二重螺旋移動における ZMP を用いた移乗機構の動力学的バランス

Dynamical stability using ZMP for a transfer robot on double spiral propulsion

○ 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) 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.

Kawauchi Kunio, Muroran Inst. of Tech.

This paper addresses transfer 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 transfer robot is equipped with six supporting legs, and the dynamical stability analysis using the ZMP.

Key Words: Wetland, Spiral, transfer robot, dynamic stability analysis, ZMP

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、都市開発や農地転換により、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。北海道に存在する湿原は、全国の湿原面積の 90[%] が存在しているが、明治・大正時代と現在を比べると、約 60[%] 減少している。全国で最も減少した湿地は、北海道の釧路湿原で、大正時代は $337.39[km^2]$ だったが、現在では $226.56[km^2]$ で約 33[%] の湿地が消失してしまっている。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、様々な自治体・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している。

そこで、調査作業をロボット技術で支援することを目指して、螺旋駆動機構が提案され [1]、プロトタイプの開発とその移動特性の解析が行なわれた [2]。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移動機構が提案されている [3]。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。

二重螺旋移動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。また、ロボットは螺旋を回転させた後、螺旋の上を乗り移る。

本稿では、螺旋の上を乗り移るロボットの移乗機構を考案し、動作方法を検討する。また、螺旋の転がりにより移乗ロボットを転倒させないことを目的として、主に二足歩行ロボットで用いられている ZMP (Zero Moment Point) を用いた動的安定の解析を行うための式の導出を行う。

2. 螺旋移動機構に関する従来の研究

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脚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る。

3. 移乗ロボットの概略

ロボット本体は 2 つの螺旋を交互に駆動させると共に、螺旋の上を移乗する必要がある。

文献 [4] にある歩行機械を参考に、6 つの支持脚を持つ移乗機構を考案した。三角形に配置された 3 本の支持脚を交互に動作させ前進や後進、旋回を行う。

図 2 に示すように、上段フレームと下段フレームに分かれており、それぞれ垂直に伸縮可能な支持脚が 3 本ずつ、三角形に取り付けられている。上段フレームと下段フレームを、スライド機構により交互にスライドさせることで螺旋の上を移乗する事ができる。支持脚の先端には螺旋を把持し回転駆動させる事ができる足部が取り付けられており、支持脚を縮ませた際、螺旋を持ち上げ回転駆動させ、支持脚を伸ばし螺旋を地面に置くという二重螺旋移動機構の動作を行うことが出来る。

各脚に加わる無理な力を考慮する必要が無く、機構的に単純化、

Fig. 1: Moving steps of double spiral propulsion

軽量化できる等の利点がある。

移乗ロボットの一連の動作を図 3 に示す。まず上段フレームの支持脚で螺旋 B を、下段フレームの支持脚で螺旋 A を支持している。また、それぞれの足部で螺旋を把持している (①)。上段フレームの支持脚を縮ませ螺旋 B を持ち上げた状態にし、上段フレームの支持脚で螺旋を支持する (②)。上段フレームの支持脚の足部で螺旋 B を 1 回転駆動させ、上段フレームの支持脚を伸ばし、螺旋 B を地面に下ろす (③、④)。

下段フレームも同様に支持脚を縮ませ螺旋 A を持ち上げた状態にし、上段フレームの支持脚で螺旋を支持する (⑤)。下段フレームの支持脚の足部で螺旋 A を 1 回転駆動させ、上段フレームの支持脚を伸ばし、螺旋 A を地面に下ろす (⑥、⑦)。

上段フレームの足部を螺旋 B から離し、螺旋の把持をやめ、上段フレームの支持脚を縮ませ螺旋 B を持ち上げ、遊脚状態にする (⑧)。スライド機構により上段フレームを一つの螺旋の 1 ピッチ分進行方向に動作させ、支持脚を伸ばし再び螺旋 B を足部で把持する (⑨、⑩)。

下段フレームも同様に足部を螺旋 A から離し、螺旋の把持をやめ、上段フレームの支持脚を縮ませ螺旋 A を持ち上げ、遊脚状態にする (⑪)。スライド機構により下段フレームを一つの螺旋の 1 ピッチ分進行方向に動作させ、支持脚を伸ばし再び螺旋 A を足部で把持する (⑫、⑬)。

以上の ①～⑬ の動作を繰り返すことで螺旋と移乗ロボットが動作方向に進む。

動作方向には前進・後進の他に旋回も必要となる。旋回時は螺旋も旋回方向に向く必要があり、前進や後進よりも動作工程が多くなる可能性がある。また、旋回時に 2 つの螺旋が干渉してしまう可能性もあるため、移乗ロボットの移乗方法を更に検討していく必要がある。

Fig. 2: Transfer robot and double spiral

Fig. 3: Transfer robot and double spiral

4. ZMP

螺旋は地面に置いた時、地面を転がる性質を持っており、湿原調査の機材を載せた移乗ロボットが螺旋上を移乗する場合、螺旋の回転と共に移乗ロボットも回転し転倒してしまう可能性がある。このことを踏まえて、螺旋は移乗ロボットと共に転がることを防ぐ必要がある。文献 [5] では、移乗ロボットをどこまで傾けることが出来るのかを知るため、転倒限界を調べた。この転倒限界は静的な限界値であり、実際の湿原で起こりうる草からの反力や風などの外力が生じた場合、重心が接地幅よりも外に出てしまい、すぐに転倒に至ってしまう恐れがある。

