

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01412

研究課題名(和文)多くのエネルギーを取り出せる動力伝達系を実装した超高速4足歩行ロボットの実現

研究課題名(英文)A high-speed quadruped legged robot equipped with a power transmission mechanism capable of extracting large amount of energy

研究代表者

高木 健 (Takaki, Takeshi)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授

研究者番号：80452605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：11個のリンクから構成される脚機構を提案し開発した。2つの入力を持ちその入力は無限回転できる特長を持つ。また、足先軌道はこの2つの入力の位相差で調整することができる。開発したロボットの全長は1.0 mで、質量は電池を含めて17.9 kgである。一脚は3自由度あり、内2自由度が提案機構で、残り1自由度はロール方向の回転軸である。全体では自由度は12である。また、速度1.0 m/sの歩行を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巡回点検・検査、物流、介護・福祉、セキュリティ、清掃、サービス、農業分野に渡るまでロボットの活躍が期待されている。一方、これらの分野では、人間と同程度にロボットも移動できることが求められる。これらの要求に対し解決する方法の一つとして4足歩行ロボットの実現が考えられる。本研究では、この4足歩行ロボットの新たな動力駆動系を提案し、実機を開発し検証した。

研究成果の概要(英文)：This project proposed and developed a mechanism for legged robot, its consist 11 links. It has two inputs, and the input has the feature that it can rotate infinitely. In addition, the toe trajectory can be adjusted by the phase difference between these two inputs. The total length of the developed robot is 1.0 m, and the mass including the battery is 17.9 kg. Its leg has 3 degrees of freedom, 2 of which are the proposed mechanisms, and the remaining 1 degree of freedom is the axis of rotation in the roll direction. There are 12 degrees of freedom. In addition, walking at a speed of 1.0 m / s was realized.

研究分野：ロボティクス

キーワード：4足歩行ロボット

1. 研究開始当初の背景

生物の形と機能には驚かされることが多い。その一つとして断崖絶壁を移動する哺乳動物の身体能力が挙げられる。身体と地面との相互作用によって生み出される豊かな運動は学術的に興味深い。一方で、生物の機能を工学的に実現する場合、工学的に実現可能な形で再構築する必要がある。なぜならば、生物を構成する筋肉、骨、受容体などと全く同じものを機械に用いることは不可能であり、また生物を構成する要素の形状が必ずしも工学的に製造可能とは限らないためである。つまり、単純に生物を模倣することでは、その機能を機械によって実現することはできない。

これまでロボット工学の分野において「どうすれば動物の身体を機械の身体で再構築できるか」が問われてきた。現状において機械の身体は動物の身体と比較すると、持続的に出力できるエネルギーが劣っている。このことは、ロボットの活躍範囲を狭め、のろまで退屈な動きとなり動物のような躍動的な運動を実現することを困難にしている。この問題を解決するために、アクチュエータから多くのエネルギーを取り出すことが可能な動力伝達系を開発する。

2. 研究の目的

本研究における「機械の身体」を定義する。生物の身体はさまざまな要素が統合され個体となっている。そこで、機械の身体も同様に考え、構造材、モータ、伝達系のみならず、バッテリー、センサ、回路、計算機すべてが含まれ、これらの大規模システムが統合されているものと定義する。本研究では多くのエネルギーを取り出せる動力伝達系を体系化し、機械の身体で躍動的な動物の運動を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

平地を移動する場合、車輪を用いるのが最も効率よくかつ高速に移動できる。アクチュエータの回転も常に一方向でよいと、アクチュエータから無駄なくエネルギーを取り出せる。一方、歩行を行う場合、脚関節は揺動運動を行う。この揺動運動をアクチュエータの回転を正転—停止—反転—停止することで実現する場合、当然アクチュエータには停止が伴う。ゆえに、このような従来手法ではアクチュエータが出力可能な最大のエネルギーを常に取り出すことは不可能である。

