

機関番号：27101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360119

研究課題名（和文） 歯車減速機を使わないロボット脚の開発

研究課題名（英文） Development of Robotic Leg without Using Gear Reducers

研究代表者

ゴドレール・イヴァン（GODLER IVAN）

北九州市立大学・国際環境工学部・情報メディア工学科・教授

研究者番号：60304755

研究成果の概要（和文）：本研究ではロボット歩行技術のために新しいアクチュエータ機構を考案し、ロボット脚に用いた。アクチュエータは歯車減速機等の駆動方式を用いず、モータと関節間に捻り糸の伸縮によりトルクを伝達する機構である。受動的歩行を実現するためには制御方法を検討し、位相平面上の軌跡を用いた制御手法を考案した。また、歩行の安定化を行うためには遺伝的アルゴリズムを用いた。良好なシミュレーション結果を得て、実験装置を完成させた。

研究成果の概要（英文）：A contribution of this research is in the field of robot walking methodology by proposing a new type of actuator for robotic legs. The actuator does not use gear reducer or other classical methods, but transmits torque from the motor to the joint by using contraction of a pair of twisted strings. Control methods to realize passive dynamic walking were studied, and a method by using trajectory in a phase-plane was proposed. Walking stability was improved by using genetic algorithm. Good results in simulation were obtained and experimental setup was built.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	9,300,000	2,790,000	12,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボット、歩行、脚、アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

2足歩行、4足歩行、または、6足以上の脚式ロボットの歩行が盛んに研究されている。歩行の実現は主に2通りある：受動歩行（passive）と能動歩行（active）。受動歩行はアクチュエータを一切搭載せず、緩やかな下り坂を歩きながら降りていく歩行である（McGeer 1990）。受動歩行は自然界で観察できる歩行に最も近く、少ない消費エネルギー

で歩行が可能である。消費エネルギーを重量と歩行距離で正規化した係数である「移動コスト係数」は受動歩行の場合に0.1以下である（Collinsら 2005）。しかし、受動歩行の場合にはエネルギー供給が行わないため、平地で持続する歩行が不可能であり、また、制御が行われていないために荒地での歩行も不可能である。一方、現在のロボットで一般的に実現されている歩行は能動的な歩行

である。能動的な歩行では関節と駆動モータが常に結合されており、関節が常時に駆動および制御されている。結果的に、消費エネルギーが増大し、移動コスト係数が 3.0 以上になることが知られている (Collins ら 2005)。

近年の研究 (カーネギーメロン大学 (米国)、MIT (米国)、Delft 大学 (オランダ) 他) では、従来坂降りしかできない受動歩行機構に平地での歩行が可能になるためのエネルギーを供給し、平地で受動歩行に近い「受動的歩行」(passive dynamic walking) の実験的な実現が行われている (Collins ら 2001、Wisse ら 2007 他)。だが、いずれの研究では従来の駆動技術 (サーボモータと歯車減速機や空気圧式人工筋肉である McKibben アクチュエータ等) を使用しているため、受動歩行を実現するためには不可欠であるモータと関節の分離を行う専用の装置が必要であるため、ロボットの関節が大きくなり、複雑である。また、空気圧式人工筋肉の場合には圧縮ガスがエネルギー源であるため、制御が困難であり、性能面、コスト面でも十分な結果が得られにくい状況である。

2. 研究の目的

本研究の目的は簡単な構造でありながら、受動歩行 (関節と駆動モータを完全に分離する)、平地や緩やかな登坂での受動的歩行 (必要なエネルギーだけを供給する)、更には、必要に応じて (例えば、階段登り降りのとき等に) 能動的な歩行 (モータと関節を常時に結合する歩行) といった 3 種類の歩行を特別な付加装置や切り替え機構を用いずに、駆動モータの制御のみで実現することである。

