

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22389

研究課題名（和文）全身に生物規範機構を搭載した四脚ロボットによる高効率ダイナミック運動の実現

研究課題名（英文）Development of a quadruped robot with bio-inspired mechanisms for highly efficient dynamic locomotion

研究代表者

佐藤 隆紀（Sato, Ryuki）

名古屋大学・工学研究科・特任助教

研究者番号：10883572

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ネコの前肢、後肢、および体幹の特徴的な筋・腱の機能を工学的に規範とした四脚ロボットのための弾性機構を提案した。また、ロボットの瞬発的な運動においてこれらの機構の効果を活用するための運動制御手法を開発した。動力学シミュレーションおよび試作機を用いた実験によって、生物規範機構の効果による高い垂直跳躍運動を実現した。これらを統合し、全身に生物規範機構を有する小型四脚ロボットを完成させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

四脚ロボットの實用化を考えると、安定した歩行のみならず、目的地まで高速に移動したり障害物を飛び越えたりできる瞬発性を伴うロコモーションが必要である。本研究で提案したネコの高度な運動能力に関わる筋骨格構造を規範とした機構と運動制御は、既存のロボットでは難しい瞬発的な運動を実現しうるロボットの新たな設計法および制御法となり、実環境で有用な四脚ロボットの開発に近づく鍵になるといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed the bio-inspired elastic mechanisms for a quadruped robot that mimic passive elements of muscles and tendons of the forelimb, hindlimb, and trunk of a cat. We also developed a motion control method to utilize the effects of these elastic mechanisms in the agile motions, such as jumping and running, of the robot. Dynamics simulations and experiments on a prototype robot demonstrated high vertical jumping motion due to the effect of bio-inspired mechanisms. Then, we developed a small quadruped robot with bio-inspired mechanisms in the whole body by integrating these mechanisms.

研究分野：ロボティクス

キーワード：四脚ロボット 生物規範機構 筋腱複合体 運動制御

1. 研究開始当初の背景

四脚ロボットは、接地点を多く確保することで安定姿勢を取りやすく、また複雑な地形での高い踏破性を持つという特徴から、人間の居住空間や災害現場に至るまで様々な場面での運用が想定され、研究開発が国内外で活発である。次世代の四脚ロボットに要求される運動性能には、以下の2点があると考えている。

- ・ 長い時間活動可能な高効率の定常的歩行
- ・ 高速な移動や高い障害物の飛び越えのための瞬発運動

しかし、既存の四脚ロボットは、移動安定性を重視した構造設計と運動制御によって、その運動能力限界は関節アクチュエータの出力限界に依存し、俊敏な動作が困難である。また、俊敏な動作における大きな衝撃力に耐えられるように、剛体リンクと大型アクチュエータで構成されたロボットは大型化・高重量化を伴い、エネルギー効率が非常に悪くなってしまう。

一方で、動物のネコは、柔らかな身体全体を使って、高速な走行や高い跳躍などができ、自然界でも抜群の身体能力を発揮している。これらは、全身に備わる筋の協調的な活動と、筋や腱の受動的な弾性による力学的エネルギーの蓄積・再利用を活用することで実現される。我々はこれまでに、ロボットの各部位の生物規範機構を提案し、それぞれが脚ロボットの運動に特定の効果を持つことを基本的な実験を通して検証してきた。そこで本研究では、ネコの全身の筋骨格構造と運動制御を規範とした四脚ロボットを開発することで、四脚ロボットの運動性能を飛躍的に向上できると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、ネコ科動物の全身の重要な筋腱構造と、それらを協調させる全身運動制御を参考にした、生物規範機構を有する高運動性能小型四脚ロボットの開発を目的とする。具体的には、ネコの全身に備わる筋や腱のうち、瞬発的な運動への寄与が極めて大きな四肢の重要な筋腱複合体と、四肢を結ぶ体幹の大きな筋・腱群を規範とした弾性機構を考案し、それらの効果を最大限に活用する運動制御手法を提案することで、高効率かつ瞬発的な動作を実現する。

3. 研究の方法

ネコの運動から総合的に多くの知見を得て、それを工学的にロボットに導入することで、四脚ロボットの新しい設計・制御手法を開発し、ロボットの運動を解析して生物規範機構の運動への貢献を検証する。本研究では、研究計画を大きく3段階に分けて、次のように研究を進めた。

