B 201 砂地におけるスクリュ推進システムの移動性能

Mobility Performances of Screw Propulsion System on Sand

○正 永岡 健司 (東北大), 正 久保田 孝 (JAXA)

Kenji Nagaoka, Tohoku University, 6-6-01 Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579
Takashi Kubota, JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 252-5210

Abstract: For lunar and planetary exploration robots, a screw locomotion gear is one of the potential techniques for traveling on sandy terrain. Its mobility performances on soil, however, are needed to be elaborated for practical space applications. This paper discusses the performances between a helical screw propulsion unit and sand. In particular, experimental trafficability of the screw unit and empirical maneuverability of a screw driven robot are presented through laboratory tests.

Key Words: Mobile Robot, Screw Propulsion Unit, Sand, Experimental Trafficability, Empirical Maneuverability.

1. はじめに

1957年に打ち上げられた、旧ソ連による世界初の人工衛星スプートニク1号を皮切りに、人類の宇宙進出および宇宙探査は目覚ましい速度で発展を続けている。特に近年では、日本のJAXAによる小惑星探査「はやぶさ」や米国のNASAによる2機の火星表面探査ロボット(通称、ローバ)など、地球外天体上でのロボット探査により、多くの科学的成果が挙げられている。その中でも、より高度な探査ミッション遂行へ向けて、月惑星表面上を移動して対象天体を科学的に調査する無人ロボット技術へ寄せられる期待は科学的、工学的にも非常に大きくなりつつある。一方で、これまでの探査ローバが抱える課題として、2009年にNASAの火星探査ローバ・スピリットが火星の軟弱な砂地で車輪がスタック(完全空転)して脱離困難な窮地に陥った事例[1]が、しばしば取り上げられる。スピリットは6個の車輪を搭載した無人移動探査ロボットであるが、車輪の過度な沈下状態からスタック状況の深刻さは際立っていた。2010年1月、試行錯誤の末にNASAはスピリットの救出断念を公式に発表した。このことから、単純な受動サスペンションを有する複数車輪移動には砂地での移動限界が存在することが結論付けられる。筆者らは、砂と車輪との相互力学モデルを用いることで車輪機構の走行限界を推定しており[2]、理論的にも砂地走行時に危惧すべき限界性を指摘してきた。そのため、今後の月惑星探査ローバの開発においては、スタックを回避あるいは脱出する能力を備えた移動機構の実現が必要と考えられる。

以上の考察に基づき、筆者らはこれまで軟弱砂地でのスタック状態に対してロバストな移動機構として、スクリュ推進機構を用いた移動方式を提案し[7]、検討を進めてきた。本研究で提案するスクリュ推進ユニットとは、円筒に螺旋翼を擁したアルキメデス・スクリュ構造[8]を基本とした移動機構である。本機構は、回転軸方向にも推進力を発揮できるため、車輪の場合ではスタックを引き起こしてしまうような沈下状態においても十分な推進性能が期待できる。また、螺旋スクリュの巻き方向が互いに異なる二つのユニットを組み合わせることで、マヌーバビリティを伴った移動システムを構成できる。このようなスクリュ機構の移動方式は、主に水陸両用車両などへの応用として、幾つかの過去にも検討事例が存在する[3-6]。とりわけ、Dugoffら[6]による単一スクリュユニットの実験的検討は、直進移動に関してスクリュのスリップ状態と駆動牽引力との関係性を調べた数少ない成果がまとめられている。幾何形状や荷重、移動速度などのパラメータを変化させた実験結果を記した文献[6]は、スクリュ推進機構の有益な指針を示すものといえる。しかしながら、その成果はある特定の装置に関する一考察であり、スクリュ推進機構を有する移動ロボットシステムの包括的な移動性

能を示す十分な結果を提示するものではない。

そこで、本稿ではスクリュ推進機構を用いた砂地移動システムにおける砂地での移動性能の実験的評価を行う。とりわけ、スクリュ推進機構の有するトラフィカビリティ(牽引力特性)、マヌーバビリティ(操舵特性)および岩石乗り越えの各特性に関して、走行パラメータを変化させた場合の走行試験結果を基に、スクリュ推進機構システムの総合的な移動性能の提示を行う。

