

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6月11日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310110

研究課題名（和文） 本質的安全設計に基づく制御法による空気圧システムの安全高精度制御

研究課題名（英文） Safe and high-precision control of pneumatic systems using control method based on inherently safe design

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

研究成果の概要（和文）：本研究は、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）」を空気圧システムに適用したものである。PDC 実現のためにブレーキなどを装備した実験装置を製作し、直動型及び揺動型空気圧シリンダ（2軸）の連続位置決め制御と軌道追従制御、2リンク空気圧ゴム人工筋マニピュレータの円軌道追従制御などにおいて、その効果を確認した。さらに、PDC を市販のエアバルンサに適用し、実システムに対しても有効であることを示した。

研究成果の概要（英文）：This project applied the “Passive Dynamic Control (PDC)”, which was the mechanical system control method based on the inherently safe design, to pneumatic systems. Experimental setups were developed, and the effectiveness was shown through continuous positioning control and follow-up control for both linear and rotary pneumatic cylinders, and circular follow-up control for two-link pneumatic rubber artificial muscles manipulator. Furthermore, the PDC was applied to commercial air-balancer, and it was shown that the PDC was effective to actual systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安心システム科学、社会システム工学・安全システム

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る日本では、福祉機器やサービスロボットなど、人間との接触を伴う機械システムへの期待が高く、研究・開発が盛んである。それらの産業化を実現するためには、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。サービスロボットや福祉機器を広く世の中に普及させるためには、誤って（故障しても）人に対して過大な力が出力されないことが要求される。

機械安全 ISO12100 における本質的安全設計は、機械による挟まれ等を生ずる危険源に対して、力や運動エネルギー等の物理的条件

が人間に危害を生じないこと（本質安全）を設計の段階で保証しようとするものである。機械安全の体系化が進む中、本質的安全設計を優先した制御理論や制御手法の開発が求められている。申請者らは、本質的安全設計の考え方を取り入れた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。

本研究は、PDC を空気圧システムに適用し、安全で高精度な制御の実現を目指すものである。

2. 研究の目的

本研究における具体的な目的は、主に以下の3点である。

(1) PDC 空気圧シリンダの高精度制御

これまで、電磁摩擦ブレーキとロードセルを取り付けた PDC 空気圧シリンダを開発し、連続した中間位置決め、正弦軌道時間追従制御と、PDC 空気圧シリンダを2本用いる円軌道追従制御を行い、基礎実験で有望な結果を得た。

本研究では、制御方法と実験システムの見直し・改良を行い、位置制御、速度制御、力制御において、従来法との比較を行う。また、下記の(2)と関連して、本システムの安全性を評価し、実システムへの適用について検討する。

(2) PDC を用いるインタロックによる安全制御システムの構築

従来の安全システムの一つとして、インタロックがある。インタロックはシステムに異常を検出すると、停止させることによって安全を確保する。しかし、頻繁にシステムを停止すると稼働率が低下し、問題である。そこで PDC のブレーキ制御をインタロックに適用させることによって、インタロックの介入を回避し、安全性が高く、稼働率を確保する新たな安全システムを構築する。

(3) PDC の空気圧ゴム人工筋制御への適用

空気圧を用いるソフトアクチュエータは、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。ソフトアクチュエータの制御に PDC を適用すれば、その制御性を向上させることができると考えられる。

本研究では、McKibben 型ゴム人工筋に対して、PDC を適用するメカニズムを検討する。ブレーキには、高応答が得られるMRブレーキを利用する。そして、高精度な制御を実現する安全性の高い空気圧ゴム人工筋システムを開発する。

3. 研究の方法

(1) PDC 空気圧シリンダの高精度制御

電磁摩擦ブレーキ、ブレーキに掛かる力と移動方向を確認するためのロードセルを取り付けた PDC 空気圧シリンダを開発した。本研究では、この PDC 空気圧シリンダを二本用いて、二軸方向への移動が可能な PDC 空気圧シリンダシステムを製作する。その構造を図1に示す。シリンダを水平方向に設置し、ロッド先端の位置はレーザ変位計を用いて測定する。二次元平面における軌道追従制御を行うことによって、制御性能の検証を行う。また、外乱を加えた実験により、ロバスト性と安全性の検証も行う。

