

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06261

研究課題名（和文）環境の機械的動特性を積極的に利用したロボットの動的に巧みな運動制御

研究課題名（英文）A study on the control of dynamically dexterous robot utilizing intrinsic system dynamics

研究代表者

中西 淳（Nakanishi, Jun）

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：70324457

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）：本研究では、タスクの力学的特徴に着目し、環境の機械的動特性およびロボットの固有ダイナミクスを積極的に利用することにより、動的で巧みな運動を実現する効率的な制御系の設計手法の確立を目的とする。弾性枝を考慮した動的環境下における枝渡り運動を実現するための制御系の開発およびその有効性の検証を行った。また、未知環境下における動的な運動の実現を目指し、強化学習による制御手法の検討を行った。さらに、ロボットハードウェアの設計・製作を行った。研究期間全体を通じて、環境との相互作用を有するロボットの動的に巧みな運動制御に関する知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は環境の機械的動特性およびロボットの固有ダイナミクスを積極的に利用することにより、動的で巧みな運動を実現する効率的な制御系の設計手法の確立を目的としたものである。このような系に対する制御系の設計手法は確立されておらず、本研究は環境との相互作用を行うロボット制御技術の設計指針の体系化に貢献するものとしての学術的意義があると考えられる。また、近年ロボットの社会実装が期待される中、実環境で動作するロボットの制御技術に対しての貢献も期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop an efficient control algorithm to achieve dynamically dexterous behavior of a robot utilizing the mechanical properties of the environment and intrinsic dynamics of the robotic system. We have developed a control algorithm to achieve robot brachiation on an elastic handhold and evaluated its effectiveness. We have also explored a reinforcement learning approach to achieve dynamic behavior under unknown environments. Furthermore, we have designed and developed a prototype of a robot hardware. Throughout the research, we have obtained scientific understanding and insight into the control of robotic systems having interaction with an environment.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：ロボット 運動学習制御 ダイナミクス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでに、ロボットによる人間や生物のような動的かつ巧みな運動の実現を目指した研究が進められてきている。近年、不整地や障害物が存在する屋外などの未知環境で人間のようにロバスタな歩行が可能なヒューマノイドロボットや、実際の動物のように自在に高速走行したり、跳躍により障害物を回避することが可能なチーター型ロボットの開発が行われてきている。また、機械的弾性要素を有する駆動機構を用いることにより、環境や人間との接触を考慮した柔軟な運動や関節速度増幅による素早い運動の実現、さらに、関節剛性を適切に変化させることで効率的なエネルギー蓄積を目的とした可変剛性アクチュエータの開発が活発に行われてきている。しかしながら、このような劣駆動系において、動的に変化する環境に自律的に適応しつつ、素早くかつ動的な運動を実現する制御系の一般的な設計方針は明らかではない。これまでに、申請者らが行ってきた運動学習制御に関する研究の枠組みを基盤として、本研究では、動的な環境との相互作用下において巧みな運動を実現する制御系設計の枠組の構築を目標とする。

2. 研究の目的

本研究では、タスクの力学的特徴に着目し、環境の機械的動特性およびロボットの固有ダイナミクスを積極的に利用することにより、動的で巧みな運動を実現する効率的な制御系の設計手法の確立を目的とする。具体的には、図1に示すような弾性を有する枝との相互作用を考慮した枝渡り運動に対する制御手法の開発を目指す。このような劣駆動系において、素早くかつ巧みな運動を実現する制御系の設計は困難な課題である。動的な環境との相互作用を考慮したタスクをロバスタかつ効率的に実現する制御系の設計指針の体系化への貢献を目指す。

