

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510230

研究課題名(和文)パッシブダイナミック制御適用空気圧ゴム人工筋アクチュエータの開発

研究課題名(英文)Development of pneumatic rubber artificial muscle actuators applying passive dynamic control

研究代表者

清田 高德(KIYOTA, Takanori)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：00195405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：パッシブダイナミック制御PDCは、ブレーキ操作により位置制御や速度制御を行う、安全性の高い制御方式である。本研究では、空気圧ゴム人工筋を用いた2リンクマニピュレータを水平面2タイプと鉛直面1タイプ開発し、PDCの有効性を示した。また、PID制御を併用する改良PDCを提案し、制御性ではPDCの問題点を補う成果を得た。さらに、揺動型空気圧シリンダを用いた2リンクマニピュレータや新しいメカニズムに基づくパワーアシスト装置を開発し、PDCの効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：The "Passive Dynamic Control (PDC)" is a mechanical system control method with high-safety, and it achieves positioning control and speed control by operating the brake. In this research project, three types of two-link manipulators using pneumatic rubber artificial muscles were developed, two in horizontal plane and one in vertical plane, and the effectiveness of the PDC were shown. The improved PDC in which the PID control was used together was proposed, and better results than the PDC were obtained in control performance. Furthermore, additional two-link manipulator using rotary pneumatic cylinders and a power-assistive device based on a new mechanism were developed, and effects of the PDC were validated.

研究分野：複合新領域

キーワード：安全工学 制御工学 メカトロニクス 空気圧システム

1. 研究開始当初の背景

少子高齢社会を迎えた日本では、福祉機器やサービスロボットなど、人間との接触を行う機械システムへの期待が高く、産業化の実現に向けた動きが活発になっている。そのためには、機能や性能の追求と同時に、安全性の確保が不可欠であり、人間共存型ロボットの国際規格制定も進められている。現在、安全性向上のためにインピーダンス制御などが広く利用されているが、故障で機能を失うと逆に危険だという矛盾をはらんでいる。このため、より安全な制御理論や制御手法の開発が求められている。

このような中、申請者らは本質的安全設計に基づく機械システム制御法“パッシブダイナミック制御”(PDC)を提案した。制御プロセスに安全確認の原理を取り入れた PDC は、ブレーキ操作により位置制御や速度制御を実現する。これまでの研究により、空気圧システムに対する有効性を示し、安全なパワーアシスト装置の開発などを行ってきた。実システムへの適用に向けた研究が求められている。

2. 研究の目的

本研究における申請時の目的は、主に以下の4点である。

(1) 2リンク PDC 空気圧ゴム人工筋マニピュレータの安全高精度制御に関する研究

空気圧ゴム人工筋は、その特質により福祉機器等への利用が期待されているが、制御性がよくないという根本的な問題を抱えている。これまでの研究で、PDC を適用すれば、柔軟性という特質を失うことなくその制御性を向上させることができることを示した。本研究では、現在開発を進めている2リンクマニピュレータを用いて、位置決め制御、軌道追従制御の方法を確立し、その制御性を検証する。モデルに基づく制御法との詳細な比較を行い、有効性や問題点を明らかにする。特に、制御性や安全性だけでなく、制御における空気使用量と電気使用量も調べる。多方面からの検証により、実システムへの応用を検討する。

(2) PDC 空気圧ゴム人工筋アクチュエータの重量物持ち上げ制御に関する研究

PDC はバランス状態を作り出し、小さな移動力(駆動力)で重量物を操作しようとする制御である。空気圧ゴム人工筋は、出力/重量比が大きい点が特長の一つである。本研究では、PDC 空気圧ゴム人工筋を用いた重量物持ち上げ制御システムを開発する。ブレーキによる停止性能、制御性、能力などを検証し、その有効性と問題点を探り、実用化について検討する。

(3) PDC 併用制御に関する研究

PDC の基本原理は、使用する空気圧は変えない(比例弁は使用しない)など、安全性に最大の配慮をした制御法であり、その反面、制御性は劣る。安全性と制御性はトレードオフの関係にあると言える。本研究では、この問題について検討し、安全性よりも制御性の向上に重点を置いたブレーキ制御について、研究する。さらに、モデルに基づく従来の制御法との併用について検討する。原理が異なる2つを組み合わせることによって、効果を出すことが期待できる。