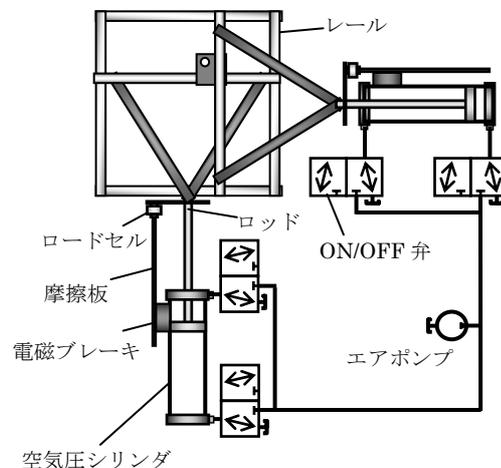


図1 PDC 空気圧シリンダ実験装置

さらに、揺動型空気圧シリンダに対しても PDC を適用するための実験装置を開発し、同様な実験を行う。

(2) PDC を用いるインタロックによる安全制御システムの構築

一般的な人間/機械作業システムの安全対策として、インタロックが用いられる。インタロックとは、事前に定められた条件が満たされない場合、機械の運転を禁止する機構であるが、通常は一旦停止すると、再起動までに時間が掛かることになる。本研究では、PDC を適用することによって、インタロックの介入をできる限り回避して、本来の目的の稼働率を確保するシステムを提案する。さらに、それを空気圧システムに適用する。

(3) PDC の空気圧ゴム人工筋制御への適用

PDC を適用するために開発した PDC 人工筋アクチュエータの基本構造を図2に示す。2つの人工筋をタイミングベルトで連結し、タイミングベルトにタイミングプーリをか

み合わせる。2つの人工筋の伸縮によって、タイミングプーリが回転する。さらに、PDC実現のためにMRブレーキとトルクセンサを取り付ける。この実験装置を用いて、連続位置決め制御と正弦軌道追従制御を行い、有効性を検証する。さらに、本アクチュエータを2つ組み合わせた2リンクシステムを開発し、円軌道追従制御を行う。

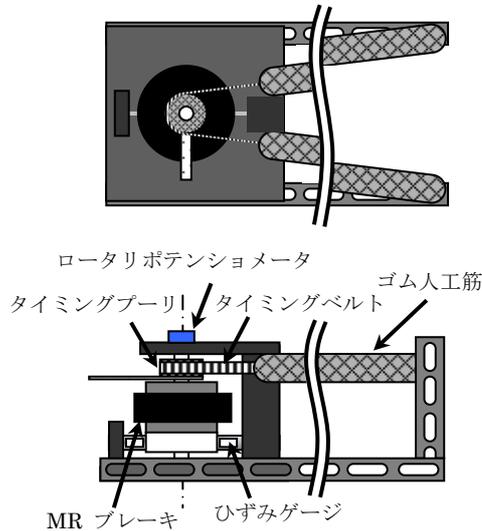


図2 PDC 空気圧ゴム人工筋実験装置

4. 研究成果

(1) PDC 空気圧シリンダの高精度追従制御

図1の実験装置を用いた円軌道追従制御実験を行った。PI制御との比較結果を図3から図5に示す。摺動摩擦が大きくスティックスリップが生じやすい装置であるが、移動中はアクチュエータの出力を操作しないPDCの特長により、スティックスリップの影響を抑えた良好な精度での制御が実現できた。また、外乱の悪影響をブレーキによって抑制できていることも確認できた。

(2) PDC 揺動型空気圧シリンダの高精度追従制御

開発したPDC揺動型空気圧シリンダを用いて、位置決め制御と追従制御実験によりPDCの有効性を示した。さらに、PDC揺動型空気圧シリンダを2本用いた2リンクマニピュレータを開発し、位置決め制御と円軌道追従制御実験を行った。いずれの実験でも、PDCの有効性を示す結果が得られた。

