

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560215

研究課題名（和文）

先進複合構造による高機能ロボット構造と制御系設計に関する研究

研究課題名（英文）

Study on Control System and Robot Structure of Advanced Composites

研究代表者

小林 幸徳（KOBAYASHI YUKINORI）

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10186778

研究成果の概要（和文）：複合材料を用いた柔軟ロボットアームを開発し、先端のハンドからボールを投げる運動を実現する非線形解析モデルを確立した。入力トルクパターンと構造パラメータの同時最適化問題を、ソフトコンピューティングの手法を用いて解析した。そして、最適解を用いたシミュレーションと実験によって、開発した手法の有用性を示し、開発したロボットアームが高効率に動作することを確認した。

研究成果の概要（英文）：A robot arm made of composite material has been developed and the nonlinear model for the ball-throwing motion has been derived. Simultaneous optimization of input torque pattern and structure parameters has been analyzed by means of the soft computing approaches. Availability of the proposed technique and the highly effective performance of the robot arm have been confirmed by pursuing simulation and experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：制御工学・ロボット工学・複合材料

1. 研究開始当初の背景

過去に報告されてきた複合材料構造を用いたロボットアーム設計に関する研究は、柔軟アームの振動制御問題に限られていた。しかし、柔軟ロボットアームの弾性特性を考慮した位置決め制御に関する研究において、振動制御を伴う位置決め制御よりもエネルギー効率と作業時間において優れた性能実現の可能性が示された。弾性部材をエネルギー蓄積機構として活用する高性能な構造は、ロボットにこそ有用であると考えられるが、構造ならびに制御系設計の難しさから、これに取り組んだ研究は見当たらなかった。

2. 研究の目的

高速かつ高精度な動きを実現する軽量ロボットアームの開発では、先進的な構造部材の有する特徴を積極的に活用する設計が望まれる。特に高い運動性能を高効率に達成するには、弾性部材をエネルギー蓄積機構として活用し、それを短時間で開放することによって、モーターなどのアクチュエータだけでは実現できない高性能化実現の可能性がある。本研究では、このような機能を伴う構造設計における諸問題を整理し、力学理論に裏付けられた構造と制御系の同時設計手法を確立する。

3. 研究の方法

- (1) 2リンクロボットアームの運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを求め、ハミルトンの原理に基づいて非線形運動方程式を導出した。
- (2) ロボットアーム先端には、ボールを把持するハンド機構を設置し、解析モデルにおいてもボールの把持状態を考慮した。
- (3) 効率的な投球動作を実現する関節への入力トルクあるいはアーム動作の軌道の設計を行った。
- (4) 入力トルクを決定するパラメータの最適化には、粒子群最適化(PSO)アルゴリズムを採用し、構造との同時最適化にも取り組んだ。
- (5) 第1リンクを剛体、第2リンクを鋼板を複合材料で補強した弾性アームとし、2リンクロボットアームの実機を製作した。ハンド機構には、空気圧によって駆動される人工筋肉をアクチュエータとして用いて、ボール投球動作を実現した。
- (6) 実験装置の特性を解析モデルに反映するための考察を実施し、シミュレーション結果と実験結果の比較を行った。

4. 研究成果

- (1) ロボットアームのモデルとして図1に示すように、アーム先端にボールを把持している2リンクの弾性アームを考え、これをモデル1とする。このとき、第1リンクは十分な剛性を有する剛体リンクとした。ボールを投球後は、ボールを持たないモデル2を考え、それぞれに関する運動方程式を、ハミルトンの原理により導いた。弾性アームの振動変位は、片持ちはりの固有関数を用いたモード展開法によって近似し、モータの回転角とモードに関する時間変数からなる状態変数ベクトルを導入して、状態方程式表現を導いた。詳細モデルは、遠心力やコリオリ力の影響から非線形方程式となる。アームの運動を停止する際は、最適レギュレータを適用するので、線形化した状態方程式も導いた。一連の投球動作のシミュレーションは、状態変数の連続条件を考慮してモデル1とモデル2を接続することで行った。

