

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04405

研究課題名（和文）動的な未知環境下における枝渡りロボットの運動生成および制御

研究課題名（英文）Motion generation and control of a brachiating robot under unknown dynamic environment

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、枝渡り運動を例にロボット自身のダイナミクスと環境の特性を利用することにより、効率的かつダイナミックな運動を行うロボットの運動生成およびその制御方法について研究を行う。力学系に基づく環境の特性を利用した制御手法として、目標ダイナミクス法に仮想エネルギーを導入する手法を提案し、その有効性の検証を行った。また、未知環境下における枝弾性の推定手法の検討を行った。さらに、非線形最適制御のアプローチから時間最適化を含むオンラインモデル予測制御による枝渡り制御手法の構築を行った。力学系を用いた運動表現および最適制御手法を用いたロボットの運動制御における知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでにダイナミックな運動を行うロボットの運動制御に関する研究が進められてきており、近年特に歩行・走行など巧みな動作を行うロボットの開発が行われてきている。本研究はこのようなロボットの運動制御に関連する研究であり、力学系および非線形最適制御の観点から様々な環境下におけるロボットの制御への寄与が期待できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, our aim is to develop a motion control framework for robot brachiation considering the properties of the system and the environment. We introduced a dynamics-based approach to extending the target dynamics method to make use of the mechanical properties of the environment. We explored a method to estimate unknown properties of an elastic handhold. Furthermore, from a nonlinear optimal control viewpoint, we developed a model predictive control-based method for robot brachiation with temporal optimization. These results provided us with insights into dynamic motion generation of a robot from the viewpoints of dynamical systems and nonlinear optimal control.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボット 運動制御 ブラキエーション

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年のロボットのハードウェアおよび計算機能力の向上に伴い、人間型ロボットや四脚ロボットなどのダイナミックな運動制御に関する研究が盛んに行われてきている。最適化や強化学習などの手法を用いることで、アクロバティックな動作や、階段昇降・障害物回避を自律的に行うような運動の実現が行われてきている。また、環境との多点接触・脚腕協調を伴う実時間最適化制御に基づくロボットの全身制御手法の開発が急速に進展してきている。本研究では、動的な運動の例としてテナガザルの枝渡りを考え、我々がこれまでに行ってきたロボットの運動制御に関する知見に基づき、力学系および最適制御に基づくアプローチから効率的かつ動的なロボットの運動制御手法の構築を目指す。

### 2. 研究の目的

本研究では、テナガザルの枝渡りを例に、動的な運動を実現するロボットの運動制御手法の構築を目的とする。我々はこれまでに、人間や動物のような複雑かつ滑らかな運動生成の仕組みの理解とそのロボットにおける実現を目指し、タスクの表現に注目した研究を行ってきた。本研究では、ロボットの動的な運動制御問題に対し、タスクの特徴および力学的理解に基づく力学系アプローチとモデル予測制御に代表されるオンライン最適制御から運動生成手法の設計指針の構築および知見の獲得を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 仮想エネルギーを考慮した弾性枝下における目標ダイナミクス法の拡張

実際のテナガザルのように枝のしなりを利用した枝渡りを実現する試みとして、我々が従来提案した力学系に基づく弾性枝下における制御手法を拡張し、弾性枝の変位を含めた目標ダイナミクスと仮想エネルギーを考慮することで、目標枝の高さが異なる場合など到達可能な目標枝の範囲の拡大を目指した制御手法を提案する。我々の従来手法では、目標ダイナミクスとして2リンクロボットのみに着目した仮想振り子を考え、仮想振り子の角振動数で与えられる制御パラメータを適切に選ぶことで弾性枝における枝渡りを実現することを考えた。しかしながら、単一の制御パラメータのみを用いてばねの変位および仮想振り子の角度の両方を適切に制御しなければならず、制御則に弾性枝のダイナミクスを考慮していないことから、枝の弾性係数の変化に対応することが困難であるという課題が明らかになった。そこで、本手法では弾性枝の目標ダイナミクスと仮想振り子のダイナミクスの周期が同期することが望ましいと考え、弾性枝の変位および仮想エネルギーを考慮した目標ダイナミクスの拡張を行う。提案手法の有効性を数値シミュレーションにより示す。