(4) PDC を包含する安全な制御に関する研究

PDC は、本質的安全設計の考え方を制御に取り入れることで、安全な制御を実現しようとするものである。この考え方を更に発展させて、「安全な制御」について考察する。

3. 研究の方法

(1) 2リンク PDC 空気圧ゴム人工筋マニピュレータの安全高精度制御に関する研究

開発した PDC 空気圧ゴム人工筋アクチュエータの基本構造を図1に示す。ON/OFF 弁だけを使用し、MR ブレーキの操作によって制御を行うことが大きな特徴である。これを2本上下対称に重ね、連結ベルトによって2つのアームを動かすマニピュレータを開発する。2本のアームは軸によって接続するが、元のアームの先端には軸受が設置されているため、一般的な2リンクマニピュレータと異なり、先端アームは元アームの駆動の影響を受けない構造である。このメカニズムは、PDC に適していると考えられる。位置決め制御と軌道追従制御による制御性の追求、モデルに基づく従来制御法との制御性比較により、PDC の有効性と問題点を明らかにする。さらに、空気消費量および電気エネルギー消費量を PID 制御などと比較する。

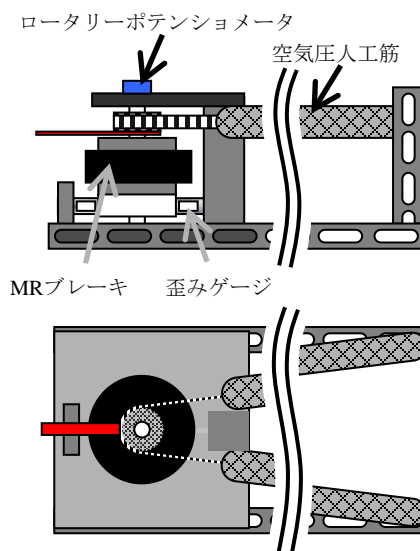


図1 空気圧人工筋アクチュエータ

(2) PDC 空気圧ゴム人工筋アクチュエータの重量物持ち上げ制御に関する研究

図1のPDC 空気圧ゴム人工筋アクチュエータを鉛直方向に設置した構造の実験装置を製作し、重量物の位置決め制御実験を行う。この研究では、バランス操作とブレーキ力の調整が重要になると考えられる。連続位置決め制御、および物体質量の変化への対応など、実験によりPDCの有効性と問題点を検証する。ここでも、モデルに基づく従来法との比較を行う。

(3) PDC 併用制御に関する研究

一般に、安全性にこだわれば、制御性能は悪くなる。空気圧、バランス、ブレーキ操作など、安全性と制御性の関係について、既存の1リンク実験装置を用いた実験によって検討する。

(4) PDC を包含する安全な制御に関する研究

「安全な制御法」としてロボットなどでよく用いられているインピーダンス制御では、本質的な安全を保証することはできないことが報告されている。さらに、「安全な制御」の原理に関する検討が進められている。本研究では、PDCをベースとした「安全な制御」について考察する。

4. 研究成果

(1) 2リンク PDC 空気圧ゴム人工筋マニピュレータの安全高精度制御に関する研究

PDC 適用空気圧ゴム人工筋2リンクマニピュレータの構造を図2に示す。連続位置決め制御と円軌道追従制御実験において、PI制御との比較を行い、良好な結果が得られた。さらに、大きな負荷に耐えられる新しいメカニズムの2リンクマニピュレータを開発し(図3)、PDCの有効性を確認した。

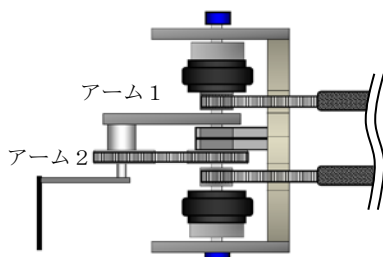


図2 2リンクマニピュレータの構造

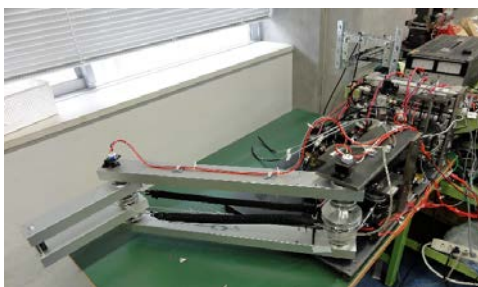


図3 新しい2リンクマニピュレータ

(2) PDC 空気圧ゴム人工筋アクチュエータの重量物持ち上げ制御に関する研究

鉛直方向に設置した1リンク実験装置を用いて、重量物の位置決め制御実験を行った。持ち上げ制御では、移動によって基本の平衡状態が崩れるという問題点に対し、改良PDCを適用し、その有効性を確認した。さらに、拮抗型の2リンクマニピュレータを開発し(図4)、持ち上げの位置決め制御実験を行った。(3)参照