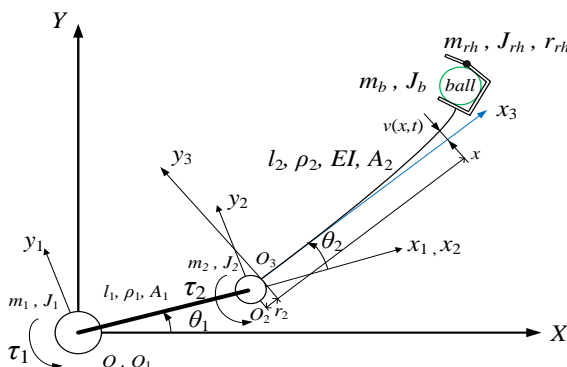


図1 2リンクロボットアーム

(2) 解析モデルと同様の機構を持つ実験機を図2に示すように製作した。第1関節にはDDモータを使用し、第2関節には小型のサーボモータを用いた。各モータはエンコーダを搭載しており、回転角度は計測可能である。ボールを把持するハンド機構は、空気圧によって駆動される人工筋肉をアクチュエータとして用い、アーム先端の速度が最大となるタイミングでハンドを開いて投球動作を実現した。投球後にはアームを制振しながら停止するため、弾性アームにはひずみゲージを貼付し、ひずみ信号を計測可能として振動制御系を構成した。コントローラには高速演算可能な高性能DSPユニットを用い、各アクチュエータ駆動信号の生成とフィードバック制御演算をリアルタイムで実現した。

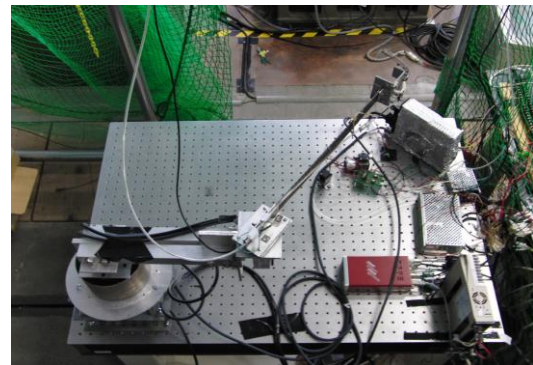


図2 実験装置

- (3) 2リンクロボットアームの実験に先立ち1リンク弾性ロボットアームに関するシミュレーションと実験を実施した。シミュレーションはモデル1でテイクバックを行い、スローイングの間にボールの速度が最大になったところをリリースポイントとして、モデル1からモデル2へ切り替えた。入力するトルクをサイン波の組み合わせで定義し、周期と振幅を最適化のパラメータとしてアーム先端の速度最大化と入力トルクの制約を満たすような評価関数を導入し、粒子群最適化(PSO)アルゴリズムによって、最適パラメータを決定した。比較のために遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた最適化も行った。その結果、PSOはGAよりもよりグローバルな最適解を効率よく探索することが分かった。図3に実験とシミュレーションによる関節角度の比較を示す。赤い縦線はアーム先端の速度が最大となったリリースポイントを示す。図より、実験とシミュレーションの結果はよく一致していることが分かる。図4は弾性アームのひずみの変化の比較を示す。位相のずれが認められるが、シミュレーションは弾性アームの挙動をよく再現していると言える。この位相のずれは、実験機で用いているモータの摩擦の影響と考えられる。

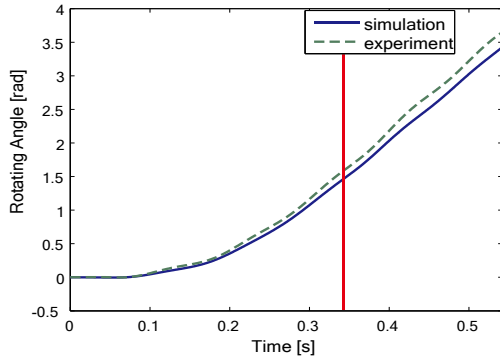


図3 関節角度の比較
(1リンクロボットアーム)

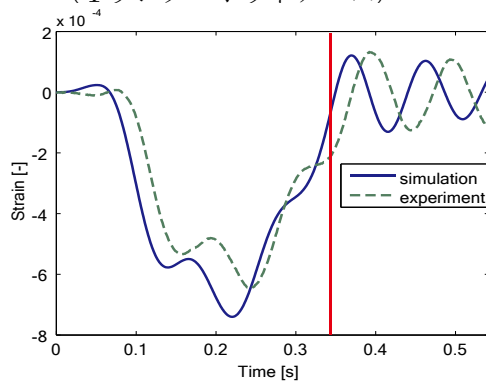


図4 ひずみの比較
(1リンクロボットアーム)

(4) 1リンクロボットアームの結果に基づき2リンクモデルを用いたシミュレーションを実施した。2リンクモデルでは、最適化のためのパラメータが多くなり、すべてのパラメータを同時に対象とする最適化は、計算時間が非常に長くなる。そこで本研究では、まず第1関節を固定した状態で第2関節の回転と第2リンク(弾性アーム)の運動に関する最適計算を実施した。図5はアーム先端のたわみに関する非線形モデルと線形モデルによるシミュレーションの比較を示す。縦線はアーム先端の速度が最大となる時刻を示している。これより、第1リンクを固定したシミュレーションでは、線形モデルと非線形モデルによる違いは小さいと言える。