(1) 二関節間筋腱複合体を規範とした後脚機構の開発

我々の先行研究で、ネコの高速走行や跳躍運動時に特に活発に働く後肢の股-膝関節間および膝-足関節間に備わる二関節間の筋腱複合体を規範としたそれぞれの生物規範機構を開発した^{[1][2]}。これらは動物の運動中に協調的に利用されており、これら2つを同時に搭載することによる運動への効果について、動力学シミュレーションおよび1脚ロボット試作機を用いた実機実験を通して検証した。

(2) 生物規範機構の効果を活用する運動制御手法の開発

提案する生物規範機構は弾性要素を持ち、それらは外力に対して受動的に作用する。このような機構を持つロボットは強い非線形性を示し、機構の効果を運動に活用するには適切な運動制御が必要である。そこで、ロボットの軌道生成を最適化問題に帰着させ、生物規範機構を含むロボットの動力学モデルを用いた動力学シミュレーションによりロボットの限界性能を発揮する運動制御手法を開発した。

(3) 全身に生物規範機構を搭載した四脚ロボットの開発

上記の結果に基づき、ネコの運動中における各部位の役割および特徴的な筋骨格構造から、後脚だけでなく、四脚ロボットの前脚および体幹の生物規範機構を考案した。使用するアクチュエータの仕様をもとに、四脚ロボット全体の統合設計を行い、全身に生物規範機構を搭載した四脚ロボットを完成させた。

4. 研究成果

前章で説明した項目の順で、研究成果を説明する。

(1) 二関節間筋腱複合体を規範とした後脚機構の開発

ネコの後肢上腿前部の股-膝関節間に備わる二関節間筋腱複合体は、主に脚の前方への引き付けおよび膝の伸展に作用する。下腿後部の膝-足関節間に備わる二関節間筋腱複合体は、脚の蹴り出しに作用し、着地時に地面から受ける衝撃をエネルギーとして蓄え、蹴り出し時にそれを再利用することで、強い蹴り出しを可能にしている。いずれも二関節間にまたがっており、

関節間でのトルク相互利用を可能にする．これら2つの二関節間筋腱複合体は膝関節を共有し，3つの関節間で伝達が行われる．これらを規範とした脚機構のモデルおよび開発した1脚ロボット試作機の外観を図1に示す．

ロボットの大きさおよび各リンク長の比率はイエネコを参考に設計した．股関節と膝関節は低減速比の減速機構を持つ高バックドライバビリティアクチュエータで駆動する．足関節は受動関節である．上腿部の二関節間筋腱複合体機構は，両関節をワイヤ・プーリ機構で接続し，その間に引張ばねを用いること

で，関節間のトルク相互利用と受動弾性機能を有する．下腿部は四節リンク機構の1辺を，引張ばねと直動スライダ機構で構成した弾性リンクに置き換えた構造で，関節間の連動と受動弾性の機能を有する．

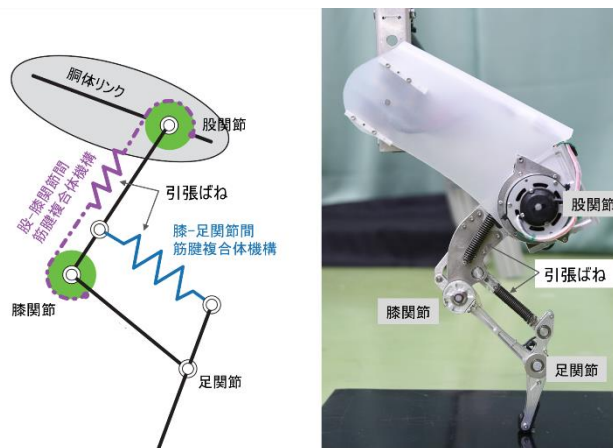


図1 生物規範後脚機構モデルと1脚ロボット試作機

(2) 生物規範機構の効果を活用する運動制御手法の開発

自由度が多く，また外力に受動的に作用する弾性機構を有するために非線形性の強いロボットのために，動力学モデルを用いてオフラインで運動の軌道生成を行う運動制御手法を開発した．具体的には，各駆動関節への指令トルク軌道を補間関数を用いてパラメータ化し，運動目標を評価関数としたパラメータ最適化問題として解くものである．この運動制御アルゴリズムをシミュレータ上で構築し，上記の1脚ロボットの動力学モデルを用いて，瞬発的な運動の一例として垂直跳躍の最大化を目的とした軌道生成を行った．その結果，アクチュエータやロボットの自由度の拘束条件を考慮した入力トルク軌道が得られ，動力学シミュレーションでは体高の2倍の跳躍高さを実現した．さらに，上腿・下腿の機構の有無を変えた4種のモデルでの結果を比較し，それぞれの機構の運動への貢献を明らかにした．シミュレーションで得られた結果に基づいて行った試作機を用いた実験により，生物規範機構を用いたロボットで高い垂直跳躍運動を実現した．

