

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01229

研究課題名(和文) パッシブダイナミック制御理論の展開とパワーアシストシステムへの応用

研究課題名(英文) Expansion of passive dynamic control theory and its application to power assist systems

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：パッシブダイナミック制御PDCは、本質的安全設計の考え方に基づく制御方式である。本研究では、PDCの適用を広げる方策を提案し、鉛直面内の空気圧人工筋2リンクマニピュレータに適用して有効性を示した。さらに、PDCを理論面で発展させた本質安全制御に関する考察を行った。同時に、その理論に基づき、ばねを用いる上下方向のダイレクトハンドリング可能なパワーアシストシステムを開発した。さらに、そのシステムを応用したパワーアシスト台車を提案し、試作機により、基本原理の動作確認を行った。

研究成果の概要(英文)：The passive dynamic control (PDC) is a control method based on the inherently safe design. In this research, we proposed a method to expand the application of the PDC, and its effectiveness was shown by applying it to the two-link pneumatic artificial manipulator on the vertical plane. Furthermore, we considered the inherently safe control where the PDC was developed theoretically. Then, based on the theory, we developed power assist systems which enabled direct-handling operation in up-and-down direction by using springs. Besides, we proposed a power-assisted cart in which the power assist system was applied, and confirmed its motion of the basic principle using a prototype cart.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 安全工学 パワーアシスト メカトロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

少子高齢社会の到来を背景に、福祉、介護、製造など、様々な分野で人間と空間を共有して作業を行うロボットや機器の実用化、産業化が期待されている。そこでは、高速、高精度、大出力の追求ではなく、誤って人に対して過大な力が出力されない、より安全な制御法が必要となる。機械安全の体系化が進む中、「安全な」制御理論や制御手法の開発が求められており、本研究はその要請に応えるものである。

申請者らが研究を進めている PDC の主な特長は以下の通りである。

1) 本質的安全設計に基づく制御: PDC の目的は、まず、高負荷の制御対象を人間の操作可能な負荷に低減することである。これにより、制御の誤りで過大な力が直接人間に作用することを防ぐ。

2) 安全確認の原理を取り入れた制御: 人間に対してその防御能力を超えた出力が生じないことの確認を行い、確認できなければ制御を実行しない。PDC における制御プロセスは、安全な力の条件の生成(準備)、確認、許可、実行のステップから構成される。すなわち、PDC は、操作の適切な負荷特性を確認し、確認できるまでその動作を実行させない。

3) ブレーキ操作による制御: PDC では、実行の許可、停止、位置保持だけでなく、速度制御もブレーキによって行う。このため、制御性能はアクチュエータよりもブレーキの操作に大きく依存する。

## 2. 研究の目的

本研究は、PDC の発展と、PDC を適用した新しいパワーアシストシステムの開発を目指すものであり、具体的な目的は主に以下の3点である。

### (1) PDC を包含する安全な制御に関する理論の構築

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。確率論に基づかない安全な制御として、本質安全制御や監視調整制御の概念が提唱されている。この考え方を更に発展させて、「安全な制御」について追求する。

### (2) 鉛直上下方向パワーアシストシステムの開発と評価

パワーアシスト装置の特長は、作動力を人間の手で直接重量物に与えることで、重量物を容易に意思通りに移動させるダイレクトハンドリングが行える点にある。しかし、一般的に用いられる力センサはノイズの影響を受けやすく誤作動の原因となるなど、安全性の確保が問題である。これに対して申請者らは、PDC を適用することで、通常のモータ

を使用する定トルク装置を考案し、それを適用したパワーアシスト装置を提案した。ここではまず、問題点が見付かった装置の構造を見直して不具合を修正し、鉛直上下方向でのパワーアシストシステムを開発する。その上で、力センサを用いるシステムとの比較検証を行う。これによって問題点を洗い出し、さらに改良を重ね、より実用的なシステムを開発する。

### (3) パワーアシストシステムの搬送装置への応用

開発したパワーアシストシステムを、水平搬送装置へ拡張する。まず、上下方向の移動メカニズムを、水平方向の移動にも対応できるように、研究開発を行う。その上で、手動運搬装置へのパワーアシストとして応用する。既に様々なタイプの機器が実用化され、あるいは研究開発が行われているが、それらとの違いを明確にして、安全性の高い装置として作り上げていく。

## 3. 研究の方法

### (1) PDC を包含する安全な制御に関する理論の構築

本研究では、PDC をベースとした「安全な制御」について、理論面での考察を進める。一般の制御は「～するように」という目的達成の制御だけであるが、安全な制御はこれに「～しないように」という安全確保の制御が加わる。確率論に依らない確定論に基づく安全な制御に関して、理論を構築する。