本研究の中心的な要素技術は図 1 に示す回転モータと 2 本の高分子繊維系で構成されるアクチュエータである。

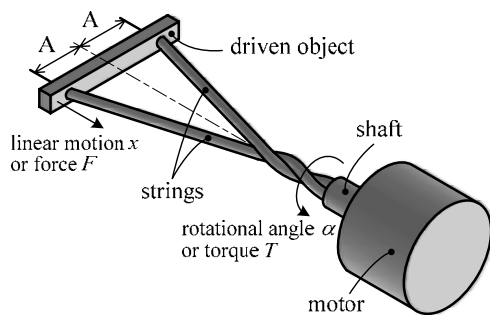


図 1 アクチュエータの構成図

モータ軸の回転により 2 本の糸が互いに捻り込み、モータの回転角度 α を移動距離 x に変換する。回転角度 α と移動距離 x の関係は式 1 に示す。

$$x = \sqrt{L^2 - A^2} - \sqrt{L^2 - (A + R\alpha)^2} \quad (1)$$

ここで、 L は伸びた状態の糸の長さであり、 R は糸断面形状の半径であり、 A は糸の固定位置間の半距離である。

また、モータのトルク T と引張り力 F の関係は式 2 に示す。

$$F = \frac{\sqrt{L^2 - (A + R\alpha)^2}}{R(A + R\alpha)} T \quad (2)$$

以上の数式からはアクチュエータの基本的な設計が可能になる。

3. 研究の方法

考案したアクチュエータは歯車駆動方式と違って、筋肉のように引張り力を発生するものである。モータと関節が糸で結合されることになるので、特別な機構がなくても、糸を緩めることだけでモータと関節を完全に分離できる。これによって受動的歩行の実現が可能になる。

本研究では考案したアクチュエータをロボットの脚関節の駆動に使用し、従来に一つの機構で不可能であった 3 種類の歩行、即ち、受動歩行、受動的歩行、能動的歩行をモータの制御のみで選択的にできる新しい歩行メカニズムを提供した。

制御の方法としては、受動歩行を出発点とし、必要なときだけにエネルギーを供給する技術を開発した。研究の目的を達成するためにはまず 3 次元物理シミュレーションライブラリー ODE (Open Dynamic Engine) を用いて歩行のシミュレーションを行い、次は実験のために実験装置を完成させた。

4. 研究成果

(1) 下り坂での歩行安定化

平面内での歩行をする受動歩行機のシミュレーションを ODE ライブラリーを用いて行った。シミュレーションのモデルを図 2 に示す。

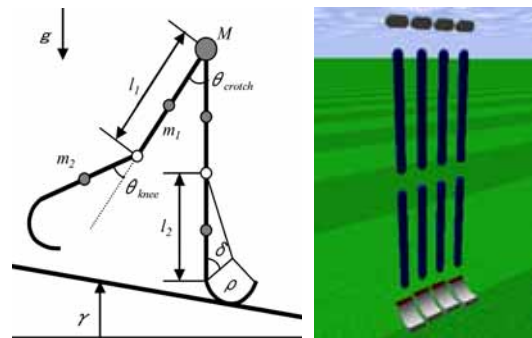


図 2 平面内で歩行する歩行機

受動歩行機は歩行中のエネルギー損失を降りて進む坂の高さの変化に伴う位置エネルギーの減少から回収する原理で歩行する (McGeer 1990)。しかし、坂の傾斜角度 γ が小さいときには十分なエネルギーの回収ができず、歩行の継続が不可能になる。そこで、

必要なときだけに腰関節にトルクを加え、歩行の安定化を図った。

まず、受動歩行機が安定的に歩行する間の腰関節の位相軌跡を図3に示す。

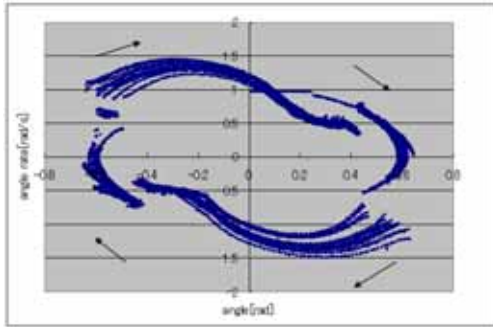


図3 受動歩行機の腰関節の位相軌跡

歩行中に必要なエネルギーが減少すると腰関節の回転速度及び足の振れ角度が減少し、位相軌跡が縮小することが起こるのがわかる。よって、本研究の一つの考案は歩行を継続させるためには、腰関節の位相軌跡を監視し、必要なときだけに腰関節にトルクを加える制御方法である。本制御方法の原理を図4に示す。

