

令和元年6月18日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06171

研究課題名(和文) 湿原移動ロボットのための門型脚を有する歩行機構

研究課題名(英文) Walking mechanism with gantry-shaped legs for wetland mobile robots

研究代表者

花島 直彦 (Hanajima, Naohiko)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40261383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：葦などの背が高く、茎が硬い植物が密生する場所を、植物を踏み倒さずに移動できる二重螺旋移動ロボットの開発を進めた。このロボットは螺旋パイプを回転させて進ませ、その上を特殊な脚により歩行する。直進移動や円弧を描く旋回移動や、傾斜地においてバランスを保つ動作法を考案し、動力学シミュレーションによって有効性を確認した。また、ロボットの片側部分を試作して稼働し、このロボットが実際に製作可能であり、想定通りに動作することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

葦などが密生する場所を、植物を踏み倒さずに移動できる機構は他になく、二重螺旋移動機構は独自性のある仕組みである。その機構の実現可能性および適用可能性を実証するために、コンピューターシミュレーションによる動作検証、プロトタイプを製作して動作確認ができたことに学術的な意義がある。開発した技術や知見は、葦が密生する湿原地帯の調査のみならず、笹やぶなどが生い茂る山林などにも適用できる。

研究成果の概要(英文)：We have progressed the development of the double spiral mobile robot which can noninvasively travel the place where plants with high and hard stem grow densely. It makes spiral pipes rotate and move forward, then walks on the spiral pipes with special gantry-shaped legs. We proposed several moving methods, such as going forward, turning along the arc, or keeping balance on a slope. We tested the methods on the dynamics motion simulation to show the efficiency. Further, we built a half-model prototype of the robot. It is shown that the robot can be actually built and operated as expected.

研究分野：制御工学、ロボット工学

キーワード：湿原調査 環境保全 移動ロボット フィールドロボット 泥濘地 丈長草密集地

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、日本の湿原は周辺地域の開発や乾燥化の要因で面積が減少する傾向にあり、湿原保全のため再生事業や環境調査が行われている。湿原の地面は柔らかい泥炭層となっているため、調査器具を持ち運びながら長時間歩くのは容易ではない。希少な植物が生息するため、環境保全の観点からできるだけ草木を踏みつけないように注意する必要もある。このため調査支援ロボットの開発要求が高まっている。我々は、湿原特有の丈長植物の密生地をできるだけ荒らさず、湿地に埋没せずに移動するため、二重螺旋移動機構を提案した。螺旋パイプは回転すると密生した植物の間を縫うように進み、植物を踏みつけることはない。また、枯れ草が堆積してネット状になった地面に、螺旋パイプが複数の点でもって接するので、地面を突き破ってその下の軟弱な地面に沈むことはない。

二重螺旋移動機構を利用したロボットを図1に示す。門型をした4つの脚をもち、その下に左右それぞれ2つ1組の螺旋パイプ(二重螺旋パイプ)が配置されている。二重螺旋パイプのうち機体の足場になる方を支持螺旋、もう一方を移動螺旋と呼ぶ。移動螺旋を回転して進ませ新しい足場をつくり、門型脚を一脚ずつ支持螺旋から移動螺旋に乗り換える。静的な歩容により脚を進ませることにより、ロボットは前進する。

近年、野外環境で作業するロボットの研究開発が盛んとなり、フィールドロボティクスという分野を形成している。建設、山林、農業、鉱山、海中、レスキュー、軍用、宇宙などがその対象となる。移動機構は環境に応じて車輪、クローラ、脚式、ヘビ型など様々なものが採用されている。湿地帯を移動する機構としては、水面を浮いて進むボート型、沼地を沈まずに進むスクリー型が提案されている。しかしながら、丈長植物の密生地において植物を踏み倒さずに進む機構は二重螺旋移動機構の他にない。

2. 研究の目的

先行研究により、螺旋パイプの回転機構については実現しているが、螺旋パイプ上の安定した歩行動作の実現については未解決であった。図1のとおり、螺旋パイプは円管形状を持つ。よって、その上に立つと滑落や、螺旋パイプ自身の横転といった危険がある。この問題を克服するため門型脚が提案された。門型脚は円管を跨いで立脚するため安定性が改善されるほか、開閉機構を開くことで遊脚となるので、歩行動作中に脚を持ち上げる必要がないなどの特徴を持つ。

本研究では、この門型脚を用いた移動機構の実現と、これを用いた安定な歩行動作に関して理論面および実証面から解析し、新たな知見を得ることを目的とする。より具体的には、二重螺旋移動機構においてロボットの本体を支える(a)門型脚の開発と(b)移動機構の実現、そして二重螺旋移動機構における(c)理論的、(d)実証的な解析を行う。