多くの歩行するゼンマイ仕掛の玩具は、ゼンマイの一方向の回転運動をリンク機構により揺動運動に変換し歩行を実現している。この方法ではアクチュエータ（ゼンマイ）は正転—停止—反転—停止を繰り返す必要がないため、上記の方法よりもアクチュエータから効率よく多くのエネルギーを取り出すことができる。しかし、このような玩具の足先軌道はリンク機構に依存し、一意なものとなる。ゆえに、地面の形状や外乱に応じて足先軌道を調整することはできない。

足先軌道を変更できない場合、不整地での走行は困難であり平地しか走行できない。平地のみの移動であれば車輪で十分である。そもそも動物のような豊かな運動により不整地を踏破することに歩行ロボットの価値があるため、足先軌道を状況に応じて調整できる機能は必要不可欠である。

これらの問題を解決するために、図1に示すような動力伝達系を開発した。この動力伝達系は常に一方向に回転する2つの入力をもつリンク機構で、その足先は歩行軌道を描く。この動力伝達系を駆動する2つのアクチュエータは正転—停止—反転—停止を繰り返す必要はなく、車輪を駆動するように常に一方向に回転させればよい。そして、大きな特長は2つの入力の位相差を調整することで足先軌道を調整できる点にある。また、進行方向も位相差で調節できる。つまり、車輪を回転させるように駆動できるので効率よく多くのエネルギーを取り出し、またその足先軌道は位相差で調整できるので不整地にも対応できる。

一方、多くのエネルギーを取り出す必要がなく、例えば脚をマニピュレータとして利用する場合は、従来の駆動系のような入力角度を制御すれば、足先位置を自由に動かすことができる。ゆえに、従来通りの動かし方も可能であるため、適応範囲は極めて広い。

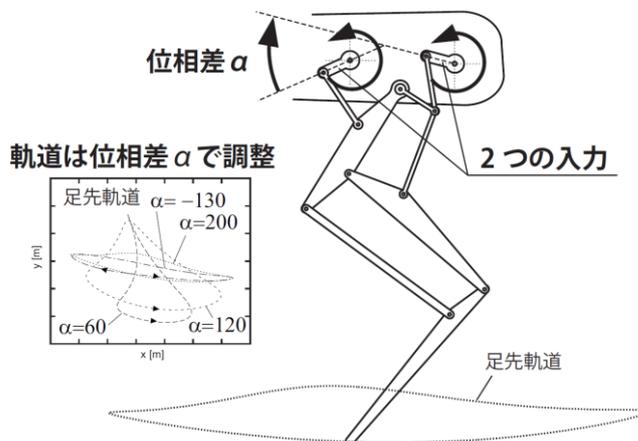


図1 2つの無限回転入力を持つ脚機構のコンセプト

4. 研究成果

提案した機構は図2のように11個のリンクから構成され2つの入力を持ちその入力は無限回転できる特徴を持つ。入力はリンク2と3である。また、図2にそれぞれのリンク長とリンクを構成するために必要となる角度を示す。

開発したロボットを図3に示す。全長は1.0 mで、質量は電池を含めて17.9 kgである。一脚は3自由度あり、内2自由度が本機構で、残り1自由度はロール方向の回転軸であり、脚を開くことができる。全体では自由度は12となる。モータおよびそのドライバはMaxon社製であり、モータには出力70WのEC45flat、ドライバにはESCON 70/10を用いている。電源にはKypom社製の6セルのLiPo電池を2つ直列にして使用している。容量は4500 mAhで電池1つの質量は650 gである。姿勢センサにはZenshin Technology社製LPMS-CU2を用い、足にはサイズ12.0 cmのNewBalance社製のスニーカーFS996DMIを履いている。

まず、入力は一定方向の回転ではなく、揺動運動をさせて、トロット歩行を実現させた。その様子を図4に示す。本ロボットの全長は1.0 mであるが、1.0 sで全長ほど歩行できていることから、速度1.0 m/sで歩行できていることが分かる。