(3) PDCを用いるインタロックに関する研究

インタロックは、機械が作業する領域を危険領域と定めて危険領域に人間がいないことを確認する相互インタロックと、危険領域を機械が逸脱していないことを確認する自

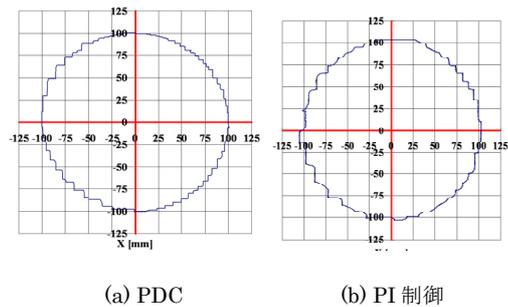


図3 円軌道追従制御 (10秒)

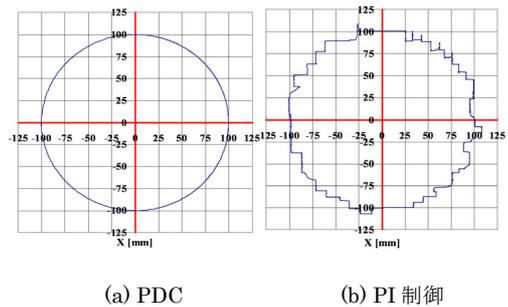


図4 円軌道追従制御 (80秒)

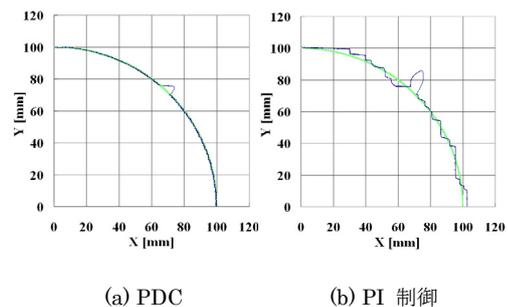


図5 外乱

己確認型インタロックで実現される。ここでは、PDCを適用することによって、自己確認型インタロックの介入をできる限り回避して、本来の目的の稼働率を確保するシステムを提案した。さらに、それを上記(1)のPDC空気圧シリンダの軌道追従制御に適用し、有効性を示した。

(4) PDCの空気圧ゴム人工筋制御への適用

空気圧ゴム人工筋は、軽量で柔軟であるなどの性質により福祉機器への適用が研究されているが、一方で制御性に問題がある。PDCは制動力が可変なブレーキ機構により、高剛性とコンプライアンス性を合わせ持つ制御であり、空気圧ゴム人工筋の制御にPDCを適用すれば、その制御性を向上させることが期待できる。まず、図2に実験装置を用いて、PDC適用の基礎実験を行った。そして、1リンクシステムによる位置決め制御と正弦軌道追従制御実験において、PI制御との比較により、PDCの有効性を確認した。次に、

PDC 人工筋アクチュエータを用いた2リンクシステムを開発した。その構造を図6に示す。2本のアームは、独立して制御できる。円軌道に追従させる制御法を考案し、追従制御実験を行った。MRブレーキの操作にインテグレーションを用いることで、図7に示す良好な結果が得られた。さらに、重量物持ち上げ制御実験用の装置を開発した。

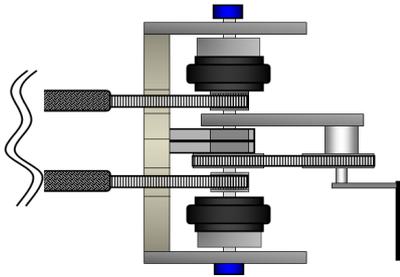
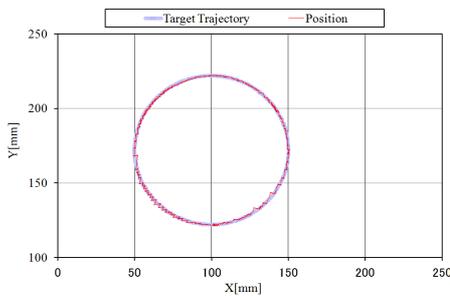
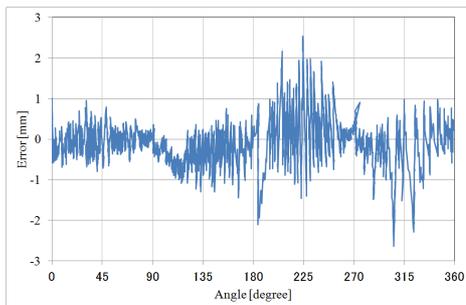