3. 研究の方法

前節で示した4つの具体的な目的に分けて研究の方法を説明する。

まず、(a)については、図1の回転関節、開閉機構直動関節、グリッパからなる門型脚を設計し、2脚を製作する。門型脚の設計においては、全体の重量から、門型脚に必要なトルクや開閉力を見積もり、アクチュエータの選定、機構の設計を行う。

次に(b)については、先行研究により開発された二重螺旋移動ロボットの片側ハーフモデルに(a)の脚を組み込む。片側ハーフモデルにおいては、プラットフォームと xy 軸直動関節までが製作され、直動関節のモーターの制御系とパソコンによる位置指令システムまでは実現されている。これに、(a)の脚を2台マウントし、モーターを既存の制御系を組み込む。そして、これらをパソコンの指令値から連動して動作させられることを確認する。

(c)については理論的な考察や検証とともに、動力学シミュレータを使った検証も行う。まず、門型脚を用いた移動機構が持つ特徴を運動学や静力学的な観点から明らかにする。次に多脚式歩行ロボットの力学的安定性に関する手法を用いて、提案機構の動作の安定性について議論する。そして、安定歩行を実現するための歩容の生成手法などについて考察する。このような理論面での裏付けを固めた後は、動力学シミュレータによって、これを検証する。

(d)については、(c)により得られた知見が、実機において適用可能なものかどうかを、(b)で制御系を構築した片側ハーフモデルを使って検証する。

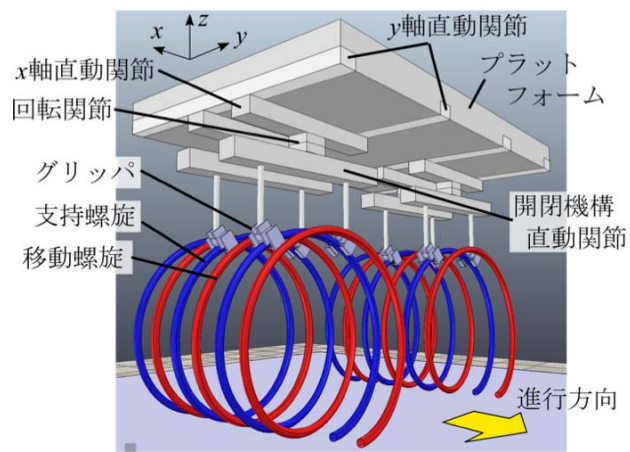


図1 二重螺旋移動ロボットの構成図

4. 研究成果

(1) まず、(a)の研究成果について述べる。図2は門型脚の開閉機構である。底部にはリニアスライドレールを設置し、左右の脚を取り付ける台座がマウントされている。台座は金具で左右のタイミングベルトに接続され、タイミングベルトはモーターにより駆動される。モータを回転すると、左右の台座が同じだけ変位する仕組みである。開閉機構のフレームの中央部に、サーボモーターとハーモニックギアによる回転機構を取り付ける。これを、それぞれ2台製作した。計測実験の結果、回転機構は目標の45.1Nm以上のトルクを、開閉機構は目標の400N以上の力を発生できることを確認した。

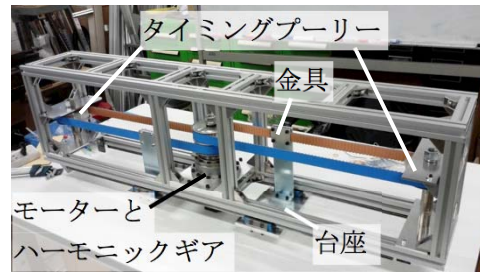


図2 開閉機構

(2) 次に(b)の研究成果について述べる。図3の左側に二重螺旋移動ロボットの片側ハーフモデルに、門型脚を搭載した写真を示す。上から本体となるプラットフォーム、y軸直動関節、x軸直動関節、回転機構、門型脚の開閉機構、脚、螺旋パイプで構成されている。各関節にはサーボモータが組み込まれており、フィールドバスを通じて、サーボアンプとコントローラにより角度制御されている。コントローラはTCP/IPを通じて外部PCと通信でき、コントローラ内のレジスタを介してデータの受け渡しを行う。この機能により、外部PCにより運動学や逆運動学、経路計画の計算を行ない、指令値をコントローラに指示する。これにより、当研究課題の開発目標である二重螺旋移動ロボットが実機として実現可能であることを実証的に示すことができた。