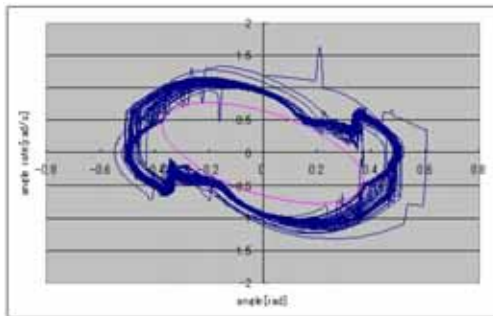


図4 腰関節位相軌跡に基づいた制御

図4に赤線で示した楕円は腰制御の閾値であり、位相軌跡がこの楕円の内側に入っている間には腰関節にトルクを加えることにし、歩行機にエネルギーを供給する。その効果は歩行が継続することになった。シミュレーションの結果からわかったことは、制御を行わないときの歩行機の歩数が40歩だっただけで、考案の位相軌跡に基づいた簡単な制御を行ったときの歩数は100歩以上になった。

(2) 平地での歩行持続

上記行ったシミュレーションは平面内の2次元歩行機の場合であったが、特に2足ロボットの歩行は3次元空間内で行われるので、ロボットのロール運動、ピッチ運動及びヨー運動が同時に発生することがわかる。

3次元空間内の2足歩行機の安定化を検討するためには図5に示す足首のない「竹馬ロボット」をシミュレーション上で実現した。

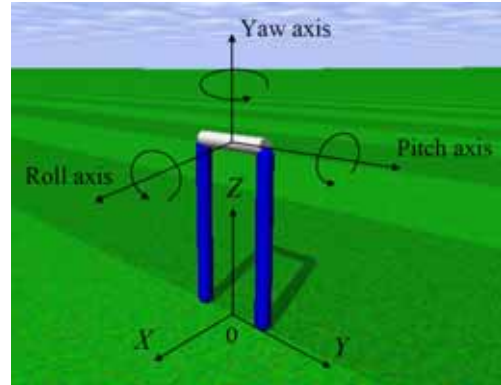


図5 3次元運動を可能にする「竹馬ロボット」

本ロボットは両膝に伸縮するスライダ関節をもち、転倒しないための支持脚の切り替え制御アルゴリズムを開発した。

ロール運動に関しては、機械エネルギー（運動エネルギーと位置エネルギーの和）を基準にした制御を行った。転倒しない安定的な足踏み運動を継続するために、ロール運動における機械エネルギー閾値を設け、この閾値によって支持脚の切り替えを行った。ロボットが転倒したときの運動エネルギーの増加グラフを図6に示し、考案した支持脚切り替え制御による安定化の結果は図7に示す。

