二重螺旋推進における支持脚の移乗機構 —足部の形状と摩擦特性—

Movement mechanism of supporting legs on double spiral propulsion -Foot shape, friction and balance properties-

○ 對馬英彦 (室蘭工大) 正 花島直彦 (室蘭工大)
正 山下光久 (室蘭工大) 正 足田弘光 (室蘭工大) 河内邦夫 (室蘭工大)

Hidehiko Tsushima, Muroran Inst. of Tech.

Naohiko HANAJIMA, Muroran Inst. of Tech.

Mitsuhisa YAMASHITA, Muroran Inst. of Tech.

Hiromitsu HIKITA, Muroran Inst. of Tech.

Kawauchi Kunio, Muroran Inst. of Tech.

This paper addresses mobile robots on a double spiral propulsion mechanism. Some groups of conservation of nature have surveyed wetlands as a part of preserving activity. But there is a demand of development of robots which support the investigation, because it is difficult to move in wetlands due to mud and dense weeds. The double spiral propulsion mechanism has been proposed for support in wetland investigation. A robot moves on the double spiral propulsion mechanism. This robot consists of movement mechanism on supporting legs and feet. This research considers a four-link movement mechanism of supporting legs, and the relationship among foot shapes, friction properties, and balance of a fixing frame.

Key Words: Wetland, Spiral, Movement mechanism, Supporting legs, Friction, Stability

1. 緒言

貴重な動植物の生息地になっている湿原において、その面積が年々減少する傾向にあり、動植物の絶滅や湿原環境の悪化が危惧されている。明治・大正時代には、全国で2110.62[km²]の湿原が存在したが、現在では820.99[km²]に減少している。つまり、明治・大正時代に存在した湿原面積の61.1[%]に当たる1289.62[km²]が消失したことになる[1]。そのため保全・再生のために植生や水質などの調査が環境省をはじめ、自治体・団体で行われている。現在、調査機材の運搬は人の手によって行われているが、泥濘地および密生植物等による障害のため、湿原環境における移動にはたいへんな労力を要する。

そこで、調査作業をロボット技術でサポートすることを目指して、螺旋駆動機構が提案され[2]、プロトタイプの開発とその移動特性の解析が行われた[3]。さらに、地面と螺旋の摩擦や螺旋への植物のからまりについて改善された二重螺旋推進機構が提案されている[4]。不整地における移動機構としてはクローラや車輪などが一般的であるが、螺旋推進機構は湿原に自生する植物に対する損傷を抑え、泥濘地に沈下しにくいという点で特徴がある。

二重螺旋推進機構では支持螺旋の上にロボットが立脚し、移動螺旋を持ち上げ空中で回転させて草を縫うように進む。本稿では、ロボットの支持脚について、その移動機構を考案し、さらに支持脚の足部と螺旋における摩擦特性を調べる。また、足部の摩擦特性の結果を踏まえて、足部を取り付けた支持脚を螺旋の上に載せ、傾けることで支持脚の転倒限界を調べる。

2. 螺旋推進機構に関する従来研究

二重螺旋推進の動作過程を図1に示す。これは2本の同じ巻き方向である支持螺旋と移動螺旋からなる。まずロボット本体は支持螺旋により支持螺旋上に立脚する。そして移動螺旋を把持機構により外周から保持し(a)、持ち上げ(b)、その場で回転させ(c,d)、降ろす(e)。その後本体は支持螺旋から移動螺旋に移乗する。以上の動作を交互に行って前進する。この機構は草の間を縫うように推進することができ、また地上から浮かせて回すため、草密度等に左右されずに移動できる。

Fig. 1: Moving steps of double spiral propulsion

3. 移動ロボットの概略

3.1 支持脚の移動機構

前節で述べたように、ロボット本体は支持螺旋から移動螺旋に移乗する必要がある。ここでは4つの支持脚を持つ移動機構を考案した。

図2のように移乗時の脚の水平方向の運動を4リンクの平面マニピュレータで構成する。アクチュエータを各関節に配置してリンク動かす。リンク1とリンク4は伸縮機構を有し、その標準時の位置は螺旋のピッチに合わせている。これらを順序良く動かすことで、矢印方向に支持脚を移動し、回転を終えた移動螺旋に移乗する。