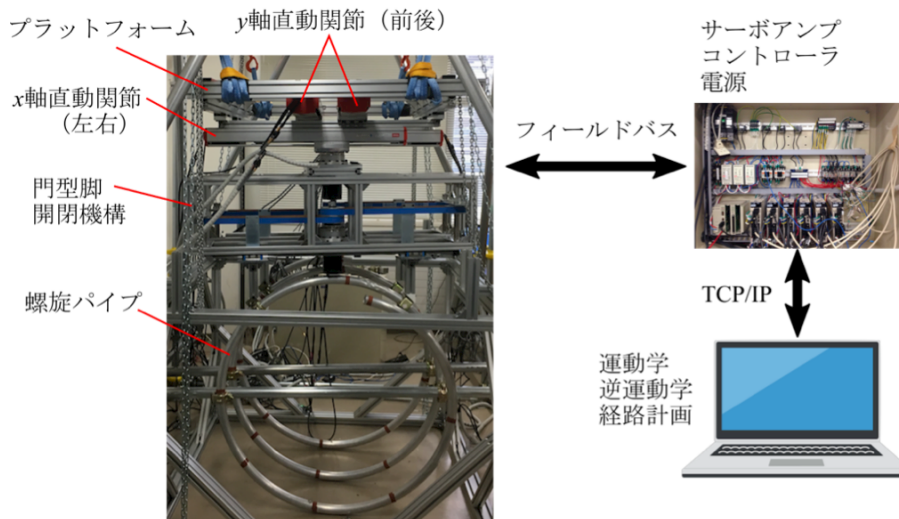


図3 片側ハーフモデル試作機とコントローラとパソコンの統合

(3) 次に(c)の研究成果について述べる。先に述べたように二重螺旋移動ロボットは螺旋パイプを足場として歩行する。螺旋を把持するグリッパはプラットフォームと平行な平面を移動するため、その把持位置はこの平面と螺旋パイプの交点に限られる。よって、この交点座標にグリッパを位置決めする必要がある。このために、まずロボットの運動学と逆運動学の式を導出した。逆運動学により求めた関節座標をコントローラに指示して門型脚を動作する。

歩行動作において、支持螺旋から移動螺旋に門型脚を載せ替えるときには、門型脚を開いて遊脚状態とし、移動螺旋へ移動して閉じる。この際、グリッパは移動経路上で螺旋に接触してはならない。このための螺旋の位置に応じた、グリッパ移動経路の生成が必要となる。本研究ではその手法を提案し、動力学シミュレータ上でそれが有効であることを示した。

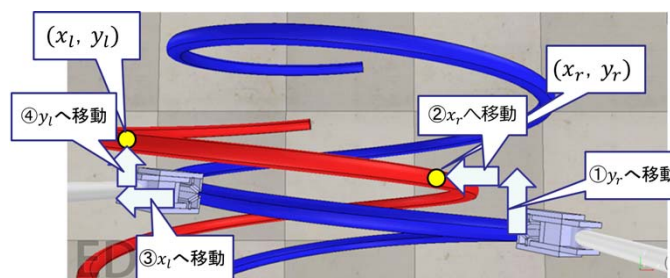


図4 支持螺旋(青)から移動螺旋(赤)へのグリッパの移動経路生成

四足歩行ロボットにおいて、静的に安定な歩容としてクロール歩容が知られている。クロール歩容では、遊脚相においてバランスを崩さないように、3つの支持脚からなる支持多角形の中に重心投影点が入るような重心の移動が求められる。二重螺旋移動ロボットにおいても、支持脚相のうちにプラットフォームを、バランスの保持できる位置に移動させることが必要となる。その様子を表したのが図5である。グリッパの把持点を結ぶ4角形を保持したまま、プラットフォームを移動するのであるが、軌道計画された各プラットフォームの位置に応じて、逆運動学を解いて関節変数の指令値を算出する。

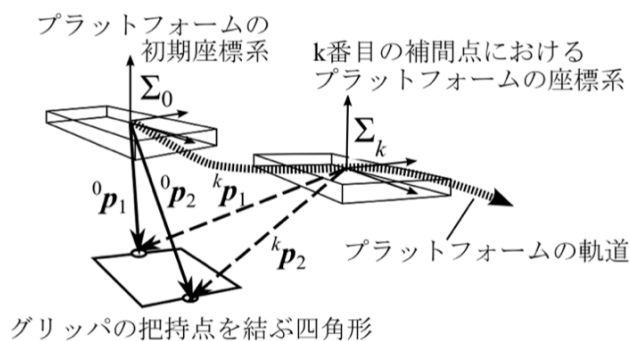


図5 グリッパの把持位置を保ったままプラットフォームを移動させるための軌道計画

ロボットが傾斜地を進む場合には支持多角形が狭くなり、転倒の危険が高くなる。そこで、正規化エネルギー安定余裕という指標を導入し、それが高くなるように歩容を生成し、プラットフォームの位置を計画する方法を考案し、動力学シミュレータによってその有効性を確認した。