### (2) 鉛直上下方向パワーアシストシステムの開発と評価

開発を目指す装置は、受動要素であるバネを使用し、バネのトルクと対象物によるトルクとが釣り合っている平衡状態を基本状態とする。バネによる平衡状態であるため、高負荷の対象物であっても、小さな作動力で変位させることができる。その変位から移動方向を検出し、モータを制御することで、通常の定トルク装置と同様の動作を実現する。さらに、ブレーキ機構によって停止と位置保持を行う点は、PDC の原理に基づいている。ダイレクトハンドリングによる上下方向パワーアシストの基本メカニズムを構築する。

パワーアシストシステムの多くは、装置にロードセルなどの歪を利用した力センサが使われている。しかし、ノイズの影響を受けやすく、信頼性に問題がある。また、対象物の質量が大きいと、手で加える作動力も大きくなる。開発を目指すシステムは、これらの問題を解決する可能性がある。一方で、バネによる振動等の問題が懸念される。これらの問題点に関して、力センサを用いるシステムとの比較検証実験を行い、問題点の解決を図る。

### (3) パワーアシストシステムの搬送装置への応用

開発した上下方向移動メカニズムを、水平方向の移動にも対応できるように拡張する。基本メカニズムを検討し、実験によりその有効性を検証する。手動運搬装置として、はじめに前後方向、続いて左右方向の移動希望方向を人の小さな作動力によって検出し、パワーアシストを行うシステムを開発する。試作機の完成を目指す。

## 4. 研究成果

### (1) PDC 理論の展開と人工筋 2 リンクマニピュレータへの応用

マニピュレータによる持ち上げ制御では、移動に伴って平衡状態が崩れてしまう。この問題に対する対策として、PDC に PID 制御を併用する改良 PDC を提案し、改良した鉛直面内に設置した空気圧ゴム人工筋 2 リンクマニピュレータ (図 1) を用いて、PID 制御との比較によりその有効性を示した。また、アーム先端におもりを取り付けた状態での円軌道追従制御を実現した。さらに、平衡装置と移動装置を別にする事で安全性を保ちつつ制御性の向上を図る方法を提案し、1 リンク実験装置を用いて、検証を行った。(詳細は、論文 と学会発表 参照。)

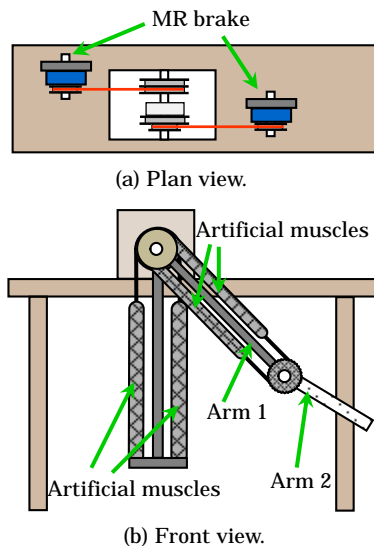


Fig.1 Structure of two-link manipulator.

### (2) 鉛直上下方向パワーアシストシステムの開発と評価

本装置は、重量物に直接手で力を加えることで上下方向の移動を実現するダイレクトハンドリング可能なパワーアシスト装置である。PDC に基づき、受動要素であるバネを使用し、バネのトルクと対象物によるトルクとが釣り合っている平衡状態を基本状態とする。昇降動作の基本シーケンスは、以下の通りである。

基本状態：平衡状態のときのばねの角度を回転ポテンシオメータにより計測し、基準

の値として保存する。

操作力の入力：重量物に与える操作力によって基本状態からばねに角度変位が生じる。角度変位をロータリーポテンシオメータで検出し、設定した閾値以上になったら操作力方向の移動操作を行う。

移動：閾値以上の操作力が検出されている間、モータにより角度変位を打ち消す方向にドラムを回転させる。

停止：手を離し、操作力が無くなると、角度変位は閾値内に収まるため、モータを停止し、基本状態に戻る。

開発した回転ポテンシオメータを用いるシステムと、従来の力センサを用いるシステムとの比較検証実験を行い、有効性を示した。さらに、揺れや衝撃や電源喪失などに対する実験により、その高い安全性を確認した。また、巻きばねを用いる装置とコイルばねを用いる装置の評価実験を行った。さらに、モータ変更などの改良を行うことで、操作性の向上を実現した。

(詳細は、論文 と学会発表 参照。)

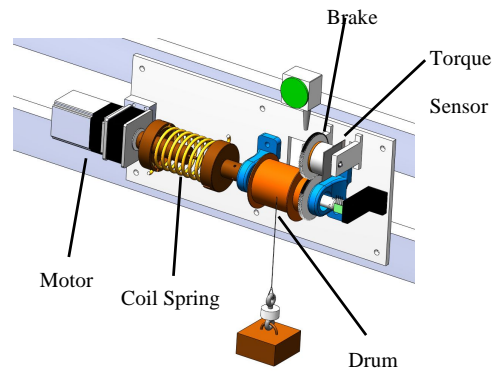


Fig.2 Direct-handling system.