Fig. 2: Supporting spiral and supporting legs

3.2 支持脚足部

ロボット支持脚の先には螺旋の上に載るための足部を取り付ける。ここでは脚の簡素化と軽量化を考慮し、足部には把持機構などを設けず、単純な逆V字の形状とした。

足部の形状と螺旋との摩擦特性を調べるため、6種類の足部を試作した。逆V字の開き角は45°と30°の2種類とした。また、V字部分に3°と6°のテーパ角をつけたものを用意した(図3)。各試作品に表1のとおり通し番号を付与した。

Fig. 3: V angle and taper angle

Table 1: Parameters of the prototype feet

No.	1	2	3	4	5	6
V angle (deg)	30	30	30	45	45	45
Taper angle (deg)	0	3	6	0	3	6

4. 支持脚足部の摩擦特性に関する実験

4.1 実験方法

支持脚足部は螺旋から滑り落ちることなく、ロボットや調査機材の重量を支える必要がある。そこで、試作した各足部の摩擦特性を調べることにする。

まず、表1の6つの足部を螺旋上に置く。そして、足部を螺旋の円に沿う向き(図4)に少しずつ位置をずらし、滑り始める地点での水平からの傾斜角 θ_1 を計測する。次に、足部を螺旋の円管に沿う向き(図5)に少しずつ位置をずらし、同様に傾斜角 θ_2 を計測する。さらに、V字の内側にゴム材質で網目状の滑り止めを取り付けた同様の実験も行う。なお上記の実験で得られた θ_1 、 θ_2 を、最大摩擦角と呼ぶことにする。

角度の計測は写真画像により行う。カメラを固定し、まず水平線を撮影し、次に足部が滑り始める寸前の角度で写真を撮影する。足部上端の直線部分の傾きを画像処理ソフトウェアで計測し、水平線からの角度を計算する。また、計測は同条件で3回ずつ行った。

Fig. 4: Maximum statical friction angles in the direction along the spiral axis

Fig. 5: Maximum statical friction angles in the direction along the spiral pipe

4.2 実験結果と考察

それぞれ3回計測した最大摩擦角の平均値と標準偏差を算出する。螺旋の円に沿う方向の実験結果を図6に、螺旋の円管に沿う方向を図7に示す。なお、図中の横軸の1~6までの番号は、表1に対応している。

図6を見ると、螺旋に沿う方向の最大摩擦角は、テーパの角度が大きくなるに従い増加している。これは、テーパによる締め付けによって螺旋との間に生じる摩擦力が増大したためと考えられる。一方、図7では、テーパの角度が大きくなると最大摩擦角は減少する傾向にある。

また、図6と図7を見ると、開き角度で比較してみた場合、45°よりも30°の方が最大摩擦角は大きい値になった。逆V字部分と螺旋が接触する2点間の距離が、45°よりも30°の方が長いから螺旋を深く支えると考えられる。

滑り止めを取り付けると、最大摩擦角は図6では2~3倍、図7では3~9倍増加した。今回は屋内での実験であったため、実際の湿原環境では違った結果が得られる可能性があるが、今回の実験で滑り止めの効果が大きいことが示された。

Fig. 6: Mean values and standard deviations of maximum statical friction angles in the direction along the spiral axis

Fig. 7: Mean values and standard deviations of maximum statical friction angles in the direction along the spiral pipe

5. ロボット本体の転倒限界に関する実験

5.1 実験方法

実際の足部は、4つの支持脚からなる移動機構に取り付けられており、上から荷重がかかった状態で螺旋と接する。ロボットの移乗中に、姿勢が傾くことも考えられ、この時ロボット本体の転倒を避けなければならない。そこで、模擬的に4つの支持脚を設け、それぞれの支持脚の先端に足部を取り付け、螺旋の上に載せた状態で傾け、ロボット本体の転倒限界を調べることにする。

実験装置は図8のように配置した。まず、支持脚に見立てたアルミフレームの先端に足部を固定する。支持脚が螺旋の上に載るように位置を調整し、移動機構を模した固定枠と支持脚を固定する。螺旋を図9のようなレールの上に載せ、螺旋の転がりを抑えた。次に螺旋を中心軸まわりに徐々に回転させ、支持脚が倒れる直前のところをカメラで撮影する。この時の傾斜角 θ_3 を前節と同様に画像処理ソフトウェアで計測し、これを転倒限界とする(図10)。

