

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 24 年 4 月 11 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560460

研究課題名（和文）非線形バネ機構ロボットのための実環境適応型モーション制御システムの開発

研究課題名（英文）Development of a motion control system adapting to real environment for robots with nonlinear springs

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（和文）：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、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)に関しては手先剛性制御手法の開発と 2 関節アームでの実験等、(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の応用を行った。

研究成果の概要（英文）：In order to realize a useful motion control in human environment, researches has been done for the following topics: (1) developing a flexible and safety manipulator, (2) developing a robust control method for uncertainty and variation of environment, and (3) acquisition of motion adaptive to environment. For (1), development of a manipulator using nonlinear springs SAT for catching motion is done. For (2), development and experiment of an end point stiffness control of a 2 joint arm is done. For (3), application of a method using neural network and reinforcement learning is done.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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、ロボット、剛性、環境適応、腱駆動、リミッター

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、子ども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十分に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。

今後活躍が期待されるサービスロボットや介護・リハビリロボットなど人と接する機会が多いロボットは、衝突安全性の観点からセンサを用いずに関節剛性を調節できることが期待されている。小金澤らは非線形な弾性特性を持つ非線形弾性特性機構 NLEM (Non-Linear Elastic Module)を開発し、それを組み込んだアクチュエータ ANLES (Actuator with Non-Linear Elastic System)を提案している。本研究の分担者が特許を取得した SAT (Stiffness Adjustable Tendon)は、弾性素材のシリコーンスポンジ製の丸棒を編みチューブで覆い、両端を封止したシンプルな構造である。SATは(1)圧縮バネではなく引っ張りバネであるため座屈を防ぐためのケーシング等の部品が不要、(2)金属製の部品を用いないため錆びない、(3)伸縮する際にコイルスプリングのように隙間に物が挟まること無い、(4)特殊な素材を用いていない上に、製造するための特別な設備を必要としないと言った特徴を持つ。

以前の科学研究費補助金により安全性が高く関節剛性の調節可能な非線形バネ SATを用いた腱駆動機構とその制御法の開発を行ってきた。そこで、本研究課題に於いては、それを基により実際の作業遂行に生かせるようにするための様々な方策を開発する。

2. 研究の目的

上記課題を達成するために、環境に適応できるモーションコントロールシステムを開発し、実際の作業に応用し、その有効性を示す。詳細は以下の通りである。

(1) 軽量・柔軟で安全なマニピュレータの実現に向けた改良

以前の科学研究費により SAT を用いて多関節マニピュレータを開発してきた。本研究課題に於いては開発したマニピュレータの安全性の評価、具体的な作業への応用のためにキャッチング動作に対する評価を通して機構の改善を行う。

(2) 環境の不確実性や変動に強い制御法の開発

上記 SAT は通常の非線形バネと違い、ヒステリシス特性を有しているため制御が難しい。今までにヒステリシス特性に対応した制御法を開発し、1 関節アームの実験で有効性を示してきたが、さらに、2 関節アームでの実験を通じた改良を行う。その上で、SAT のモデリングを正確にすることで、制御系の性能向上を図る。さらに、アーム先端での作業を目指して、手先座標での剛性制御や、それを実現するための座標変換を開発する。これらの制御法を基礎として、多指ハンドを用いた物体操作を目指して研究を行う。

(3) SAT マニピュレータによる環境に適応した動きの獲得

上記の手法で環境に適応するモーション制御を実現するには限界がある。なぜなら、人間環境は多様であり、それら全てに対応するようなシステムを実現するには多くの労力を必要とする。さらに、想定していない環境に対しては対応はできない。そこで、本システムに対して学習機能を付加し、環境への適応を可能にする。しかし、学習には多くの試行錯誤を必要とするため、従来のマニピュレータでは衝突によるマニピュレータや環境の破壊により実現が難しかった。しかし、本 SAT を用いたマニピュレータであれば、軽量で柔軟なため試行錯誤を繰り返して、環境と衝突を繰り返すことが可能であり、人間環境内でマニピュレータによる学習が可能である。ここでは、学習機能を持ったモーションコントロールシステムの考案、本システムに適した学習法の開発と実機による確認等を行う。

