

平成21年 5月28日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560430
 研究課題名（和文） 非線形バネ機構ロボットの開発と実環境適応型モーション制御システムの実現
 研究課題名（英文） Development of a nonlinear spring mechanism robot and realization of motion control system that adapts to actual environment
 研究代表者 駒田 諭 (KOMADA SATOSHI)
 三重大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：10215387

研究成果の概要：

人間環境内でも"使える・役立つ"モーションコントロールを実現するために、(1) 柔軟で安全なマニピュレータの開発、(2) 環境の不確定性や変動に強い制御法の開発、(3) 環境に適応した動きの獲得、の各テーマの研究を行った。(1)ではキャッチング動作を目指した、非線形バネSATを用いたマニピュレータの開発と実験を行い、(2)に関してはゲインスケジューリング制御や外乱オブザーバなどを用いた手法を開発し、(3)に関してはニューラルネットワークや強化学習を用いた手法を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	390,000	3,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：非線形バネ機構，ロボット，関節剛性，環境適応，モーションコントロール，臆駆動，ヒステリシス特性，外乱オブザーバ

1. 研究開始当初の背景

近年、消費者のニーズが多様化し、少品種の物を大量に生産するだけでは、多様な消費者のニーズに応えられなくなってきている。また、安い労働力を求めて海外へ生産設備を移転するなどの現象も起きている。さらに、高齢化社会の到来や少子化による労働力不足に対応し、子供やお年寄りなどの弱者を支援できる社会を実現することが必要となってきた。

上記問題を解決するためには、従来の様に決まった作業を繰り返すような機器ではなく、様々な対象物に対して様々な操作を実現できる機器の開発が必要である。また、従来のように人間と隔離したところで、作業を行うだけでなく、人間と共存する環境で作業を行うことも必要である。また、様々な対象物を扱うためには、時によって、機械同士や機械と人間同士で協調してタスクを実行することも必要である。一方、日本の各社か

ら人間環境内で活躍するロボットが提案されるようになってきたが、これらの多くは人間と共存する環境で動作するには至っていない。

従来のモーションコントロールでは、決められた動作を高速・高精度に実現することを主な目的としていた。それに対して、今後実現しなければならないことは、様々な環境中で柔軟に作業を行うことのできるシステムを構築することである。その際、環境情報はあらかじめ与えることは難しく、その不確実性がある場合でも作業を遂行することが要求される。これからは、環境の不確かさや変動に応じて、動作を修正し、目的とするタスクを実行できる柔軟性のあるモーションコントロールを実現していくことが必要であると言える。

2. 研究の目的

モーションコントロールにおける最大の課題は実環境への適応であり、(1) 柔軟で安全なマニピュレータの開発、(2) 環境の不確実性や変動に強い制御法の開発、(3) 環境に適応した動きの獲得、を包含した形で研究を推進し、人間環境内でも"使える・役立つ"モーションコントロールを実現する。

人間環境で動作する機械は、環境にぶつかっても機械自身や環境にもダメージを与えることは許されない。本研究では研究分担者の白井が開発し、特許取得済みの非線形バネ要素 S A T (Stiffness Adjustable Tendon, 特許第 3769615 号「ばね装置」)による関節剛性調整機構を搭載した多関節マニピュレータを開発し、制御する。本マニピュレータは、機械の回転部関節の機械的剛性を調節可能で、軽量で、高応答なマニピュレータを実現可能である。

3. 研究の方法

S A Tを用いた1関節マニピュレータ、3関節マニピュレータへと発展させていく。

また、次の各テーマに分けて主な役割分担を割り当てて研究を行った。

- (1) S A Tを用いたマニピュレータの設計と製作 (担当: 白井)
- (2) S A Tを用いたマニピュレータの制御 (担当: 弓場井)
- (3) 学習機能の付加による環境適応能力の獲得 (担当: 駒田)