#### (2) 弾性枝の機械的特性の推定

未知弾性枝下における枝渡りの実現を目的とし、運動中のロボットおよび枝の状態から枝弾性を推定する手法の基礎的な検討を行う。ここでは枝を1自由度のバネとしてモデル化し、2リンクロボットと弾性枝からなる系の運動方程式を導出する。ここでバネ定数を未知とすると、運動方程式はバネ定数に対してパラメータ線形となることが分かる。この性質を利用して、ロボットを動作させた際に得られたデータから最小二乗法を用いることで未知の枝弾性係数を推定することを試みる。

#### (3) モデル予測制御および時間最適化によるオンライン最適制御

枝渡りロボットは劣駆動系であり、外乱を受けた場合や様々な初期条件から異なる位置の目標枝に到達する場合、適切な運動の時間区間を事前に設定することは困難である。本研究課題では、様々な環境下で外乱に対してロバストな枝渡りを実現する実時間最適制御手法を提案する。本提案手法では、切断正規分布により確率的に選択された異なる時間区間に対する複数のモデル予測制御器を並列計算し、それらの最適解からコストを最小化するモデル予測制御器を使用することにより、最適な時間区間選択を行う。これにより、初期状態や目標枝の位置が異なる場合や、運動中に大きな外乱を受けた場合においても実時間で軌道を再計画し枝渡りを実現することが可能となる。数値シミュレーションによりその有効性を示す。

### 4. 研究成果

(1) 自由度を鉛直方向に有する直動ばねによる弾性枝を含む2リンクブラキエーションロボットモデルの運動方程式に対し、弾性枝の変位 $z$ および2リンクブラキエーションロボットからなる仮想振り子の角度 $\theta$ に関する目標ダイナミクスとして調和振動子をそれぞれ定義する。これらの目標ダイナミクスを組み合わせ、さらに系の仮想エネルギーを定義し、目標エネルギーに収束するような非線形減衰項を付加する。目標枝位置に対し目標ダイナミクスのパラメータとして、固有角周波数 $\omega$ および仮想エネルギーのゲイン $K_e$ を決定する。目標ダイナミクスを実現するようにロボットのトルク入力をフィードバック入出力線形化則により求める。

提案手法の有効性を示すために弾性枝を考慮した枝渡りの数値シミュレーションを行う。こ

ここでは同一の高さに配置された目標枝および、高さが異なる目標枝における枝渡りを考える。高さが同一で、距離が 0.6m に位置する目標枝に対する枝渡りを実現する制御パラメータを $(\omega, K_e) = (3.71, 2.0)$ のように得た。また、高さが 0.05m、距離が 0.6m に位置する目標枝に対する枝渡りを実現する制御パラメータを $(\omega, K_e) = (3.86, 0.45)$ のように得た。図 1、図 2 に高さが異なる目標枝に対するシミュレーション結果の例を示す。枝の変位および仮想エネルギーを考慮した目標ダイナミクスを用いることにより従来手法では実現が困難であった高さの異なる枝に対する枝渡りが実現できることが示された。

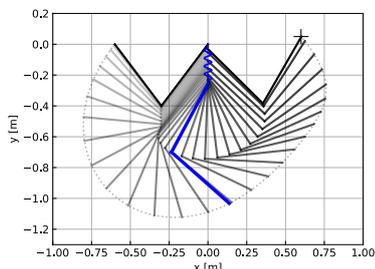


図 1：高さの異なる弾性枝下における枝渡り

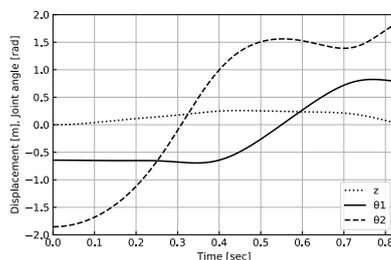


図 2：関節角・枝の変位

(2) 1 自由度弾性枝と 2 リンクロボットからなるシステムの運動方程式において、ロボットのモデルパラメータは既知とするが、枝の弾性係数 $k$ は未知とする。ロボットの運動方程式は一般にパラメータ線形であり、本モデルにおいても未知の弾性係数に関してパラメータ線形となる。ロボットのパラメータ推定手法を参考に、本シミュレーションではロボットを自由振動させたときのロボットの運動データおよび枝の変位に関する軌道データを取得し、最小二乗法により枝の弾性係数を推定した。本シミュレーションでは理想的な場合を想定し、オフライン手法を用いることで正確な弾性率が得られることが明らかとなった。しかしながら、今後の課題として実環境を想定した場合においては、バネの伸びの計測方法や計測誤差などを考慮した手法の検討およびオンラインでの推定を行う必要があると考えられる。