3. 研究の方法

(1) 弾性枝を考慮した環境およびロボットのモデル化およびモデルベースの制御系設計

申請者らにより提案された目標ダイナミクス法[1]を、枝をばねとしてモデル化した2リンクロボットモデルに拡張し、弾性枝を考慮した動的な環境下における枝渡り運動を実現するための制御手法を提案する。図2に示すように簡単のため、枝の弾性は既知とし、弾性枝を鉛直方向に伸縮する直動1自由度の線形な自然長ゼロばねとしてモデル化する。本モデルは弾性枝(直動ばね1自由度)およびロボット(回転関節2自由度)からなる3自由度であり、制御入力は肘関節のトルク1入力の劣駆動系となる。ロボットおよび環境を含むシステムのダイナミクスをラグランジュ法により導出し、本モデルに対し、目標ダイナミクス法に基づく制御系の拡張を行う。ロボットの枝把持位置から見た手先位置に対する仮想振り子を考え、この振り子がタスクを記述するダイナミクスを実現するように関節トルク入力を入出力線形化による決定する。望ましい枝渡りを実現する仮想振り子パラメータおよび弾性枝のばね定数を数値計算により求める。数値シミュレーションにより、その有効性を検証する。

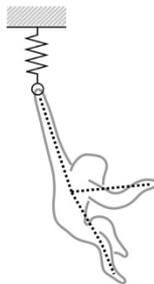


図1: 枝の弾性を利用した枝渡り運動

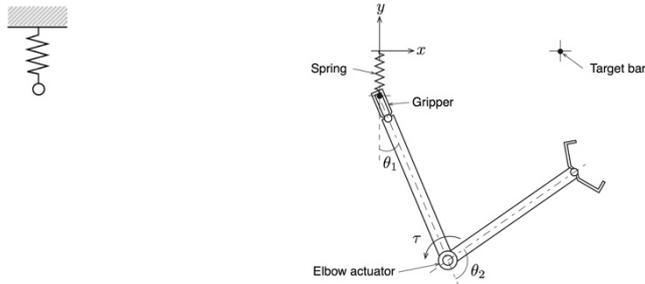


図2: 弾性枝および2リンク枝渡りロボット

(2) 学習制御による未知環境下における運動学習

未知環境下におけるロボットの運動を実現するために、強化学習などのモデルを用いない学習制御手法の検討を行う。実環境では、未知環境や環境の動的な変化に対応する必要がある。ここでは、近年広く用いられてきている深層強化学習の適用を行い、振幅制御においてその検証を行う。具体的には、2リンク枝渡りロボットモデルに対し、Deep Q-Network (DQN)を適用し、目的とする動作を実現することを考える。DQNの特長として、Q値の推定にニューラルネットワークを用いることで連続的な行動にも対応できるということが挙げられる。運動中にロボットの手先が枝位置近傍に達した際に、報酬を与えることにより所望の運動を獲得できるようにする。

(3) ハードウェアの設計・製作および基盤的センシング技術の構築

開発する制御手法の妥当性の検証を行うための枝渡りロボットの設計および開発を行う。設計にあたっては、目標とする運動が可能となるような仕様や各アクチュエータ、センサなどの構成要素、制御系の実装方法など検討する。製作する枝渡りロボットの各リンク長は0.3mとする。肘関節およびグリップを駆動するために、サーボモータ(DYNAMIXEL XM430-W210-R)を用いる。ロボットの第1関節の角度推定のために、IMU(Analog Devices, ADIS16470)を用いる。その他の関

節角およびグリップの開き角はサーボモータ内蔵のエンコーダを用いて計測する。これらの各デバイスはUSBによってPCと接続される。ロボットの制御にはROSを用いる。枝渡りロボットの部品の製作には3Dプリンタを用いて行う。素材にはPLA樹脂を用いることとする。さらに、ロボットの物理パラメータを同定し、URDFを定義することにより、GAZEBO上にシミュレーション環境を構築する。ロボットの動作環境となるばねを組み込んだ弾性枝機構の設計および構築を行う。

4. 研究成果

(1) ロボットの運動方程式は

$$M\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = [0, 0, \tau]^T$$

で与えられる。これに対し、仮想振り子の目標ダイナミクスを

$$\ddot{\theta} + \omega^2\theta = 0$$

により記述し、入出力線形化によりトルク入力 τ を求める。弾性枝を考慮した等間隔に配置されたはしご状の枝における移動問題について考え、数値シミュレーションを行う。枝間隔は0.6mの場合を考える。弾性枝を考慮した枝渡りにおいては、ロボットのスイングと枝の伸縮が同期することが望ましい。ここでは数値計算により枝渡りを実現する目標ダイナミクスのパラメータ ω および枝のばね定数 k の組を $(\omega, k) = (3.41, 360)$ と求めた。このときの数値シミュレーションによるロボットの運動の様子および関節角・ばねの変位をそれぞれ図3、4に示す。これにより提案する制御手法の有効性が示された。