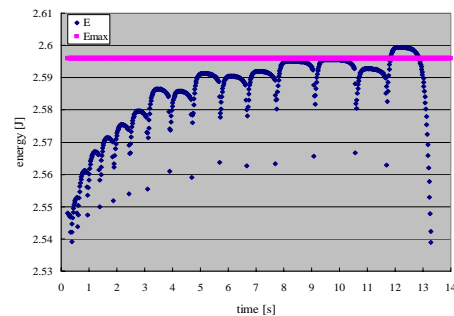


図6 ロボットが転倒したときのロール運動における機械エネルギーの増加

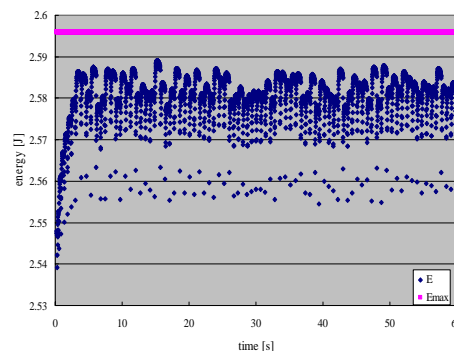


図7 ロボットが転倒しなかったときのロール運動における機械エネルギーの推移

ロール運動における機械エネルギーの閾値に基づく支持脚の切り替えは安定化に効果的であることがわかった。

次に、前後方向の運動であるピッチ運動の安定化について検討した。

足首のない竹馬ロボットの継続的な足踏み運動を行うために腰関節の角度、即ち、歩幅の制御を行う必要がある。倒立振り子である2足ロボットは非線形的なシステムであるため、必然的にコントローラも非線形的にならなければならない。本研究では腰関節の歩幅角度を非線形的に制御するための法則として式3の多項式を考案した。

$$\theta = A\beta + Bv_x + Cv_x^2 + Dv_x^3 \quad (3)$$

ここで、 θ は制御する腰関節の角度であり、 v_x はロボットの腰の進行速度であり、定数 A, B, C, D はコントローラのパラメータであり、適切な設計手法で決める必要がある。

本研究ではコントローラのパラメータを決めるために遺伝的アルゴリズムを用いた。各コントローラの定数 A, B, C, D を固体とみなし、各個体に24ビット語長の遺伝子を配分し、進化アルゴリズムを行った。進化による転倒までのロボットの足踏みの歩数の推移を図8に示す。

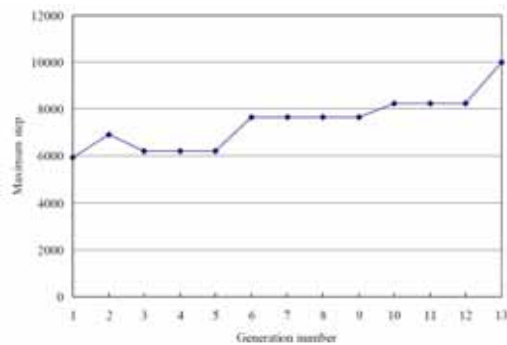


図8 世代増加に伴う歩数変化

遺伝的アルゴリズムによってコントローラのパラメータ決定が有効であることが確認できた。また、それぞれのパラメータの推移を図9に示す。

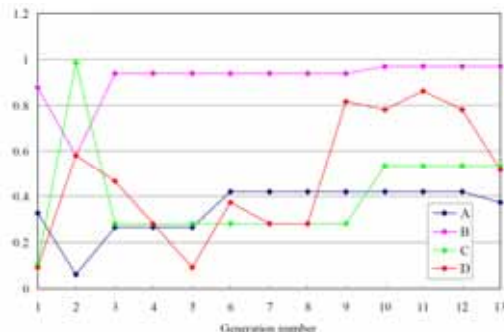


図9 コントローラのパラメータ推移

図9に示したパラメータ A, B, C はそれぞれある値に収束している傾向が確認できるが、パラメータ D に関しては収束の傾向が見

られない。よって、速度の3乗までの考慮が必ずしも必要ないと言えるが、今後の研究ではこの点に関して更に検討したい。

(3)実験装置

本研究では以上のように受動的歩行から受動的歩行への展開をシミュレーション上で検討し、制御アルゴリズムを開発した。また、研究成果を実践的に確認するためには実験装置の開発及び製作を行った。図10は考案した駆動アクチュエータのモータ及び2本の糸を示す写真である。