図6 2リンクシステムの構造。



(a) 軌道



(b) 誤差

図7 PDC ゴム人工筋の円軌道追従制御

(5) PDC エアバルンサの有効性検証

市販のエアバルンサを改良した PDC エアバルンサを開発した。構造を図8に示す。ドラムの回転を止めるため、ドラムの動きに連動するブレーキホイールに歯車をかみ合わせる形でMRブレーキを配置する。電流印加時にはドラムの回転がブレーキ固定台に伝

わるため、固定台とバルンサの間に金属板を設置することでホールドを行う。金属板にはMRブレーキにかかるトルクを検出するひずみゲージを配置する。また、PDC エアバルンサには、操作者の作動力を検出するためのロードセルを取り付けたハンドルを開発した。操作者はハンドル部分に作動力を与えることで任意の位置に制御対象を移動させることができる。この装置を用いた実験を行い、制御性と安全性の検証を行った。その結果、小さな力で重量物を上下させるマテリアルハンドリング装置としての可能性を示した。

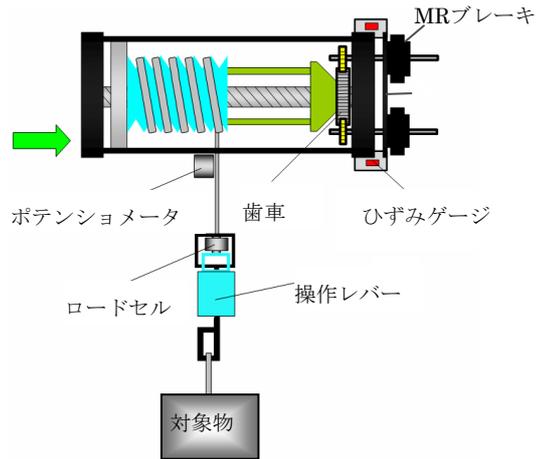


図8 PDC エアバルンサの構造

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3件)

- ① Y. Minamiyama, T. Kiyota, N. Sugimoto, Enclosing Control Based on Brake Operation and Its Application to Pneumatic Systems, Proc. of the 37th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011), 査読有, 2011, pp. 75-80
- ② 南山靖博、五味裕記、清田高德、杉本旭、パッシブダイナミック制御適用エアバルンサの開発、第16回ロボティクス・シンポジウム論文集、査読有、2011、pp.180-185
- ③ T. Kiyota, Y. Minamiyama, N. Sugimoto, Safer Position Control of Pneumatic Rubber Artificial Muscle Actuator by Passive Dynamic Control, Proc. of the 2010 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2010), 査読有, 2010, pp. 1152-1157

[学会発表] (計5件)

- ① 藤田祐輝、南山靖博、清田高德、パッシブ

ブダイナミック制御を用いた 2 リンク空気圧ゴム人工筋マニピュレータ、第 30 回計測自動制御学会九州支部学術講演会、2011 年 12 月 4 日、大分

- ② 脇光俊介、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空気圧ゴム人工筋の位置制御、第 53 回自動制御連合講演会、2010 年 11 月 5 日、高知
- ③ 清田高德、南山靖博、杉本旭、パッシブダイナミック制御のマテリアルハンドリングシステムへの適用、日本機械学会中国四国支部・九州支部合同企画徳島講演会、2010 年 10 月 16 日、徳島
- ④ 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空気圧ゴム人工筋の位置決め、日本機械学会九州支部第 63 期総会講演会、2010 年 3 月 15 日、熊本
- ⑤ 清田高德、南山靖博、杉本旭、パッシブダイナミック制御による囲い込み制御～空気圧アクチュエータへの適用と評価～、第 27 回日本ロボット学会学術講演会、2009 年 9 月 16 日、横浜

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

佐々木 卓実 (SASAKI TAKUMI)
北九州市立大学・国際環境工学部・準教授
研究者番号：80434342

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：20549088