(3) 全身に生物規範機構を搭載した四脚ロボットの開発

前述の結果とこれまでの研究成果を基盤として，後脚だけでなく，四脚ロボットの前脚と体幹の機構を開発した．図2に本研究で開発した全身に生物規範機構を搭載した四脚ロボットの外観を示す．

動物の前肢は，高速走行中の着地や高所から飛び降りて着地する際に，その衝撃を吸収して頭部や胴体へ伝達される衝撃や振動を抑制する．そこで，ロボットの前脚の根元には，肩甲骨の運動中の動きを参考とした粘弾性特性を持つ着地衝撃機構を搭載した．また前・後脚には，運動中に地面との適応的な接触を担保し，地面を蹴り出す力の方向を調整するつま先機構を搭載した．ネコが高速走行をする際や，高所へ跳躍をする際には，脊椎が大きく屈伸していることが分かる．これによって長いストライドを確保したり，前肢や上体を振り上げて発生する慣性を運動に活用していると考えられる．これらの知見から，体幹には高トルクモータと，それに並列に接続された非線形弾性特性を持つ拮抗1対弾性機構とを有する生物規範機構を搭載した．本研究課題で開発した四脚ロボットは，神経振動子に基づく歩容制御の研究や，深層学習による運動獲得の研究にも利用していく予定である．

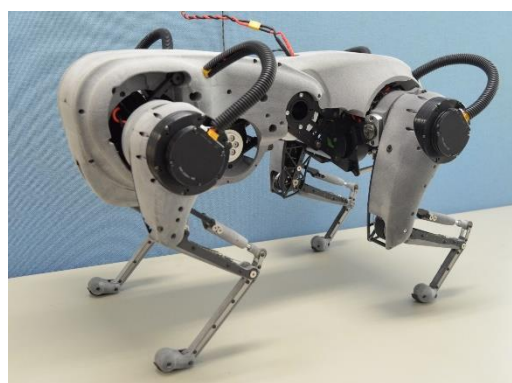


図2 全身に生物規範機構を搭載した四脚ロボット

<引用文献>

- [i] R. Sato, I. Miyamoto, K. Sato, A. Ming, M. Shimojo: "Development of Robot Legs Inspired by Biarticular Muscle-tendon Complex of Cats," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.1552-1557, Hamburg, Germany, Oct. 2015.
- [ii] S. Hiasa, R. Sato, A. Ming, F. Meng, H. Liu, X. Fan, X. Chen, Z. Yu, Q. Huang, "Development of a Bipedal Robot with Bi-articular Muscle-tendon Complex between Hip and Knee Joint," Proc. IEEE Int. Conf. on Cyborg and Bionic Systems (CBS), pp.391-396, Oct. 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sato Ryuki, Arita Hikaru, Ming Aiguo	4. 巻 10
2. 論文標題 Pre-Landing Control for a Legged Robot Based on Tiptoe Proximity Sensor Feedback	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 21619 ~ 21630
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3153127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sato Ryuki, Hiasa Shuma, Wang Lei, Liu Huaxin, Meng Fei, Huang Qiang, Ming Aiguo	4. 巻 6
2. 論文標題 Vertical Jumping by a Legged Robot With Upper and Lower Leg Bi-Articular Muscle-Tendon Complexes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 7572 ~ 7579
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2021.3099226	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiasa Shuma, Sato Ryuki, Kurokawa Kanako, Wang Lei, Liu Huaxin, Meng Fei, Ming Aiguo	4. 巻 9
2. 論文標題 A Legged Robot With Thigh Bi-Articular Muscle-Tendon Complex	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 62285 ~ 62297
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3074322	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yamaguchi Shinji, Sato Ryuki, Ming Aiguo	
2. 発表標題 Motion Acquisition of Vertical Jumping by a Bio-inspired Legged Robot via Deep Reinforcement Learning	
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (国際学会)	
4. 発表年 2021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
---------	---------