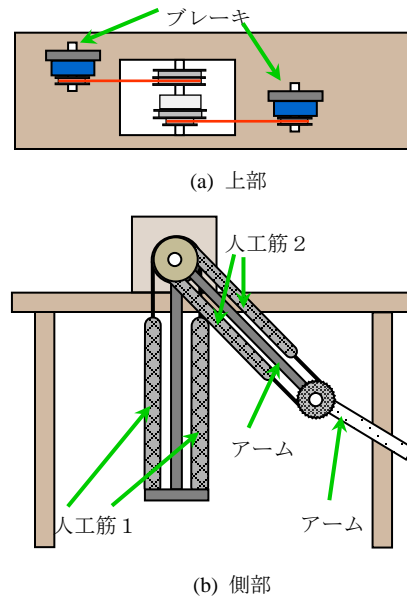


図4 持ち上げ用2リンクマニピュレータ

一方で、この方法では用いる空気圧が大きくなるという問題が残る。そこで、平衡操作と移動操作を2つの人工筋アクチュエータで別々に行うメカニズムを検討し、基礎実験により、小さな空気圧で移動操作を行う結果が得られた。

(3) PDC 併用制御システムの検討

PDCにPID制御を併用する改良PDCを提案し、1リンク実験装置により有効性を検証した。実験結果を図5に示す。さらに、図4の2リンクマニピュレータを用いて、PDC、改良PDC、PID制御の比較を行った。図6に実験結果の一例を示す。アーム先端に1kgの負荷を与えた場合である。改良PDCの有効性が分かる。

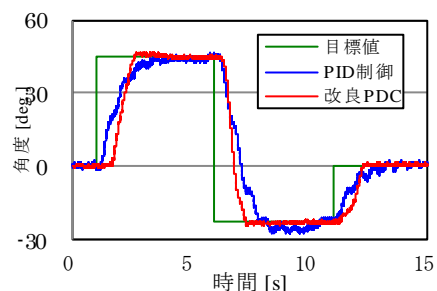
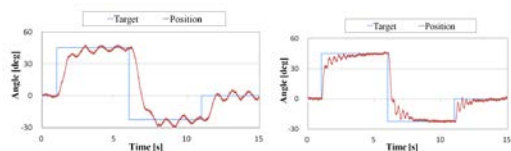
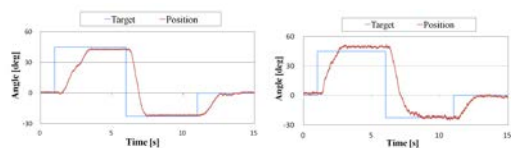


図5 持ち上げ制御比較



(a) アーム 1 (b) アーム 2

(1) PID 制御



(a) アーム 1 (b) アーム 2

(2) 改良 PDC

図 6 2リンク持ち上げ制御比較

さらに、これまでの研究成果に基づき、拮抗型人工筋と揺動型シリンダを組み合わせた新しい2自由度マニピュレータを開発し、基礎実験を行った。

(4) PDC を包含する安全な制御に関する研究

PDC による軌道追従制御「囲い込み制御」を、揺動型空気圧アクチュエータを用いたマニピュレータに適用し、1リンク実験装置では位置決め制御と正弦軌道追従制御実験においてスライディングモード制御との比較を行い、2リンク実験装置(図7)では軌道追従制御実験により、それぞれ有効性を示した。図8に円軌道追従実験結果を示す。摩擦が大きいため、PI制御やスライディングモード制御ではいびつな円しか描けないが、囲い込み制御では良好な結果が得られた。