次に、入力を一定方向に回転させることで歩行を実現させた。そのときの足先の軌道を図5(a)に示す。この軌道を用いた歩行実験の結果を図5(b)(c)に、その様子を(d)に示す。リンク11には接地の衝撃を緩和するために弾性要素を実装してあるが、本実験においては前進方向に歩行させたときにその弾性要素により接地時に跳ね不安定になったため、後進方向にて実験を行った。歩行周期は1.0 sとし、左右、前後の脚はそれぞれ0.5周期ずらしたトロット歩容とした。図5(b)に左右の前足の θ_1 、 θ_2 を示す。これらは単調減少しており、往復運動ではなく、無限回転していることが分かる。また、図5(c)はロボットの本体の姿勢を示しており、ロール角、ピッチ角は共に振動的ではあるが転倒していないことが分かる。理論値では歩幅は363 mm($|X_2 - X_1 + l_{17}|$)となるため、歩行周期を考慮すると、歩行速度は0.727 m/sとなる。実験では、接地時に跳ねることおよび滑ることにより、歩行速度は約0.6 m/sとなった。

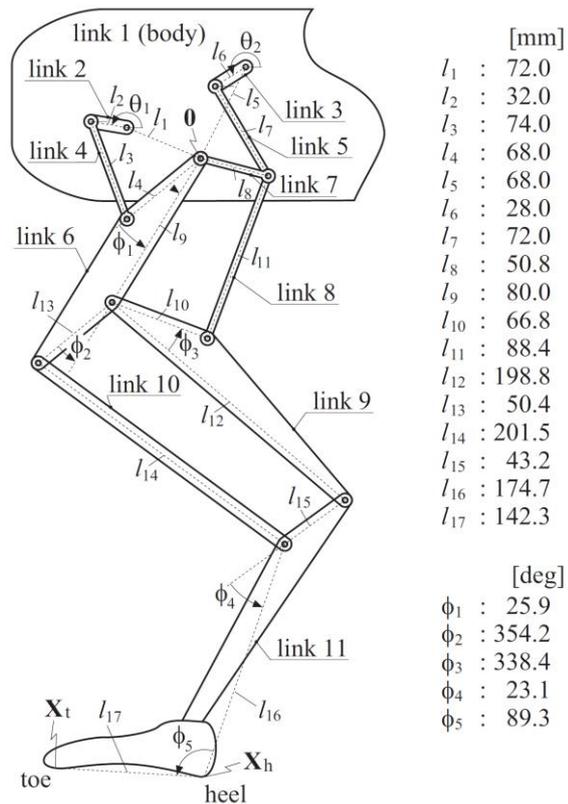


図2 提案機構の構成

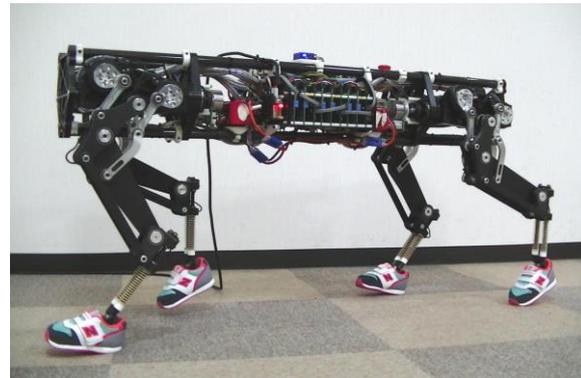


図3 開発した4足歩行ロボット

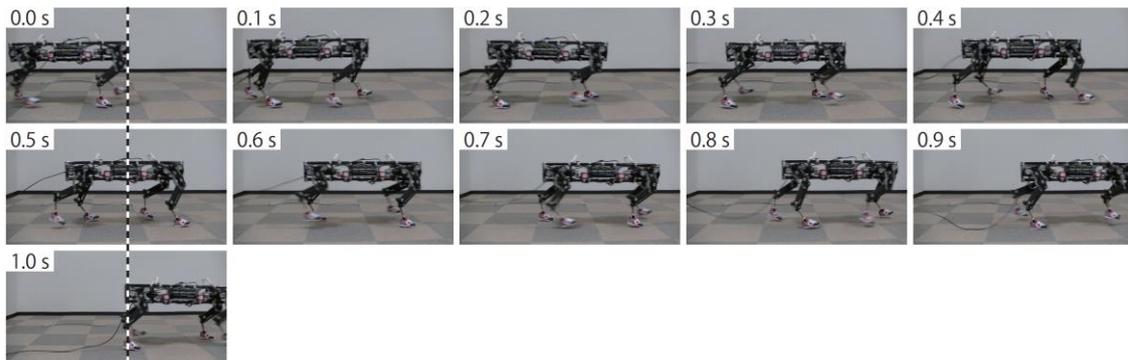


図4 1m/sでの歩行

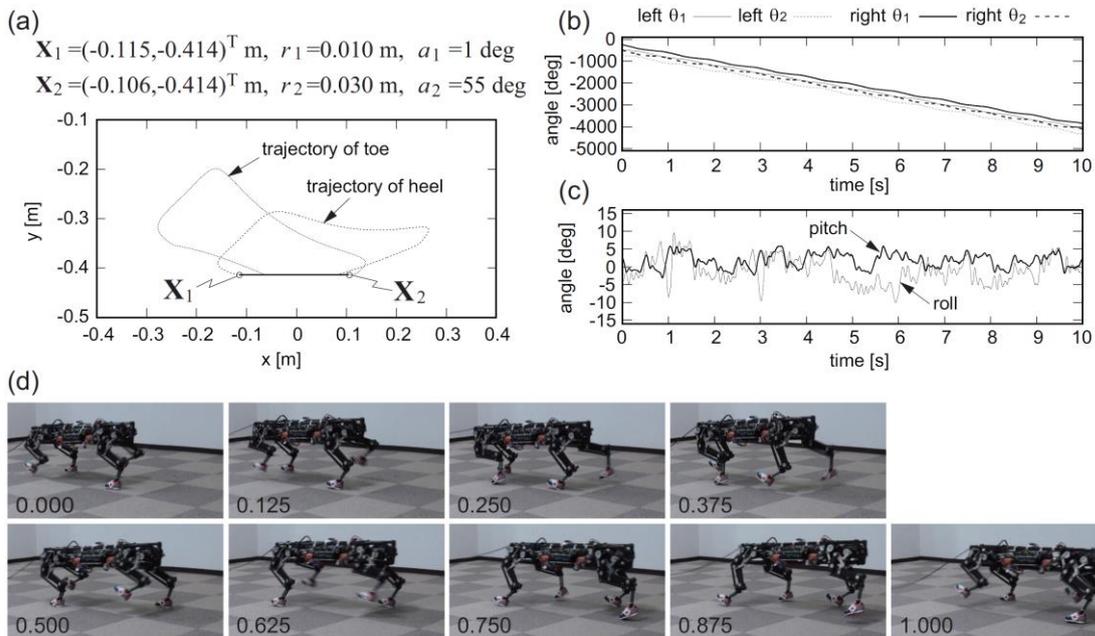


図 5 (a)足先軌道とその軌道生成に用いたパラメータ, (b)歩行実験における θ_1 , θ_2 , (c)歩行実験における本体の姿勢, (d)実験の様子, 写真の中の数字は周期

2つの無限回転を入力できる脚機構を用いて, 歩行周期 1s で約 0.6m/s の歩行速度を実現した. 一方, 無限回転させずに歩行させた場合, 歩行周期は 0.7 s で約 1.0 m/s の歩行速度を実現している. 無限回転入力ができる軌道は現状の方法では歩幅が大きくなる傾向があり, それに伴いバランスを崩しやすく, 結果として歩行速度が遅くなった.