3. 研究の方法

図1のSATを用いた多関節マニピュレータにおいて、次の各テーマ毎に役割を割り当てて研究を進展させる。

(1) 軽量・柔軟で安全なマニピュレータの実現に向けた改良 (担当：白井)

(2) 環境の不確実性や変動に強い制御法の開発 (担当：平井)

(3) SAT マニピュレータによる環境に適応した動きの獲得 (担当：駒田)



図1 SATの外観

4. 研究成果

(1) 剛性可変腱駆動機構の製作

これまでに製作した三リンク柔軟関節ロボットは非線形バネ要素を意図的に各リンク周辺に配置した。この構造は非線形バネSATを多リンクロボットアームに適用する効果を視覚的に表す上では有効だが構造は大掛かりになる。非線形バネ要素をロボット本体側に集約する構造の三リンク柔軟関節ロボットを新規に設計・製作した。必要となる中間プーリ数が半減する効果がある。

現在の三リンク柔軟関節ロボットアームの軽量化・高剛性化と同時に、関節剛性調整機構のレイアウトをロボットアーム側よりロボット本体側へ移動するメリットを検証した。併せて、現在の関節剛性調整機構では関節剛性を高剛性化した際に、関節剛性調整機構の要素部品である非線形バネSATが過度なストレスを受けて塑性変形し、特性が大きく変化してしまう問題点を、機械式重力補償機構およびコンプライアンスリミッターと名付けた関節剛性を柔軟な状態と高剛性な状態に不連続に切り替えるシンプルな機械式機構の開発により改善することを目指し、解析および試作を行った。

一定値を超える張力が印加された場合は弾性体ではなくワイヤが張力を引き受けるコンプライアンスリミッター機能を内蔵した新しいSATを実際に開発・改良して最終形態のSATを完成した。伸び始めは柔らかく、張力が増えるに従って非線形にバネ剛性が増加し、その後、完全にワイヤ駆動方式の動力伝達系と同等の高剛性化を実現できる。関節剛性調整機構にこのコンプライアンスリミッター機能付きSATを導入することで関節剛性を柔らかい状態から完全に高剛性の状態まで実現可能となり、実用性が一気に向上した。三リンク柔軟関節ロボットも新規開発し直し、旧来の機構にあったガタツキを無くし、さらに軽量化が実現できた。

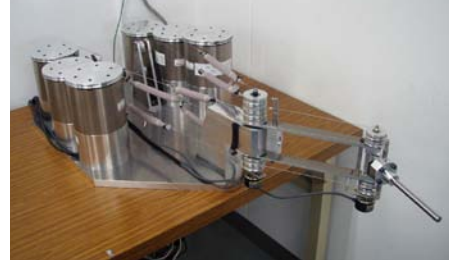


図2 製作した3リンクアーム

(2) 環境の不確実性や変動に強い制御法の開発

① 剛性可変腱駆動機構の制御手法の開発

これまでの制御実験では1関節2本腱のロボットを用いていたが、下図に示す2関節6本腱のマニピュレータを新たに製作し、これまで開発してきた制御法を適用する。最初に、シミュレーションにおいて2関節6本腱のマ



ニピュレータで制御を実現した。

図3 2関節6本腱アーム

タスクの実現に向けた改善として、手先の硬さを表現した任意の剛性楕円を機械的と制御的の両方で実現できるハイブリッド剛性楕円制御手法を開発した。これにより機械剛性と制御剛性は応答の初期と終盤のそれぞれで支配的であることを示した。その後、製作した実験装置へ本制御系を応用し、実験を行うことに成功した。

② 張力変換手法の開発

本制御系で用いられる関節トルク指令と関節剛性指令の腱張力への変換においては、腱張力の上下限を考慮しなければならない。ここでは、肢の生体筋骨格に近い構造の2関節腱駆動機構に対して、代数計算により腱張力の上下限を考慮し、できるだけ指令値を実現可能な変換を開発した。生体の肢の筋骨格系を採用することで、腱の干渉が最小限に抑えられることで、計算の簡易化が可能となった。これにより、腱張力の制限がある場合にできるだけ元の指令値に近い応答を実現でき、座標変換の計算時間を短縮可能なことから短い制御周期を実現できる。次に、アーム先端の極座標において力指令と剛性指令に対して腱張力制限を満たす中で最大限これら指令を達成するようにしている。これにより、前述の関節の場合に比べ、アーム先端で作業が行い易くなる。

