

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14628

研究課題名(和文) 移動ロボットの運動を補助する大変形柔軟梁機構のフィードバック制御手法構築と評価

研究課題名(英文) Design and evaluation of feedback control system for large deformable flexible beam mechanism to assist robot locomotion

研究代表者

岩本 憲泰 (Iwamoto, Noriyasu)

信州大学・学術研究院繊維学系・助教

研究者番号：30778816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、硬い機構(剛体部)と大変形する機構(柔軟梁部)を組み合わせたシステムに対して、剛体部の運動を補助するような柔軟梁部の制御について研究を行った。剛体部と柔軟梁部とで制御を分割し、それぞれの制御の難しさを切り分ける手法を考案した。運動は連続的であるため、運動を補助するにはロボットのモデルを用いた長期的な運動の予測が必要となる。研究を進めていくうちに長期的な挙動の予測が難しいことがわかったため短期的な挙動をロボットに搭載された計算機で、長期的な挙動を大型計算機で予測する手法とした。また、考案した制御手法を実装するため、有効性を示すための実験システムの構築を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボット本体の運動を補助する柔軟な梁で構成された機構の制御は、ロボット本体と地面との接触力や柔軟梁の挙動の推定の難しさから容易ではないが、本研究によりその1ステップ目となる制御手法の考案を行った。このような制御が実現できればロボット本体の運動の補助だけでなく、生物の運動における尻尾の役割をロボット工学的に示すことができる。また、短期的な予測を行いながら、ロボットとは別の場所に設置された大型計算機で長期的な予測を行うシステムは今後増加すると予想される。本研究で構築を進めた実験設備はそのようなシステムに対しても有用であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study deals with a system that combines a rigid body in contact with the ground and a flexible beam, and the control of the flexible beam for assisting the locomotion of the rigid body has been studied. To develop the control, it is necessary to predict the locomotion for a certain period using a robot model, because the locomotion is a continuous phenomenon. Therefore, the development involves two difficult problems: predicting ground contact, predicting the behavior of flexible beams. As a solution to these problems, we devised a control method that sets the model predictive controllers for the rigid body and the flexible beam respectively. In the course of our research, we found that it was difficult to predict long-term behavior of the robotic system, then it was decided to use the on-board computer for short-term prediction, and the large computer for long-term prediction. We also have developed experimental systems to implement the proposed control method.

研究分野：ロボティクス

キーワード：移動ロボット 柔軟体を含むシステム

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大変形柔軟梁は軽量で自由度が高くエネルギーの蓄積が可能であるといった点からロボットの機構として多くの可能性を秘めている。過去には柔軟梁をアームとして振動を抑制する歪みフィードバック制御や目標位置に残留振動を生じない軌道生成手法、先端にハンドを有する柔軟梁を用いた投球に関する研究が行われている。従来の研究では柔軟梁が設置されたベース部が運動することのない状況を想定してきた。今後さらなる発展として柔軟梁で構成されたアームを搭載したロボットの運動が求められる。これまでに柔軟梁アームをロボットに搭載した研究は行われているものの、無重力空間における宇宙ロボットの姿勢制御に関するものでロボット本体は柔軟梁から受ける力以外に外力が存在しないことを前提としている。

柔軟梁が設置されたベース部が地面と接触している場合、路面が水平であると仮定したとしても接触力は簡単に予測することができない。接触力はベース部を介して柔軟梁にもかかるため、フィードフォワード制御では柔軟梁の変形は予測と大きく異なってくる。一方で柔軟梁の弾性力は根元を介してベース部にかかるため、弾性力の予測との差異はベース部の運動を阻害し運動性能の低下につながる。また、大変形柔軟梁を根元のアクチュエータだけで制御するシステムは劣駆動であるため、一度予測形状と異なると修正は不可能に近い。ここに柔軟梁機構をロボットに搭載することの難しさの一つが存在する。

### 2. 研究の目的

本研究では柔軟梁機構を搭載したベース部が移動するシステムを考え、地面との接触を考慮しながらベース部の運動を補助する柔軟梁機構のフィードバック制御手法について研究を行う。本研究で考えるシステムは、1本の剛体リンク部(図1A)と可変剛性機構を有した柔軟梁部(図1B)とに分けられる。A部の先端は地面と接地しているが固定はされていない。B部は大変形柔軟梁、根元アクチュエータ、複数の可変剛性機構で構成されている。可変剛性機構は柔軟梁の形状を制御する根元アクチュエータの補助を行う。A部のある動作を考え(急激な姿勢変化など静止も含む)、柔軟梁からの力や接触点から受ける力、B部の慣性力を考慮しA部の動作を補助することを考える。A部の移動に必要なトルクの削減やB部が補助することによるA部移動の最短時間の短縮を目的としている。