以上の開発により、二重螺旋移動ロボットが直進する歩行制御が可能となったため、次にロボットが円弧状に旋回移動をするための動作計画手法を提案した。二重螺旋移動ロボットの旋回動作では、一般の四足歩行ロボットと異なり、足場となる螺旋パイプの移動計画も立案する必要がある。そこで螺旋の1:2旋回移動による動作計画を提案した。これにより二重螺旋移動ロボットは平地における定常円旋回が可能となった。動力学シミュレーションを用いて、旋回角5~9度において定常円旋回動作可能であることを示した(図6)。さらに、この旋回手法を傾斜地に適用したところ、平地と同様に定常円旋回動作可能であった。

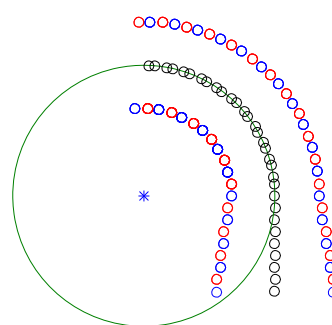


図6 定常円旋回の様子。赤丸と青丸は各ステップの螺旋パイプの位置を、黒丸はプラットフォームの位置を表す

(4) 最後に(d)について述べる。(b)で統合されたシステムを用いて、二重螺旋移動機構における実証実験を実施した。静的な状態において、機体を傾斜させ、重心を移動し転倒限界を調べた結果、(c)の安定余裕が姿勢安定の指標として、実際のロボットでも機能することが確認できた。これにより、安定余裕を考慮した歩容生成法を実機の制御に適用できる可能性を示せた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Naohiko HANAJIMA, Qunpo LIU and Hidekazu KAJIWARA, A Four-legged Mobile robot with Prismatic Joints on Spiral Footholds, *Memoirs of the Muroran Institute of Technology*, No.65, pp.23-30 (2016)

[学会発表] (計19件)

- ① 佐々木 宏太, 花島 直彦, 藤平 祥孝, 水上 雅人: 二重螺旋移動ロボットの片側モデル試作機における正規化エネルギー安定余裕の推定, 第51回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, (2019)
- ② 佐々木 大輝, 花島 直彦, 長谷 隆功, 藤平 祥孝, 水上 雅人: 二重螺旋移動ロボットにおける旋回移動のための動作計画, 第61回自動制御連合講演会 (2018)
- ③ 佐々木 宏太, 花島 直彦, 水上 雅人, 藤平 祥孝: 二重螺旋移動ロボットにおける4点の把持位置を考慮した動作計画, 第50回計測自動制御学会北海道支部学術講演会 (2018)
- ④ 金子 太貴, 佐々木 宏太, 花島 直彦, 水上 雅人, 藤平 祥孝: 二重螺旋移動ロボットにおける正規化エネルギー安定余裕を考慮した斜面歩行シミュレーション, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '17 (2017)
- ⑤ 佐々木大輝, 金子太貴, 花島直彦, 水上雅人, 藤平祥孝: 二重螺旋移動ロボットの旋回移動における動作計画, 第21回知能メカトロニクスワークショップ (2016)
- ⑥ Naohiko Hanajima, Taiki Kaneko, Hidekazu Kajiwara and Yoshinori Fujihira: Static Stability of Double-Spiral Mobile Robot Over Rough Terrain, 2016 9th EUROSIM

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：物井 佑樹
ローマ字氏名：(Monoi, Yuuki)

研究協力者氏名：金子 太貴
ローマ字氏名：(Kaneko, Taiki)

研究協力者氏名：佐々木 大輝
ローマ字氏名：(Sasaki, Daiki)

研究協力者氏名：劉 健
ローマ字氏名：(Liu, Jian)

研究協力者氏名：佐々木 宏太
ローマ字氏名：(Sasaki, Kota)

研究協力者氏名：當田 一貴
ローマ字氏名：(Touda, Kazuki)

研究協力者氏名：長谷 隆功
ローマ字氏名：(Hase, Takanori)

研究協力者氏名：横沢 裕哉
ローマ字氏名：(Yokosawa, Yuya)