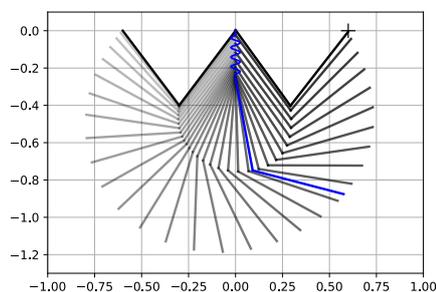


図3：ロボットの運動の様子

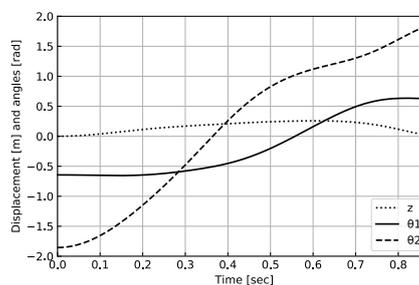


図4：関節角およびばねの変位

(2) 2リンク枝渡りロボットモデルに対し、枝にぶら下がった状態からの振り上げ運動を考える。このとき、目標位置付近に手先が到達した際に報酬を与える。DQNはPyTorchを用いて実装を行った。比較対象として、一般的なQ-Learningを用いた強化学習による手法を用いる。数値シミュレーションにより、結果の考察を行った。従来手法であるQ-Learningを用いた手法では、振り上げの実現は困難であった一方、DQNを用いた手法では、学習が進むにつれて、報酬が改善されることが明らかになった。しかしながら、学習の安定性に課題が見られた。今後はモデルベース強化学習の利用や探索方法の改善を行うことが必要となると考えられる。

(3) 図5に設計したロボットのCADを示す。また図6に製作した2リンク枝渡りロボットの実機を示す。パラメータ同定の後、GAZEBO上にシミュレータを構築し、これらの動作確認を行った。さらに、ばね機構による弾性枝環境を設計・製作し、ロボットの実験環境の構築を行った。

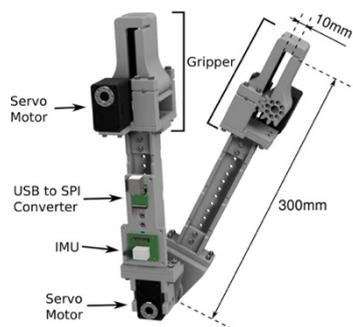


図5：枝渡りロボットのCAD図

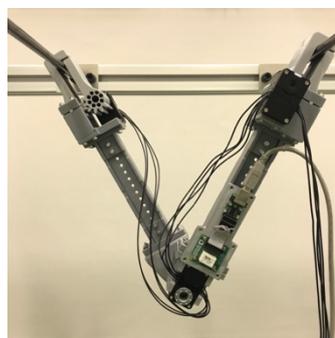


図6：ロボット実機

これらの研究成果より、環境との相互作用を有するロボットの動的に巧みな運動制御に関する一定の知見が得られた。今後は、環境パラメータのオンライン学習および環境変化に適応可能な運動学習手法の確立およびその体系化を目指したいと考えている。

<引用文献>

[1] J. Nakanishi, T. Fukuda, and D. E. Koditschek, "A Brachiating Robot Controller," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 2, pp. 109-123, 2000

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山口寛治, 中西淳
2. 発表標題 ダイナミックな運動を行う移動ロボットのための機体姿勢推定手法の基礎的検討
3. 学会等名 日本機械学会東海学生会学生卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三原立聖, 中西淳
2. 発表標題 2リンクブラキエーションロボットのラピッドプロトタイピング
3. 学会等名 日本機械学会東海学生会学生卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 若林耕平, 中西淳
2. 発表標題 弾性枝を考慮した目標ダイナミクス法による2リンクブラキエーションロボットの制御手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会
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
---------------------------	-----------------------	----