目標走行速度は約 9.5 [mm/s] とし、走行距離は 1 [m] とした。なお、各姿勢、各斜度について、それぞれ 3 回ずつ実験を行い平均値を実験値とした。

Table 1 Specification of the test bed

Size [mm]	L800 × W550 × H400
Mass [kg]	24
Wheel size [mm]	$\phi 200 \times W100$

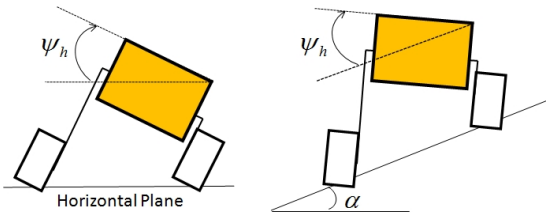
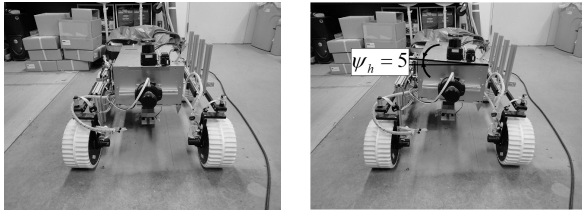
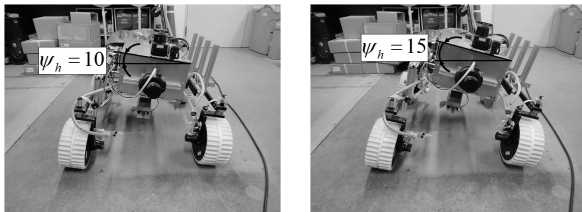


Fig. 6 Definition of roll angle ψ_h



(a) $\psi_h=0$ [deg]

(b) $\psi_h=5$ [deg]



(c) $\psi_h=10$ [deg]

(d) $\psi_h=15$ [deg]

Fig. 7 Rover configurations

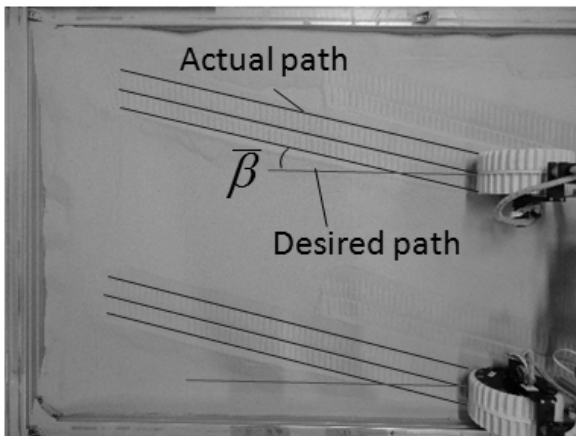


Fig. 8 Definition of average slip angle β

3-3. 実験結果 Fig. 9 に、走行実験の結果を示す。この図は、横軸に斜面の斜度 α 、縦軸に平均スリップ角 β をとり、水平面上でのテストベッドの姿勢 ψ_h ごとに結果をプロットしたものである。この図より、1つの姿勢について見ると、斜度 α が大きくなるにしたがって、スリップ角 β が大きくなるのが分かる。また、同一斜度について見ると、姿勢 ψ_h が大きくなるにしたがって、スリップ角 β が小さくなるのが分かる。ただし、 $\alpha=15$ [deg] について見ると、姿勢を $\psi_h=10, 15$ [deg] としたときのスリップ角測定値がほぼ等しくなっている。このことから、斜度が大きくなるに従い、重心移動による横滑りの低減効果が小さくなるのが予想できる。また、斜面上で水平となる姿勢、すなわち、 $\psi_h = \alpha$ となる姿勢では、スリップ角はゼロとならず、その状態よりもさらに斜面山側へ車体を倒した姿勢でスリップ