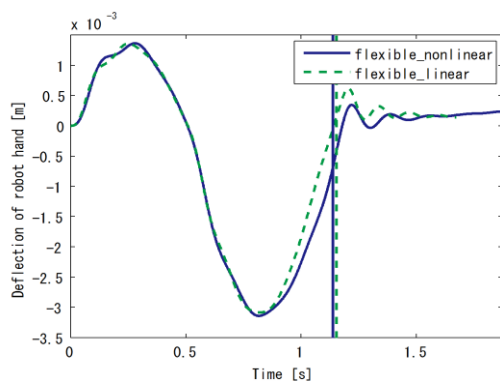


図5 アーム先端のたわみの比較
(2リンクロボットアーム)

(5) について、第1関節にはステップ状の入力トルクを考え、その動作のもとで第2関節と第2アームの挙動の最適化を試みた。図6は第1関節の回転角度のシミュレーション結果を示す。比較のために第2リンクを剛体アームとした場合の結果も合わせて示す。非線形モデルと剛体モデルにおける角度変化はよく一致しているが、線形化モデルはあるところから大きくずれた結果となった。これは、2つのリンクが大きく回転する運動では、遠心力やコリオリ力による非線形効果が大きくなり、線形化で仮定した平衡点から離れた場合には正確なシミュレーションが困難となることを示している。

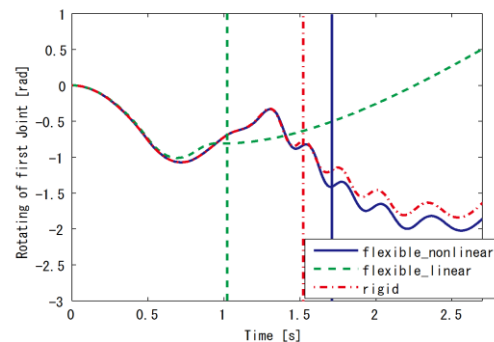


図6 第1関節の回転角度
(2リンクロボットアーム)

(6) 図7は、第1関節にステップ状の入力を加えた場合の第2アーム先端のたわみを示す。第2関節の駆動には最適パラメータを用いたトルクを入力し、実験と非線形モデルによるシミュレーションの比較を示す。実験結果にはシミュレーションでは見られない速い振動変位が生じている。これは、実験機に固有の摩擦などの影響によるものと考えられる。

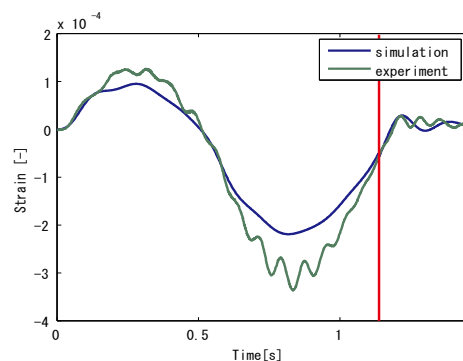


図7 第1関節の回転角度
(2リンクロボットアーム)

(7) 本研究で実施したパラメータの範囲では、アクチュエータの出力の制約などから、剛体モデルとの比較で著しい性能向上を確認するには至らなかったが、最適解を用いることで剛体アームの性能を上回る可能性を確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

① Yizhi GAI, Yukinori KOBAYASHI, Yohei HOSHINO and Takarori EMARU, Motion Control of a Ball Throwing Robot with a Flexible Robotic Arm: Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Robotics (ICMR2013), July 8-19, 2013 (Holiday Inn London - Wembley, United Kingdom)

② 山川量平, 小林幸徳, 蓋 軼之, 星野洋平, 江丸貴紀, 柔軟ロボットアームによる高効率投球動作に関する研究, 第13回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論文集(DVD-ROM), pp.2012-2015 (3C3-3), 2012年12月18日~20日(福岡国際会議場, 福岡市)

③ Yizhi GAI, Yukinori KOBAYASHI, Ryohei YAMAKAWA, Yohei HOSHINO and Takarori EMARU, Motion Control of a Ball Throwing Robot with a Flexible Robotic Arm: Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics Technology, pp.437-442, (ICMT2012), October 16-19, 2012 (Holiday Inn Tianjin Riverside, Tianjin, China)

④ Yizhi GAI, Yukinori KOBAYASHI, Ryohei YAMAKAWA, Yohei HOSHINO and Takarori EMARU, Motion Control of a Flexible Robotic Arm by Utilizing Its Dynamics, Proceedings of the 14th Asia Pacific Vibration Conference, Vol.4, pp.1971-1980, December 5-8, 2011(The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 幸徳 (KOBAYASHI YUKINORI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：10186778

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

江丸 貴紀 (EMARU TAKANORI)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：30440952

星野 洋平 (HOSHINO YOHEI)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：90374579