そのため、外力等で多少傾いても転倒しないことを目指して ZMP (Zero Moment Point) を用いた動的な安定を検討する。

ZMP は、1972 年に Vukobratović らにより提案された概念で、床反力の圧力中心点であり、ZMP まわりではモーメントが 0 になる。また、ZMP はロボット本体の動力学からも求めることができる。ZMP は主に二足歩行ロボットで用いられ、足裏面と地面との接触が維持できるか否かを判別する指標とされている。

5. ZMP を用いた動的安定解析

ZMP は接触する床が平面の状態でのみ取り扱うことが出来る。そのため、湿原のような柔らかく沈み込む地面で適用させるため、地面との接触面が地面と水平になっている所を仮定の接地面として、仮定の接地面上を移動する ZMP を仮定 ZMP とする。

図 4 に、螺旋が回転し移乗ロボットが傾いたある瞬間のモデル図を示す。移乗ロボットは螺旋の上に固定されている。ZMP は螺旋と地面の接地幅の中にあり、接地幅を出ることはなく、接地

幅の端まで行くとその点を中心に回転してしまう可能性がある。この ZMP を接地幅内で制御するによって移乗ロボットが転倒することを防ぐ。

地面上の右向きに x 軸、鉛直上向きに z 軸をとる絶対座標系を置く。絶対座標系からの ZMP の (x 座標, z 座標) を (x_{zmp}, z_{zmp})、螺旋が地面に接している接地幅を W 、螺旋と移乗ロボットが受ける荷重を m 、重力加速度を g 、螺旋と移乗ロボットの重心を G 点、重心の (x 座標, z 座標) を (x_G, z_G) と置く。螺旋の回転軸の座標を (O_x, O_z) 地面からの床反力 f の x 成分を f_x , z 成分を f_z と置く。今、移乗ロボットが螺旋と共に左から外力 F を受ける

とすると、

x 軸方向の運動方程式は

$$m\ddot{x} = F + f_x \quad (1)$$

z 軸方向の運動方程式は

$$m\ddot{z} = f_z - mg \quad (2)$$

螺旋の軸方向を y 軸とし、重心まわりの慣性モーメントを I_y とすると、重心まわりの回転運動の運動方程式は

$$f_z(x_G - x_{zmp}) - f_x(z_G - z_{zmp}) - I_y\ddot{\theta}_y - M = 0 \quad (3)$$

式 (3) に式 (1), 式 (2) を代入し計算すると

$$m(\ddot{z} + g)(x_G - x_{zmp}) - (m\ddot{x} - F)(z_G - z_{zmp}) - I_y\ddot{\theta}_y - M = 0$$

$$x_{zmp} = x_G - \frac{(z_G - z_{zmp})(m\ddot{x} - F) + I_y\ddot{\theta}_y + M}{m(\ddot{z} + g)} \quad (4)$$

となる。

ZMP が螺旋の軸中心である O 点の真下に来れば移乗ロボットは傾くこと無く安定する。 M は外力 F とそれによって生じる慣性モーメントを補償するものである。

よって、ZMP の座標が ($O_x, 0$) のとき、

$$z_G F - I_y \ddot{\theta}_y - M = 0 \quad (5)$$

となるような M を求めることで外力と慣性モーメントを打ち消すことができる。

ZMP の座標を ($O_x, 0$) に来るようにするためには、移乗ロボットの重心を移動させることが必要となる。そのため、これからは重心位置を移動させる機構を検討し解析していく。

結言

本研究では、二重螺旋移動における移乗ロボットの移乗機構について検討を行った。6 つの支持脚を持つ移乗機構を考案した。伸縮可能な 3 本の支持脚が取り付けられた上段フレームと下段フレームをそれぞれ進行方向にスライドさせることで螺旋の上を移乗する機構を検討した。

また、多少傾いても転倒しない動的な安定を目指して ZMP を用いて解析のための式の導出を行った。重心の移動を求めることで ZMP を螺旋の軸中心の真下に来るようにし、移乗ロボットの動的安定を保たせることにした。

今後、解析を行なっていくと共に移乗ロボットの重心位置を移動させる機構を検討し、移乗ロボットの姿勢の安定性を向上させていく。

Fig. 4: ZMP

参考文献

- [1] Hanajima, N., Hayasaka, Y., et.al.: Spairal propulsion mechanism in wetlands -Relation between torque and thrust-, JSED 2008, pp. 57-58, (2008)
- [2] 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)
- [3] Hanajima, N., Hayasaka, Y., et.al.: Double Spiral propulsion mechanism in wetlands, JSED 2009, pp. 77-78, (2009)
- [4] 妻木, 阿部, 他: 6 脚歩行機械 Landmaster3 の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.24 No.7, pp. 851-860, (2006)
- [5] 對馬, 花島, 他: 二重螺旋推進における支持脚の移乗機構—支持脚の転倒限界—, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2I1-3, (2011)