2. 提案システム

2-1. 概要 本研究では、これまでスクリュ推進機構を有した移動探査ローバ「Screw Drive Rover」を提案、検討してきた[7]。ここで、Screw Drive Roverの概要を図1に示す。提案ローバは、本体、ヒンジ脚、右巻きスクリュ推進ユニット、左巻きスクリュ推進ユニットから構成されている。左右のスクリュ推進ユニットに関しては、円筒に螺旋翼を擁した構造となっている。また、4本あるヒンジ脚は歯車と軸によって連結されており、連動して本体の高さ(左右ユニット間の距離)を変えることで姿勢安定性を調整することができる。移動原理的に、スクリュ推進ユニットは砂地に埋没した状態でもローバを牽引するのに十分な推進力を発揮することができ、結果として、スタックに対するロバスト性を持つことが期待できる移動機構といえる。

筆者らが製作したScrew Drive Rover試作機の概観を図2に示す。試作機の寸法は図2に示すとおりであり、全体重量は6.4kg(バッテリーを除く)である。また、搭載する左右のスクリュ推進ユニットは、共にスクリュ巻き傾斜角が16deg(スクリュピッチは60.75mm)であり、各ユニットで4周分巻かれている。駆動用モータとしては、試作機には合計で3個搭載されており、内2つはスクリュ駆動用として各ユニット内に、残

Fig. 1 3D CAD drawing of the proposed robot

Fig. 2 Prototyped Screw Drive Rover

りの1つはヒンジ脚駆動用に本体内に組み込まれている。そのため、左右のスクリュ推進ユニットは独立して駆動制御が可能な設計となっている。

2-2. 推進特性パラメータ 本稿では、推進特性を評価するパラメータとして、スクリュ推進ユニットの長手軸方向のスリップ s_x ($0 \leq s_x \leq 1$) を次式で与える [6].

$$s_x = \frac{pf - v_x}{pf} \quad \text{where } |pf| \geq |v_x| \quad (1)$$

ただし、 p はスクリュピッチであり、 f はスクリュ推進ユニットの単位時間当たりのスクリュ回転数である。本スリップとは、一回転あたりの推進量を示したものであり、 $s_x = 1$ はスタック（つまりは、移動量が零の状態）を意味している。

次いで、スリップ角 α を定義する。ここでは、 α は移動面に対して実際の移動方向とスクリュ推進ユニットの長手方向との間の角度と定める。ただし、スクリュ長手方向から見て移動方向が時計回り方向に傾斜した状態を正の方向とする。

3. トラフィカビリティ特性

3-1. 実験概要 Screw Drive Rover システムに関して、まず本稿ではスクリュ推進ユニット単体でのトラフィカビリティ特性の実験的調査について述べる。図3に実験装置の概観を示す。試験砂としては珪砂（5号）を採用し、アクリル製砂箱（150×20×15 cm）に敷き詰めた。本システムでは荷重 W 、スクリュ回転速度 f 、スリップ角 α 、および牽引負荷 DP を可変パラメータとし、モータ電流、移動距離（または移動速度 v ）、スクリュ回転速度 f 、および沈下量を計測した。なお、実験は同一条件下で3回行い、平均値と誤差範囲を以って評価した。

3-2. 実験手順 実験手順を以下に示す。

1. 各実験条件 (W , f , α , DP) の設定
2. スクリュ推進ユニットを初期状態にセット：沈下量 50 cm
3. 実験： f を等速度制御し、電流値 f 、沈下量を計測
4. 定常スリップ状態の算定

各センサデータは0.1秒毎に取得するよう設定した。スクリュ回転速度 f および移動速度 v は、定常運動中の値を以って評価する。これにより、スクリュ運動が定常スリップ状態にて評価される。本実験では、スクリュ推進機構の生成牽引力 DP と定常スリップ状態 s_x との関係性を解析する。ただし、ここでいう牽引力とは前後面での排土抵抗を含んだ値として出力される。