③ SATのモデリング

SATはヒステリシス特性を持つため、そのモデリングが難しい。そこで、ヒステリシスを表現する関数を含んだ数式を用意し、SATの実験結果からその係数を決定した。本結果から、SATの特性を表現するのに一番重要なのは指数関数であることが判明した。今後は本モデルを制御系設計や解析に利用する。

④ 多指ハンドへの応用に向けた研究

ここでは、多指ロボットハンドの把持配置範囲計画のための新たな手法を開発した。本手法は把持物体を操ることを想定して、物体に加わる重力などの外力を考慮した把持範

囲導出法を提案している。

(3) SAT マニピュレータによる環境に適応した動きの獲得

SAT を用いたマニピュレータに対して強化学習を適用し、タスクに適した関節剛性を獲得できるシステムを開発し、衝撃的外力に対する性能の向上をシミュレーションにより確認した。今後は、より有効性の高いタスクへの適用と実験による検証を行っていく。

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 2 件)

- ① 奥村 文博, 駒田 諭, 平井 淳之, 非線形バネを用いた腱駆動機構の剛性楕円制御, 電気学会論文誌 D, 査読有, vol. 131, no. 3, 2012, pp. 340-346
- ② 灰屋和勇, 駒田諭, 平井淳之, 腱駆動機構における非線形バネの特性式誤差補償による張力制御, 電気学会論文誌 D, 査読有, vol. 130, no. 6, 2010, pp. 816-823

[学会発表] (計 23 件)

- ① Shota Mori, Satoshi Komada, and Junji Hirai, Simple Tension Distribution Converting Workspace Commands for 2-Joint Arm with 3 Pairs of 6 Tendons, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011 年 12 月 9 日, Phuket Island, Thailand
- ② Hiroyasu Kashiwagi, Fumihiro Okumura, Satoshi Komada, and Junji Hirai, Stiffness Ellipse Control of Tendon Mechanisms with Nonlinear Springs, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011 年 12 月 9 日, Phuket Island, Thailand
- ③ Keisuke Kondo, Satoshi Komada, and Junji Hirai, A Decision Method of Grasp Region based on a Fingertip Force Evaluation Resisting External Force, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011 年 12 月 9 日, Phuket Island, Thailand
- ④ 松岡, 白井, 打田, 落下物を受動的にキャッチング可能な三リンク柔軟関節ロボットアームの開発, コンプライアンスリミッターの提案, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス学術講演会 2011, 平成 23 年 5 月 28 日, 岡山コンベンシ

ョンセンター

- ⑤ Shota Mori, Satoshi Komada, and Junji Hirai, Development and Verification of Simple Tension Distribution Considering Tension Limits for 2-Joint Arm with 3 Pairs of 6 Tendons, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011 年 5 月 11 日, 上海
- ⑥ Shota Mori, Satoshi Komada, and Junji Hirai, Tension Distribution Considering Tension Limit for 2-Joint Arm with 3 Pairs of 6 Tendons, The 8th France-Japan and the 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2010 年 11 月 23 日, 横浜
- ⑦ 白井達也, 落下物を受動的にキャッチング可能な三リンク柔軟関節ロボットアームの開発— 非線形バネ要素の配置位置による構造の違い —, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス学術講演会 2010, 2010 年 6 月 15 日, 旭川大雪アリーナ
- ⑧ Kazuo Haiya, Satoshi Komada, Junji Hirai, Tension Control for Tendon Mechanisms by Compensation of Nonlinear Spring Characteristic Equation Error, The 11th International Workshop on Advanced Motion Control, 2010 年 3 月 22, 長岡技術科学大学 (長岡市)
- ⑨ Kazuo Haiya, Satoshi Komada, Junji Hirai, Control of Tendon-driven Robotic Mechanisms by Non-Linear Springs with Hysteresis Characteristics, IEEE International Conference on Mechatronics, ICM2009, 2009 年 4 月 15 日, Malaga, Spain

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

平井 淳之 (HIRAI JUNJI)
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30345996

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