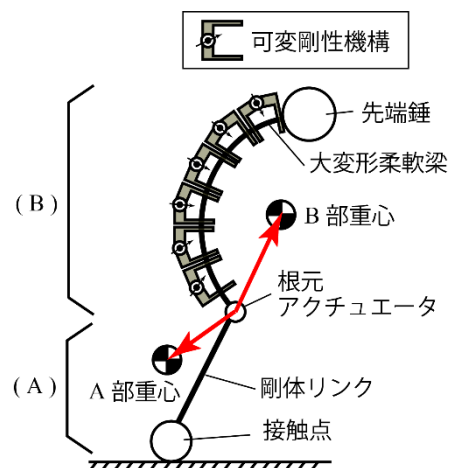


図1. 本システムの概略図

### 3. 研究の方法

(1) 本研究ではまずA部と可変剛性機構を除いたB部のシステムに関する制御則の考案を行った。A部とB部の制御を切り分けることで2つの問題を個別に考える。

(2) 考案した制御則がロボット本体の運動を補助可能か調べるための、大変形柔軟梁を搭載したシステムの構築を行った。A部の3次元運動を再現可能なロボットアームシステムと4輪の車両型ロボット、ロボットの挙動を長期的に予測するための並列計算用クラスタの構築をそれぞれ行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 制御則の考案

本研究では、地面との接触を考えなければならない A 部と柔軟梁の大変形を考慮しなければならない B 部でモデルを切り分けた、分散型モデル予測制御のアプローチをとった。考案した制御システムの概要を図 2 に示す。A 部のモデル予測制御器を DMPC1, B 部のモデル予測制御器を DMPC2 とする。各 DMPC は A 部と B 部それぞれのアクチュエータの入力と、B 部の根本アクチュエータ位置にかかる力とモーメントを出力する。ロボット本体の目標軌道と DMPC2 から出力された力・モーメント, A 部の観測値を DMPC1 の入力とした。また、ロボット本体の目標軌道と DMPC1 から出力された力・モーメントと本体位置姿勢, B 部の観測値を DMPC2 の入力とした。DMPC1 は目標軌道を追従する最小の入力を求める問題として、DMPC2 は B 部の根本から見た目標位置姿勢への方向と B 部の根元にかかる力とモーメントの方向が一致する最小の入力を求める問題として定式化した。図 3 に A 部が車両ロボットであることを想定した B 部の根本と目標点の位置姿勢関係を示す。

A 部は 3 次元運動を許容する車両モデルを用い、地面からの反力はペナルティ法によって実装した。また、B 部を複数の剛体リンクモデルにより実装した。A 部の接触状態か非接触状態かを予測器にゆだねてシミュレーションを行った結果、時間の刻み幅を大きくした際に過大な反力が発生し、A 部が飛び跳ねるために車両の挙動が予測できないことがわかった。刻み幅を十分に小さくしたうえで力学シミュレーションを実行しなければならないが、その場合には長期的な予測はできない。

また、ヒューマノイドロボットは地面との接触を考慮したうえで運動を計画していることから、ヒューマノイドロボットの制御に関しても調査を行った。しかし、手足のように冗長なシステムで成り立つものであり、最終的に本システムには適用は難しいと考えた。

そこで、ロボットの短期的な予測と長期的な予測を切り分け、短期的な予測はロボットに搭載する小型計算機にて、長期的な予測はロボットとは異なる場所に設置された大型計算機により予測することとした。また、最適化問題も最適解を求めるのではなく、B 部のアクチュエータ軌道を複数用意し各軌道で A 部の位置姿勢がどのように変化するかを計算することで、ある程度よい解を選択する手法に切り替えた。