3-3. 結果

3-3-1 荷重と回転速度の影響

垂直荷重 W のみを変化させた場合のスリップと牽引力の相関を図4に示す。同様に、図5に回転速度 f のみを変えた場合の結果を示す。これらの結果から、荷重と回転速度の各変化に依らず、スリップ s_x の増加と共に牽引力 DP が増大する（実際には、牽引負荷の増大に伴うスリップの増大）傾向が確認できる。さらに、牽引力が零（つまりは、牽引負荷が零）の状態では、ス

Fig. 3 Experimental apparatus of trafficability tests

(a) load: 1.5 kg ($f = 0.167$ rps, $\alpha = 0$ deg)

(b) $W = 2.0$ kg ($f = 0.167$ rps, $\alpha = 0$ deg)

(c) $W = 2.5$ kg ($f = 0.167$ rps, $\alpha = 0$ deg)

Fig. 4 Experimental results: Effect of load W

リップ s_x が0.2前後に位置することが分かった。

3-3-2 スリップ角の影響

図6にスリップ角 α を変えた場合の結果を示す。この結果より、スクリュ推進ユニットはスリップ角 α が10 deg の方向に牽引力特性が偏心していることが確認できる。スクリュ推進ユニットによる牽引力 DP の正味発生方向は、 $\alpha = 10$ deg 側にあることを示している。したがって、スクリュ翼面に方向側に砂の圧縮・破壊反力が牽引力 DP として主に起因していることを示唆する結果が得られた。

(a) $f = 0.125$ rps ($W = 2.5$ kg, $\alpha = 0$ deg)

(b) $f = 0.083$ rps ($W = 2.5$ kg, $\alpha = 0$ deg)

Fig. 5 Experimental results: Effect of rotational velocity f

さらに、スリップ s_x に対する $\alpha = \pm 10$ deg の牽引力 DP を $\alpha = 0$ deg の近似曲線上での牽引力 DP で正規化したグラフを図 6(c) に示す。これによると、 $\alpha = +10$ deg における正規牽引力は 1.5 程度で一定値を示している。それに対して、 $\alpha = -10$ deg での正規牽引力は平均 0.64 で、かつスリップ増加に伴う増加傾向を示している。このような結果が得られる背景として、スクリュ推進ユニットが生成する牽引力は砂の圧縮・破壊による摩擦反力が主因であることが影響しているものと考えられる。砂の反力は砂の剪断軌道にも大きく影響するため、結果として発生牽引力の大小が α によって変化しているものと推測される。

4. マヌーバビリティ特性

4-1. 実験概要 Screw Drive Rover 試作機を用いたマヌーバビリティ特性の評価試験を行った。本試験には、トラフィカビリティ試験と同じ珪砂を敷き詰めた屋内試験場 (3.5×6.5 m) を使用した。実験における駆動パラメータとしては、左右のスクリュ推進ユニットを等速回転速度に独立で制御し、ヒンジ脚は固定した。また、試作機の移動軌跡を解析する目的で、本実験では外部固定カメラにより動きを撮像した。これにより、提案システムの有するマヌーバビリティを実現される移動軌跡の分類によって評価を行う。

4-2. 結果 図 7 に前進時 (左右のスクリュ推進ユニットが異なる回転方向で同一の回転速度) のスクリュ回転速度と移動速度との相関特性を示す。この結果から、前進移動速度はスリップ s_x に線形であり、かつ回転速度にも正比例していることが確認できる。すなわち、回転速度に依らずに前進時のスリップ s_x が与えられることを意味している。

次いで、回転速度を様々変化させた (回転の方向と速度を変化させた) 場合の移動軌跡結果を図 8 に示す。本結果より、提案システムが砂地において多様な移動遷移軌道を実現できることが定性的に確認された。また、本結果を分類整理したものを表 1 に示す。これにより、これまで整然とされていなかったスクリュ推進ユニットによる移動システムに対するマヌーバビリティを定性的に提示することができた。なお、本分類表を用いることで、定性的な移動計画を立てることができ、制御指針を与える上での重要な結果の一つといえる。

しかしながら、側方に対しては、理想的には真横に移動でき

(a) $\alpha = +10$ deg ($W = 2.5$ kg, $f = 0.167$ rps)