4. 研究成果

- (1) S A Tを用いたマニピュレータの設計と製作

非線形バネ S A T を用いた一関節ロボットの開発はすでに行われていたが、それを三関節ロボットへ拡張を行った。ここでは、重量物

のキャッチングを可能とするために、水平方向の動作だけではなく、重力方向での動作を実現した。

運動解析ソフトウェア MSC. Adams を用いて、自由落下する重量物の柔軟三関節ロボットアームによるキャッチングモデルの解析を行った。初期姿勢 (Preshape) と関節粘弾性による受動的なキャッチングの成否を数値解析的に調べ、安全にキャッチングできる範囲の探索を行った。この数値解析より得られた知見を元にして実機による検証を行うために、水平三関節ロボットを垂直方向でのキャッチング動作を可能とするための改造の設計を行った。また、柔軟三関節ロボットを制御するための6軸サーボモータドライバを収納するためのドライバユニットの設計を行った。

本垂直型三リンク柔軟関節ロボットによる実機実験を継続したが、機械的な精度と強度の不足が明らかになった。そこで、ロボットの関節部構造の見直しと改造を行い、高剛性化と低フリクション化を実現した。改良した垂直型三リンク柔軟関節ロボットを用いて、0.3[m]の高さから自由落下させた質量0.3[kg]、直径 ϕ 30、長さ0.08[m]の鉄製円柱対象物の関節剛性の機械的柔軟性のみによるキャッチングタスクが安全に実現可能であることを確認すると同時に、キャッチング時のアームの挙動を実験的に解析した。現在は対象物の重量が軽量であるが、今後は対象物重量を増やして重量対象物に対して本柔軟関節機構が有用であることを検証する予定である。

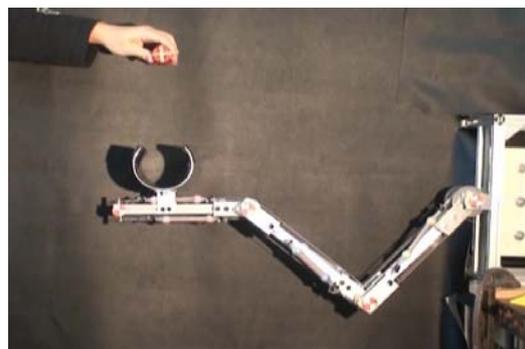


図1 キャッチング動作実験

- (2) S A Tを用いたマニピュレータの制御

S A Tを用いた非線形バネ機構ロボットの制御に関しては、S A T以外の非線形バネ機構ロボットの制御法を参考にしながら、S A Tに対する制御系を構築し、シミュレーションと実験の両面から検討を行った。

従来の非線形バネを用いた腱駆動機構の制御は、バネの特性式が得られることを前提とした制御法である。ここで使用する非線形バネ S A T はヒステリシス特性を有し、従来の

制御では良い性能が得られない。そこで、バネの近似特性式、外乱オブザーバによる外乱補償と反力推定オブザーバによる張力フィードバック制御を併用する手法を提案し、実験とシミュレーションにより多関節運動時の有効性を確認した。本制御法を実装するために、モータと減速機の部分をダイレクトドライブ化しSATの張力をセンサレスで検出出来るように実験装置を改良し、良好な結果を得た。

従来の非線形バネを用いた腱駆動機構の制御は、位置と剛性制御にはお互いに干渉が存在する。そこで和と差の機能座標により非干渉化する方法を提案し、それをSATを用いたマニピュレータに応用し、有効性を確認した。

非線形バネ機構ロボットの制御法として有望であるゲインスケジューリング制御を適用するための準備として、制御系の性能評価によく使われる倒立振り子を制御対象として高性能なゲインスケジューリング制御法を開発した。さらに、ゲインスケジューリングコントローラ的设计のため、各動作点において制御仕様を満たす低次コントローラ的设计方法を提案し、実験により有効性を確認した。今後は、本手法の非線形バネ機構ロボットへの適用が望まれる。

(3) 学習機能の付加による環境適応能力の獲得

上記のように非線形バネSATはヒステリシス特性を有するため、その特性式を得るのが困難である。そこで、非線形バネを用いた腱駆動機構に対してニューラルネットワークにより自律的に制御器を設計する手法を提案し、シミュレーションにより有効性を確認した。