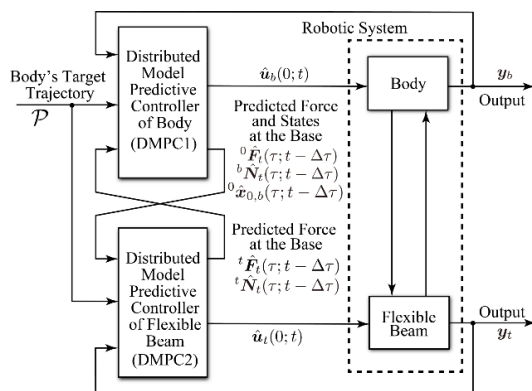


図 2. 考案した制御システム

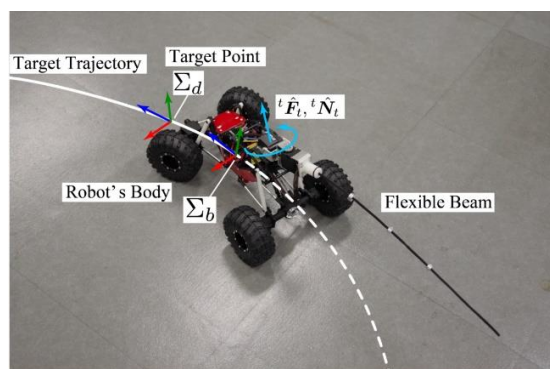


図 3. A 部が車両ロボットの場合の B 部根本と目標点の位置姿勢関係

## (2) 実験システムの構築

### ・ロボットアームを用いた剛体部の位置と姿勢を再現可能なシステム

3次元空間における位置と姿勢を再現可能なシステムは、任意の3次元空間内を運動する剛体部を表現するシステムとして重要であり、大変形柔軟梁の制御器を評価するうえで必要不可欠である。Denso Wave社のロボットアーム VS-068 を用いて本システムの構築を行った。ロボットアームの手先には力センサ(ワコーテック社 WEF-6A200-4-RCD)を搭載した。また、手先に搭載した力センサをロボットアームのコントローラに接続可能な力コンプライアンス機能を導入した。これにより柔軟梁部の根元にかかる力とモーメントを力センサで計測しながら、6自由度運動する剛体部をロボットアームによって表現できる。

### ・柔軟尻尾を有する車両ロボット

剛体リンク部を車両ロボットとした例を考えるため、アクロバティックな運動が可能な車両ロボットの構築を行った。アクロバティックな動作に耐えられる1/10ロックバギーに制御基板(Jetson Nano)を搭載し、制御基板から前後方向速度とステアリング角を制御できるロボットに改良した。また、4輪のどれかが宙に浮くような動作を考えると、LEDとフォトトランジスタを床に向けて設置するライントレーサでは対応できない。そこで、カメラ画像を基にロボット本体の目標軌道を生成するため、機械学習ベースの車両の制御としてJetson Nanoに搭載可能なレーシングカー用の機械学習システムJetracerを導入し、機械学習の一連の学習法について確認した。

また、サーボモータ(B3M-SC-1170-A)2台を用いて、Ni-Tiの大変形柔軟梁を2軸方向に振る機構を製作し、車両ロボットの後部に取り付けた。現在は車両本体の制御基板とは分離しているが、今後連携したシステムを完成させる予定である。

### ・ロボットの挙動の長期的予測のための並列計算用クラスタ

ロボットの挙動を長期的に予測する計算を一般的なデスクトップPCにて行うことが難しいと考えたため、尻尾の軌道を複数用意し、各軌道によってロボット本体の位置姿勢が変化するかを大規模並列計算機により計算することとした。そこで、大規模並列計算機としてmac mini 23台、合計で92個のCPUを用いた並列計算用クラスタの構築を行った。



図4. 剛体部の位置と姿勢を再現可能なシステム

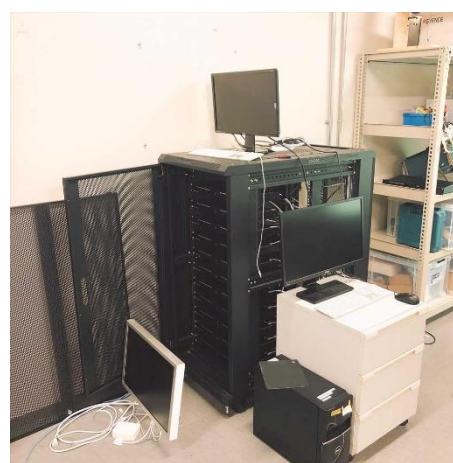


図5. ロボットの挙動の長期的予測のための並列計算用クラスタ

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 1件）

1. 発表者名 N. Iwamoto, A. Nishikawa
2. 発表標題 Distributed Model Predictive Control-based Approach for Flexible Robotic Tail
3. 学会等名 12th IFAC Symposium on Robot Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田誠, 岩本憲泰, 西川敦
2. 発表標題 変形を妨げることなく3次元線状柔軟梁の形状を保存する可変剛性機構の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩本憲泰, 西川敦
2. 発表標題 モデル予測制御を用いた剛体の運動をサポートする柔軟梁制御手法の提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 回動制限機構および三次元線状可変剛性機構	発明者 岩本憲泰, 西川敦, 柴田誠	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-104741	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----