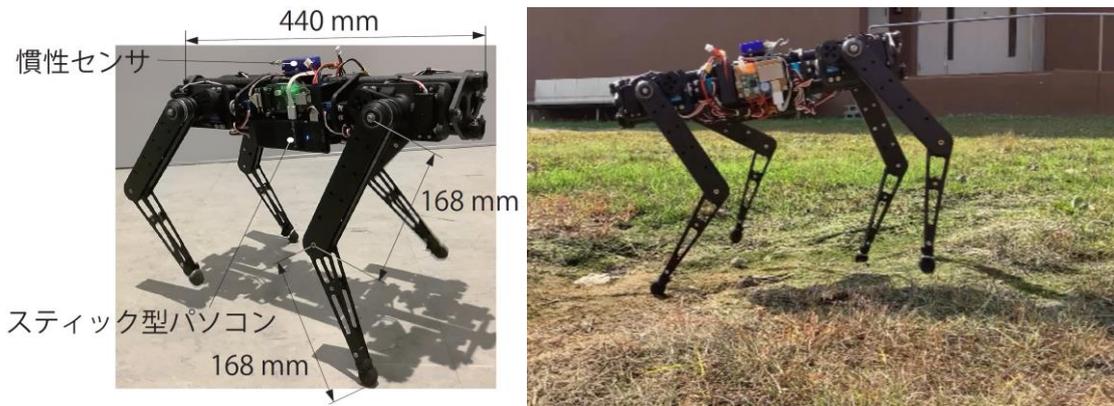


図 6 開発した小型歩行ロボットと不整地を歩行する様子

これらの知見を基に, 新たに歩行ロボットを開発する予定であったが, コロナウイルス感染防止対策に伴い, 学内での製作や実験を十分に行うことが困難であった. そこで, 自宅でも研究を遂行できるように小型の4足歩行ロボットを開発した. 開発した歩行ロボットを図6に示す. 全長は 440 mm であり, 質量は電池を含めて 2.7 kg である. 1脚に対して3つの関節があり, それぞれを RC サーボ (DSSERVO, DS3225) により駆動できる. ただし, 用いたサーボモータの可動範囲の制限により本ロボットは無限回転入力できる機構は実装していない. また, 本体の姿勢を計測するために姿勢センサ (LP-RESEARCH, LPMS-CU2) が実装されている. 歩行に必要なすべての演算は実装されているスティック型パソコン (Intel Atom x5-z8330 CPU@1.44GHz \times 4) により処理される. OS は Ubuntu 16.04 を用いており, リアルタイム処理を行うためにカーネルのバージョンは 4.4.113-rt128 に再構築されている. 歩行に必要なすべての機材は実装されおり, 必要に応じ無線のゲームコントローラ (SONY, Dualshock3) にて操縦することもできる.

どの程度の歩行速度が得られるかを実験により検証した. また, 歩行する地面は滑り止めのゴムが張られているゴム床で行った. 約 0.9 m/s の方向が実現できた. 前述のロボットでは 1秒間にロボットの全長と同程度であったのに対し, このロボットは約 2 倍を移動していることから, 本体の大きさを基準にするとより高速に歩行できた.

次に不整地を歩行させる実験を実施した. 不整地として芝生, 落ち葉, 砂利, ウッドチップの

上を歩行させた。特に、芝生では良好な歩行が確認でき、落ち葉の上も大きな問題はなかった。芝生においては、ゴム床よりも跳ねにくく、また脚先が芝生により固定され滑りにくいため場合によっては整地よりも安定した歩行が観測された。砂利やウッドチップにおいても歩行は可能であることが確認できたが、芝生や落ち葉と比較すると、歩行が安定しにくい傾向が確認された。その原因としては砂利またはウッドチップが動くことによる影響が支配的ではないかと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高木健, 山口駿, 牧野哲也, 姜明俊, 石井抱
2. 発表標題 2つの無限回転を入力できる脚機構を実装した4足歩行ロボット
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木健, 姜明俊, 松本祐二, 石井抱
2. 発表標題 2つの無限回転を入力できる脚機構を実装した4足歩行ロボットによる1m/sの歩行
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高木 健
2. 発表標題 0.9m/sで歩行できるラジコンサーボモータを用いた4足歩行ロボットの開発とその不整地歩行
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口駿, 高木健
2. 発表標題 1つの足先位置に対し4つの異なる可操作性を持つ脚機構におけるトルク特性
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------