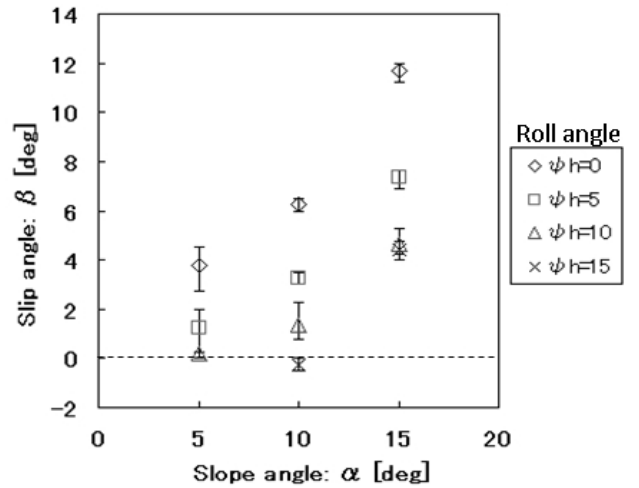


Fig. 9 Result of the experiment

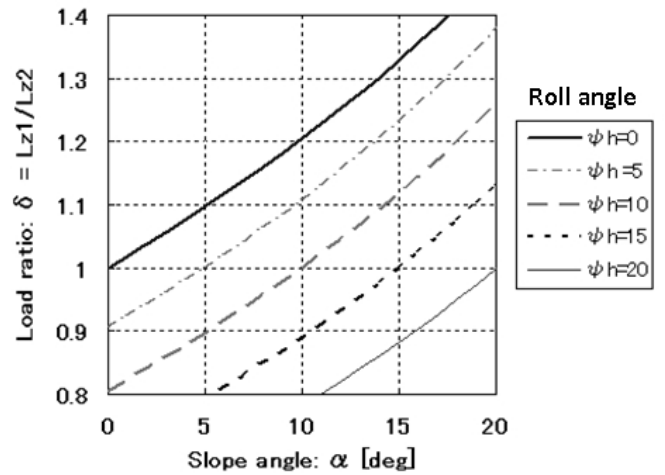


Fig. 10 Calculation result of wheel load ratio

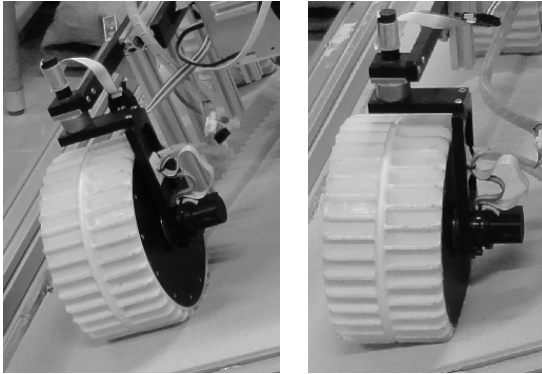
角がゼロとなった。

以上のように、本実験より、ローバーの姿勢を変化させ、重心を移動させることで、軟弱斜面走行時の横滑りが低減することが確認できた。また、斜面上で姿勢を水平状態にするよりも、車体を斜面山側に倒した状態で横滑りが最小となることが分かった。

3-4. 考察 実験結果について、2-3節のモデルを用いて、テストベッドの姿勢と各車輪に働く負荷の関係をもとに考察を行う。

本実験で使用したテストベッドの姿勢 ψ_h を変化させたときの、重心位置(式(2), 式(3))における L_1, L_2, L, h を幾何学的に求め、斜度 α に対する車輪の負荷比率 δ を式(2), 式(3), 式(4)から計算すると Fig. 10 のようになる。この図から分かるように、 δ は、斜度 α が大きくなるに従って大きくなり、姿勢角 ψ_h が大きくなるに従って小さくなる。これらは、実験により測定したスリップ角 β と同様の傾向を示している。これより、車輪の横滑りには、車輪の負荷のバランスが影響すると考えられる。

ただし、重心位置の変化による車輪負荷の変化だけでは、斜度が大きくなったときに横滑りの低減作用が低下することを説明できない。斜度が大きいときには、斜度が小さいときよりも斜面上の土壌が崩れやすいため、各車輪負荷の大小に関わらず土壌が崩壊してしまうと考えられる。この現象を解析するためには、テラメカニクスに基づいた車輪と地面との間の力学モデル



(a) $\psi_h=0$ [deg]

(b) $\psi_h=15$ [deg]

Fig. 11 Comparison of wheel contact angles on slope (slope angle: $\alpha = 15$ [deg])