使用した足部は、表1のNo.1とNo.3である。これは、開き角 30° の最大摩擦角が 45° よりも大きかったからで、テープがある場合とない場合を比較するためである。また、2kg~10kgの荷重を用意し、これを2kg毎に4本の支持脚間中央のフックにかけて、それぞれで転倒限界を調べた(図11)。実験は同条件で3回ずつ行った。

また、足部がきちんと螺旋に接するように、足部と支持脚の連結部分に球面ジョイントを用いる(図12)。

Fig. 8: Conceptual diagram of experimental setup

Fig. 9: Rail under the spiral

Fig. 10: Rollover angle along the central axis of the spiral

Fig. 11: Experimental device and load

5.2 実験結果と考察

実験条件の違いによって、転倒の様子が異なった。その様子は、A: 装置が螺旋から滑り落ちる、B: 装置が螺旋と一体となってレールから転がり落ちる、C: 最初は装置が螺旋の上を滑るが、途中で螺旋と一体となってレールから転がり落ちるの3種類に

Fig. 12: Spherical joint and foot

分類される。各荷重をかけた時に足部がどのように転倒したかを表 2 に示す。

表 2 を見るとテーパ 0° とテーパ 6° の時で転倒状態に大きな違いが現れた。図 6 からわかるように、テーパ 0° に比べテーパ 6° の方が摩擦力が大きい。このため、螺旋から滑り落ちにくくなり、装置と螺旋が一体化して転がり落ちることになったと考えられる。

Table. 2: States of rollover

荷重 (kg)	開き角 30° テーパ 0°	開き角 30° テーパ 6°
0	A	C
2	A	B
4	A	B
6	A	B
8	A	B
10	A	B

次にそれぞれ 3 回計測した傾斜角の平均値と標準偏差を算出する。各荷重における傾斜角の変化を図 13 に示す。

図 13 を見ると、どちらの足部を取り付けていても、荷重が大きくなるに従い傾斜角が小さくなった。傾いた装置に荷重をかけると重力により転倒方向のトルクが生じる。このトルクは荷重に比例する。そのため荷重が増えると少しの傾斜角でも転倒限界のトルクに達したと考えられる。

結言

本研究では、二重螺旋推進機構における支持脚の移動機構について検討した。脚の移動機構に関しては 4 リンク型の平面マニピュレータにより実現することにした。支持脚の足部については逆 V 字形状の試作モデルについて摩擦特性を調べた。その結果、螺旋に沿う方向については、V 字部分のテーパ角度を大きくすると最大摩擦角が大きくなること、開き角が大きいと把持する力が弱くなることがわかった。また、螺旋の円管方向では、テーパ角度を大きくすると最大摩擦角が小さくなることがわかった。

次に転倒限界について考察した。転倒限界は、荷重を大きくしていくと小さくなることがわかった。また、足部と螺旋の間の摩擦力が小さいと螺旋から滑り落ちる挙動を、逆に摩擦力が大きいと滑り落ちず、装置が螺旋と一体となって転がり落ちる挙動を示す傾向が見られた。

Fig. 13: Mean values and standard deviations of rollover angles

今後、実機的设计では今回得られた知見を活かして、姿勢の安定性を向上することが望まれる。

参考文献

- [1] 国土地理院の湖沼湿原調査：日本全国の湿地面積の変化 (調査結果) : <http://www1.gsi.go.jp/geowww/lake/shicchimenseki2>
- [2] Hanajima, N., Hayasaka, Y., et.al.: Spairal propulsion mechanism in wetlands -Relation between torque and thrust-, JSED 2008, pp. 57-58, (2008)
- [3] 早坂, 花島, 他: 丈長草地における螺旋推進機構の特性解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2A1-F14(1)-(4), (2010)
- [4] Hanajima, N., Hayasaka, Y., et.al. : Double Spiral propulsion mechanism in wetlands, JSED 2009, pp. 77-78, (2009)
- [5] 早坂 佳史, 花島 直彦 他; 湿原における移動を目指した螺旋推進機構の開発 (移動特性と駆動機構); Robotics Symposia2009
- [6] 早坂 佳史; 丈長草地における螺旋推進機構の推進特性; 室蘭工業大学, 平成 21 年度修士論文