(b) $\alpha = -10$ deg ($W = 2.5$ kg, $f = 0.167$ rps)

(c) Normalized DP ($W = 2.5$ kg, $f = 0.167$ rps)

Fig. 6 Experimental results: Effect of slip angle α

Fig. 7 Forward traveling characteristics of maneuverability tests

るはずであるが、実際には旋回半径を伴った移動が主であった。その理由として、スクリュ推進ユニット単体の前後、および左右スクリュ推進ユニット間での生成反力値には差があるため、本体の姿勢回転モーメントが働いてしまうと考えられる。その一方で、条件によっては真横に近い移動も実現されている。これは、砂とスクリュ推進ユニットとの間に生じる力のバランスが絶妙に整った状態のみ実現されるため、現実的には沈下量などの状態により移動誤差を陽に考慮する必要がある。

5. 岩石乗り越え特性

現実の月惑星表面上には、岩石が広く分布した領域も多い。そのため、相対的に巨大な障害物は避けるしかないが、比較的小さな砂利などは乗り越えることが必要となる。そこで、提案ロボットによる岩石乗り越え破能力を実験的に調査した。ただし、現行の提案ロボットシステムでは正面から岩石を乗り越えることができないため、ここでは側方乗り越えにて評価を行った。

Fig. 8 Diverse maneuvering trajectories demonstrated by prototyped rover

Table 1 Resulting classification of maneuvering trajectories

Left-side Screw Unit's f	Right-side Screw Unit's f				
	large ccw	small ccw	0	small cw	large cw
large ccw	↶	↶	↷	↷	↶
small ccw	↶	↶	↷	↶	↷
0	↶	↶	-	↶	↷
small cw	↶	↶	↷	↶	↷
large cw	↶	↶	↷	↶	↷

cw: clockwise rotation, ccw: counter clockwise rotation

図 9 に実験結果を示す。試作機のユニット最大半径は 4 cm であり、図 9 に示される小岩石は、はじめ砂表面から 3 cm 程度突出していた。そのため、まず岩石を側方に押し込む形で砂中に埋め込み (図 9(b))、その後突出部分が 2 cm 以下となった状態で小岩石の踏破が実現された。試験結果から、乗り越え可能な障害物高さは車輪と同等であることが確認された。

6. おわりに

本稿では、螺旋スクリュ推進機構を用いた軟弱な砂地走行に優れた移動探査ロボットを提案した。とりわけ、螺旋スクリュ推進機構に関する砂地での基本移動特性 (トラフィカビリティとマヌーバビリティ) を屋内試験により示した。今後の課題としては、移動制御を想定した定量的詳細議論が必要である。

参考文献

- (1) http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/status_spiritAll_2009.html#sol1900
- (2) 永岡健司, 水上憲明, 大槻真嗣, 久保田孝, 車輪型不整地移動ロボットにおけるテラメカニクス適用に関する考察, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2P2-F14, 2010.
- (3) Wells, T.J., *Improvement in the Manner of Constructing and of Propelling Steamboats, Denominated the "Buoyant Spiral Propeller"*, U.S. Patent 2400, Dec. 23rd, 1841.
- (4) Rush, E.S., and William, W.E., Evaluation of the Marsh Screw Amphibian (MSA), *Technical Report: Evaluation of Herbicide Application Platforms for Use in Aquatic Plant Control, A-77-1*, 1977.
- (5) Cole, B.N., Inquiry into Amphibious Screw Traction, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1982*, vol. 175, no. 19, pp. 919-940, 1961.

Fig. 9 Video images of climbing a rock by prototyped rover

- (6) Dugoff, H. and Ehrlich, I., Model Tests of Buoyant Screw Rotor Configurations, *Journal of Terramechanics*, vol. 4, no. 3, pp. 9-22, 1967.
- (7) 永岡健司, 大槻真嗣, 久保田孝, 月面軟弱地盤走行に特化したネジローバの初期検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 1A2-F17, 2009.
- (8) Paipetis, S.A., and Ceccarelli, M., *The Genius of Archimedes -- 23 Centuries of Influence on Mathematics, Science and Engineering*, Springer, pp. 177-187, 2010.