(3) 一般的に、モデル予測制御はあらかじめ固定された有限時間区間のダイナミクスを予測して最適化問題を解くことが多く、時間の経過とともに区間が後退することから Receding Horizon 制御とも呼ばれる。枝渡りロボットは運動の終端時刻において目標位置にある枝を的確に把持する必要があるが、劣駆動系であるため時間区間のわずかな違いで制御コストが大きく変化する。本研究課題ではモデル予測制御において時間区間の最適化を同時に行う。提案手法では、時間区間を切断正規分布を用いて確率的に決定し、サンプリングされた異なる時間区間に対する複数のモデル予測制御器を並列に解く。モデル予測制御器が時間区間の異なる最適化ソルバーを複数持ち、それぞれの初期条件を一致させて最適化問題を並列に解き、それらのソルバーの中で最もコストの低いソルバーを最適ソルバーとして使用する。この最適ソルバーから最適制御則を得ることで枝渡りロボットの実時間最適制御を行う。本提案手法を 2 リンク枝渡りロボットの実時間最適制御に適用する。最適化ソルバーには iLQR を使用し実装ライブラリとして Crocodyl を用いる。シミュレーションは Bullet を用いて実装する。図 3 に提案するモデル予測制御器の構成図を示す。

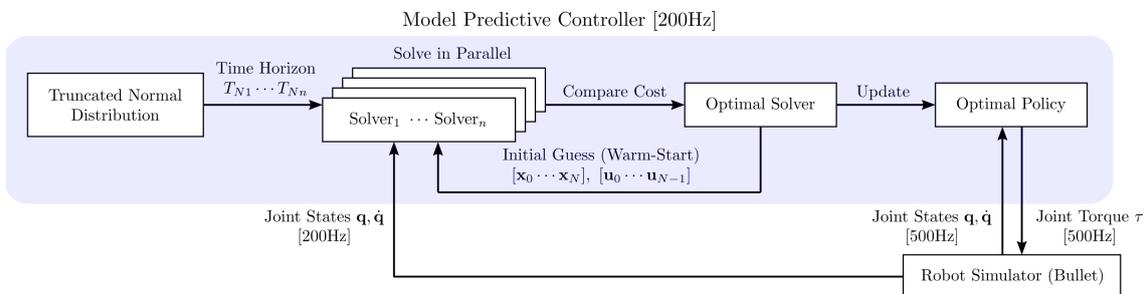


図 3：提案するモデル予測制御器の構成

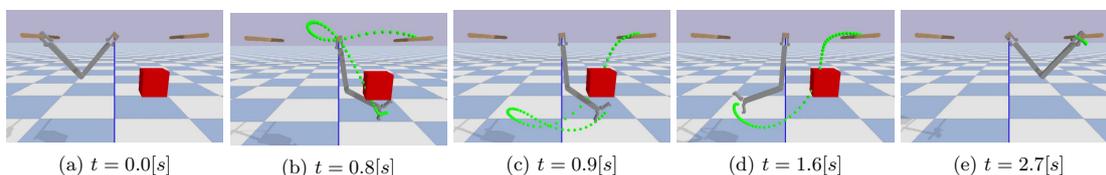


図 4：オンラインモデル予測制御および時間最適化による振り上げ運動の例

提案する制御系を用いて枝間移動および振り上げ運動の数値シミュレーションを行った。図4に振り上げ運動の途中で障害物により外乱が加わった場合のシミュレーション結果の例を示す。ロボットが障害物に衝突した直後は得られた最適軌道が乱れるが、オンラインで再計画することにより目標枝を把握することに成功した。

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 三原立聖, 中西 淳
2. 発表標題 時間区間スケーリングを用いた枝渡りロボットのモデル予測制御
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 2021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

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仮想エネルギーを用いた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 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
---------	---------