一関節非線形バネ機構ロボットは非線形性が有り、モデル化や制御系構築が難しいため、学習制御を適用しシミュレーションによりその効果を確認した。ここではモデルベース強化学習を位置決め制御に適用し、報酬を与えることでコントローラを自律的に構成した。また、本手法はコントローラを複数構成し、状態量に応じてそれらを切り替えることから、本制御対象のように非線形な場合でも制御可能なことを確認した。

非線形バネを用いた腱駆動機構の制御系のコントローラゲインや剛性指令値を自律的に獲得する方法を提案した。ここでは、制御性能等の評価を定めることで、試行を繰り返すことでより良いコントローラゲインや剛性指令値を獲得できることを確認した。また、本コントローラを実現するにあたり、反力推定オブザーバを用いてセンサレスで腱張力を推定する方法を用いている。

学習に関する部分は、実験での検証がまだ

行われていないため、早急に行うことが望まれる。

以上のように各研究分野の成果が得られているが、それらの融合を通して研究内容をより進化させる必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3件)

① Shu Katayama, Kazuhiro Yubai, Junji Hirai, Iterative Design of the Reduced-order Weight and Controller for the H_{∞} Loop-shaping Method under Open-loop Magnitude Constraints for SISO Systems, Transactions on Industrial Electronics, 査読あり, 掲載決定

② 白井 達也, 別府 勇太, 富岡 巧, 三リンク柔軟関節ロボットの開発と重量物キャッチング動作への適用, 鈴鹿工業高等専門学校紀要, 査読あり, 41 2009, pp.25 - 31

③ 弓場井 一裕, 奥原 一紀, 平井 淳之, 重み最適化と H_{∞} ループ整形法による回転型倒立振り子のゲインスケジューリング制御, 電気学会論文誌電子・情報・システム部門誌, Vol.126-C, No.12, 2006, pp.1504-1513, 査読あり

[学会発表] (計 7件)

① Kazuo Haiya, Satoshi Komada, Junji Hirai, Control of Tendon-driven Robotic Mechanisms by Non-Linear Springs with Hysteresis Characteristics, IEEE International Conference on Mechatronics, 14-17 April, 2009, Silken Hotel Puerta Málaga (Málaga, Spain)

② 灰屋 和勇, 駒田 諭, 平井 淳之, ヒステリシス特性を持つ非線形バネ要素SATを用いた腱駆動機構の位置・剛性同時制御, 電気学会 産業計測制御研究会, 平成21年3月10日, 成蹊大学(東京都)

③ 灰屋 和勇, 駒田 諭, 平井 淳之, ヒステリシス特性を持つ非線形バネを用いた腱駆動機構の制御, (社)計測自動制御学会中部支部 平成20年三重地区計測制御研究講演会, 平成20年12月17日, 三重大学(三重県)

④ 灰屋 和勇, 駒田 諭, 平井 淳之, NN制御器設計を利用した非線形バネSATを用いた腱駆動機構の制御, 平成20年電気学会産業

応用部門大会，平成20年8月27日，高知市文化プラザ「かるぽーと」（高知県）

⑤ 別府 勇太，白井 達也，富岡 巧，柔軟関節ロボットによる自由落下する重量物のキャッチング，日本機械学会，ロボティクス・メカトロニクス学術講演会，平成20年6月7日，ビッグハット（長野県）

⑥ 黒田 朋伸，駒田 諭，平井 淳之，非線形バネ要素SATを用いた腱駆動機構の学習による制御，電気学会 産業計測制御研究会，平成20年3月10日，東京電機大学神田キャンパス（東京都）

⑦ 前川 悠生，弓場井 一裕，平井 淳之，可変弾性アームにおける位置と剛性の独立制御，電気学会 産業計測制御研究会，平成20年3月11日，東京電機大学神田キャンパス（東京都）

〔図書〕（計 1 件）

駒田 諭，環境適応型モーションコントロール協同研究委員会編，電気学会，環境適応型モーションコントロールの最新技術，2008，p.123（pp.25-34）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

駒田 諭 (KOMADA SATOSHI)
三重大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10215387

(2) 研究分担者

弓場井 一裕 (YUBAI KAZUHIRO)
三重大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10324542

白井 達也 (SHIRAI TATSUYA)
鈴鹿工業高等専門学校・機械工学科・准教授
研究者番号：20342503

(3) 連携研究者