(5) PDC 適用パワーアシスト装置の提案

PDC を適用したダイレクトハンドリング可能な新しいパワーアシスト装置を製作し、力センサを用いる方法との比較において、有効性を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Y. Minamiyama, T. Kiyota, T. Mori, N. Sugimoto, Development of Constant Torque Device and Its Application to Power Assist Systems, Proc. of the 2014 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2014), 査読有, pp.4292-4297
- ② T. Kiyota, Y. Minamiyama, Y. Fujita, N. Sugimoto, Two-Link Pneumatic Artificial Muscle Manipulator Based on Passive Dynamic Control, Proc. of the 37th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics

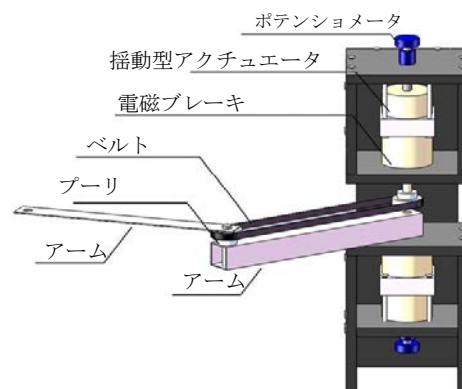
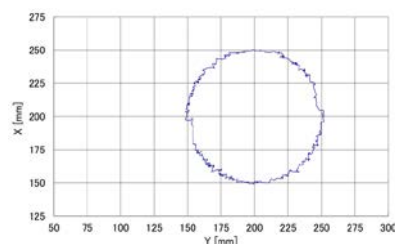
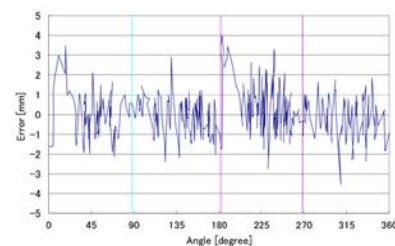


図 7 揺動型2リンクマニピュレータの構造



(a) 円軌道結果



(b) 半径方向誤差

図 8 円軌道追従実験 $r = 50 \text{ mm}$

Society (IECON2013), 査読有, pp.4292-4297

- ③ Y. Minamiyama, T. Kiyota, N. Sugimoto, Trajectory Follow-up Control by Enclosing Control with Rotary Pneumatic 2-Link Manipulator, Proc. of the 2013 American Control Conf. (ACC2013), 査読有, pp.6489-6494

[学会発表] (計 7 件)

- ① 清田高德、山本秀平、南山靖博、成松功貴、パッシブダイナミック制御による2リンク空気圧人工筋マニピュレータの位置制御、第57回自動制御連合講演会、2014年11月11日、ホテル天坊(群馬)
- ② 南山靖博、清田高德、森隆浩、杉本旭、定トルク装置を用いるパワーアシストシステムの開発、第32回日本ロボット学会学術講演会、2014年9月4日、九州産業大学(福岡)
- ③ 山本秀平、清田高德、南山靖博、パッシブダイナミック制御による拮抗駆動型空

気圧ゴム人工筋の持ち上げ制御、第 32 回計測自動制御学会九州支部学術講演会、2013 年 11 月 30 日、長崎大学（長崎）

- ④ 手柴祥平、南山靖博、清田高德、杉本旭、パッシブダイナミック制御による追従制御の評価、日本機械学会九州支部鹿児島講演会、2013 年 9 月 28 日、鹿児島大学（鹿児島）
- ⑤ 古木祐太、南山靖博、清田高德、杉本旭 囲い込み制御による 2 リンク揺動型空気圧マニピュレータの軌道追従制御、日本機械学会九州支部鹿児島講演会、2013 年 9 月 28 日、鹿児島大学（鹿児島）
- ⑥ 南山靖博、清田高德、杉本旭、囲い込み制御による揺動型空気圧アクチュエータの円軌道追従、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、2012 年 12 月 20 日、福岡国際センター（福岡）
- ⑦ 清田高德、南山靖博、藤田祐輝、杉本旭、パッシブダイナミック制御による 2 リンク空気圧人工筋マニピュレータの円軌道追従、第 30 回日本ロボット学会学術講演会、2012 年 9 月 18 日、札幌コンベンションセンター（北海道）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清田 高德 (KIYOTA, Takanori)
北九州市立大学・国際環境工学部・教授
研究者番号：00195405

(2) 研究分担者

南山 靖博 (MINAMIYAMA, Yasuhiro)
久留米工業高等専門学校・機械工学科・助教
研究者番号：20549688

(4) 研究協力者

杉本 旭 (SUGIMOTO, Noboru)
明治大学・教授