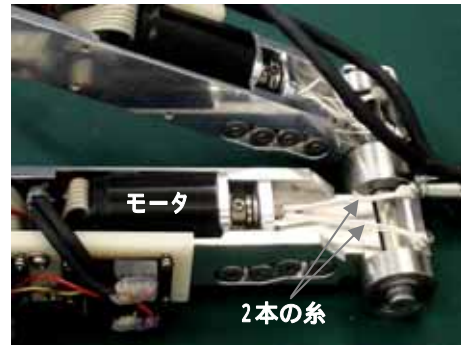


図10 考案したアクチュエータの写真

本アクチュエータは小型2足歩行機の各関節駆動に使用した。図11には試作した歩行機及び歩行実験のために製作したトレッドミルを示す。

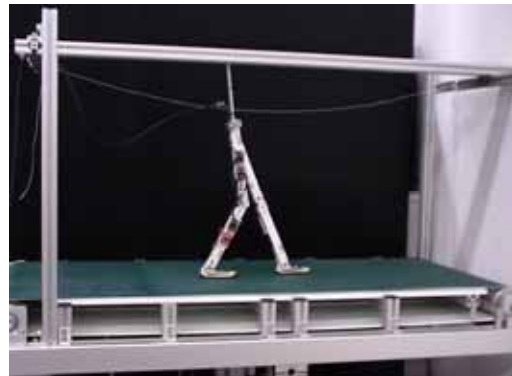


図11 小型歩行機及びトレッドミルの写真

以上の実験装置を用いて、簡単な歩行実験を行った。ここで、支持脚の切り替えの検出を行うためには足裏に地面との接触を検出する静電気容量センサを装着し、支持脚の膝を支持の間にロックさせた。また、左右のバランス（ロール運動の安定化）を行えるためにジャイロセンサ等を搭載しなかったため、左右の転倒を防ぐ目的外で部から手動でサポートを行った。

実験結果としては腰関節の位相平面上の位相軌跡を図12に示す。シミュレーション結果図4との類似が見受けられる。

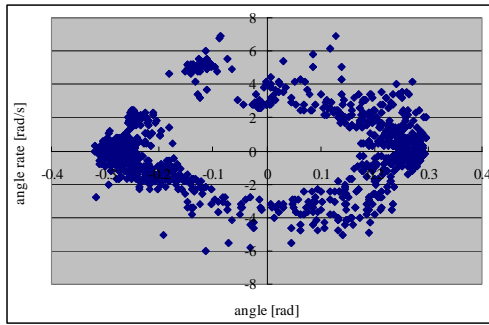


図 1 2 実験における腰関節の位相軌跡

小型歩行機(高さ 28cm)の問題点は大きさが小さいため、直立を制御するために必要なセンサ(ジャイロや加速度センサ等)の装着が困難である。センサの装着が可能であり、上半身の設置も可能になるため、図 1 3 に示す中型の歩行機(高さ 80cm)の試作を行った。



図 1 3 中型歩行機の写真

今後は本研究の継続としてこの中型歩行機を用いて歩行の研究を継続する予定である。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 5 件)

ゴドレール・イヴァン、米村菜美、櫻井和朗、サーボモータとワイヤを使用する新しい筋肉のようなアクチュエータの紹介、第 1 4 回精密工学会生態機構制御・応用技術専門委員会、東京、pp.2~5、2008.

I. Godler, T. Sonoda: A Muscle-Like Actuator Named "Twist Drive", Int. Symp. on Application of Biomechanical Control Systems to Precision Engineering (ISAB2010), Fukushima, pp.81-86, July 2010.

和田寿晴、石本昌也、成田将虎、ゴドレール・イヴァン、受動的歩行における位相軌跡を用いた歩行制御手法、ロボティクスメカトロニクス講演会 1 0、旭川、pp.2A2-E21(1)~(4)、2010.

山崎健悟、ゴドレール・イヴァン、二足歩行におけるロール運動解析及び安定化制御、ロボティクスメカトロニクス講演会 1 0、旭川、pp.2A2-F06(1)~(3)、2010.

成田将虎、ゴドレール・イヴァン、線形倒立振子を利用した 2 足歩行器における歩行停止に関する研究、ロボティクスメカトロニクス講演会 1 1、岡山、pp.2A2-D10(1)~(3)、2011.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

ゴドレール・イヴァン (GODLER IVAN)

北九州市立大学・国際環境工学部・情報メディア工学科・教授

研究者番号：6 0 3 0 4 7 5 5