に注目する必要がある。

また、Fig. 10 において、各斜度における斜面山側と谷側の車輪に均等に負荷が加わる状態、すなわち、車輪の負荷比率が $\delta = 1$ となるのは、斜面上で車体が水平となる姿勢、 $\psi_h = \alpha$ のときである。しかし、3-3節で述べたように、実験では、斜面上で水平となる姿勢よりも、さらに斜面山側に車体を倒した姿勢の方が、スリップ角が小さくなるという結果が得られた。本実験のように、姿勢を変化させて車体重心を移動させる場合、Fig. 11 に示すように、斜面に対する車輪の接地角度も変化する事になる。車輪の接地角度が変化すると、土壌に対して車輪が加える力の働き方が大きく変化することが予想でき、その事も少なからず実験結果に影響を与えていると考えられる。この効果が、本実験結果において、どの程度の影響を与えているかということとは非常に興味深い問題である。

4. 結言および今後の課題

本稿では、軟弱斜面を横断するローバーの重心位置の移動が横滑りに与える影響の評価を行った。ローバーの姿勢を変えての軟弱斜面走行実験から、重心を移動して車輪負荷の分配を改善することで、横滑りを最小化できることを確認した。

横滑りに寄与すると考えられるもう 1 つの要因として、斜面に対する車輪の接地角度が挙げられる。今後は、Fig. 12 に示すように、車輪の角度を変化させて斜面走行実験を行うとともに、テラメカニクスに基づいた車輪力学モデルに着目し、車輪の接地角度が軟弱斜面走行時の横滑りに与える影響についての評価を行う。

参考文献

- (1) D. M. Helmick, S. I. Roumeliotis, Y. Cheng, D. S. Clouse, M. Bajracharya, and L. H. Matthies: "Slip-Compensated Path Following for Planetary Exploration Rovers," *Journal of Advanced Robotics*, vol. 20, no. 11, pp. 1257 - 1280, 2006
- (2) G. Ishigami, K. Nagatani, and K. Yoshida: "Slope Traversal Controls for Planetary Exploration Rover on Sandy Terrain," *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 264 - 286, 2009
- (3) 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, pp. 1550 - 1564, 2010
- (4) S. V. Sreenivasan, and B. H. Wilcox: "Stability and Traction Control of an Actively Actuated Micro-Rover," *Journal of Robotic Systems*, vol. 11, no. 6, pp. 287- 502, 1994
- (5) K. Iagnemma, A. Rzepniewski, S. Dubowsky, and P.

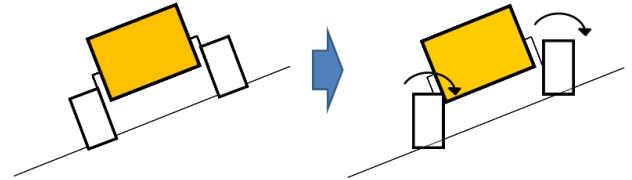


Fig. 12 Change of wheels' contact angle

Schenker: "Control of Robotic Vehicles with Actively Articulated Suspensions in Rough Terrain," *Autonomous Robotics*, vol. 14, pp. 5 - 16, 2003

- (6) C. Grand, F. BenAmar, F. Plumet, P. Bidaud: "Stability and traction optimization of reconfigurable vehicles. Application to an hybrid wheel-legged robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 10 - 11, pp. 1041 - 1058, 2004
- (7) S. Nakamura, M. Faragalli, N. Mizukami, I. Nakatani, Y. Kunii, and T. Kubota: "Wheeled Robot with Movable Center of Mass for Traversing over Rough Terrain," *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 1228 - 1233, 2007
- (8) G. Freitas, G. Gleizer, F. Lizarralde, and L. Hsu: "Kinematic Reconfigurability Control for an Environmental Mobile Robot Operating in the Amazon Rain Forest," *Journal of Field Robotics*, vol. 27, no. 2, pp. 197 - 216, 2010
- (9) 三輪章子, 石上玄也, 永谷圭司, 吉田和也: "テラメカニクスに基づく月・惑星探査ローバーの登坂性能解析", 第 11 回ロボティクスシンポジウム, pp. 514 - 519, 2006
- (10) K. Terzaghi, R. B. Peck, and G. Mesri: "Soil Mechanics in Engineering Practice," Third Edition, John Wiley and Sons, Inc., 1996