### (3) パワーアシストシステムの搬送装置への応用

開発したパワーアシストシステムを、水平方向の移動にも対応できるように拡張する研究を行った。市販の台車に開発した装置を取り付けたパワーアシスト台車の試作機を製作した。ダイレクトハンドリング装置を横方向に利用して開発したパワーアシスト台車の写真と構造を図 3 に示す。ダイレクトハンドリング装置のドラムの部分をスプロケットに変更し、後輪のスプロケットとチェーンで接続することで、モータのアシスト力を後輪に伝達すると共に、後輪側からの重力成分をコイルばねに伝達し、平衡状態を形成する。機械的な構造は、スプロケットの変更以外はダイレクトハンドリング装置と同様である。この他、台車を押すハンドル部に力センサを、台車の移動距離計測用にポテンシオメータを、電磁摩擦ブレーキのトルクセンサとしてひずみゲージを後輪に取り付けた。台車の初期位置を斜面とした場合の制御シーケンスは以下のようなになる。

基本状態：ブレーキにより台車の後輪を固定すると、重力の傾斜方向成分がブレーキに掛かり、このブレーキ力はひずみゲージにより計測される。ここで、ひずみゲージの値が設定した閾値内に収まるようにモータを回転させることで、コイルばねのねじれ角が調整される。これにより、平衡状態が生成される。

操作力の入力：ハンドル部に操作力を加えると、ブレーキが解除され、ばねに角度変位が生じる。

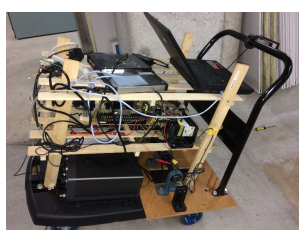
移動：角度変位が閾値を超えている間、モータにより角度変位を打ち消す方向にスプロケットを回転させる。アシスト力はチェーンを介して後輪に伝わり、台車は操作力方向に移動する。

停止：ハンドルから手を離すと、コイルばねの角度変位は閾値内に収まり、モータが停止して基本状態に戻る。さらに、ブレーキにより台車の位置保持を行う。

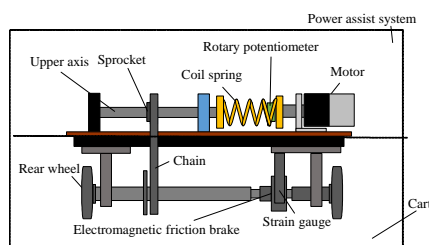
基本状態：移動の始点と終点で傾斜に変化がない場合、同様の平衡状態が形成できるため、制御シーケンスは終了して、基本状態に戻る。傾斜が移動途中で変化する場合は、ブレーキにより位置保持された状態でねじれ角を調整する。

すなわち、傾斜によって増加する負荷の分をばねによって補償する平衡操作はブレーキで台車を固定した安全な状態で行い、危険を伴う移動操作は安全な人の力で実現する。本システムは、傾斜の増加に伴う負荷増加の分だけをばねとモータによって補償する構造であり、傾角が変わっても、平坦な水平面と同程度の操作力で操作できることに特徴がある。試作機を用いた実験により、基本メカニズムの有効性を確認した。

(詳細は、論文 と学会発表 参照。)



(a) Photo



(b) Structure

Fig. 3 Power-assisted cart.

(4) PDC を包含する安全な制御に関する理論の構築

安全な制御理論の展開に関しては、パッシブダイナミック制御 (PDC) と本質安全制御に関する考察を行った。平衡装置によって外力との平衡状態を生成し、その安全な状態を基本とする。移動操作は、崩した平衡状態を取り戻そうとすることで実現する。停止操作を保証することで、安全を確保する。この考えをベースとしている。

(詳細は、論文 と学会発表 参照。)

[雑誌論文](計 3 件)

T. Kiyota, H. Sugimura, C. Hirano, Y. Minamiyama, N. Sugimoto, Proposal of Power-Assisted Cart Based on Inherently Safe Control, Proc. of the 43rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2017), 査読有, pp.2905-2910.

T. Kiyota, K. Narimatsu, Y. Minamiyama, S. Yamamoto, Proposal and Estimation of Improved Passive Dynamic Control for Two-Link Pneumatic Artificial Muscle Manipulator, Proc. of the 55th IEEE Conf. on Decision and Control (CDC2016), 査読有, pp.849-854

H. Sugimura, T. Kiyota, Y. Minamiyama, N. Sugimoto, Direct-Handling Enabled Power Assist System Using Coil Spring, Proc. of the 42th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2016), 査読有 .

[学会発表](計 7 件)

安永大悟, 南山靖博, 清田高德, バネが異なる 2 タイプの上下方向パワーアシスト装置の評価, 日本機械学会九州支部久留米講演会, 2017.10.21, 久留米高専 (福岡県)

城戸菜々望, 唐川侑也, 南山靖博, 清田高德, パッシブダイナミック制御の基本原理に基づいた空気圧ゴム人工筋マニピュレータの持ち上げ制御, 日本機械学会九州支部久留米講演会, 2017.10.21, 久留米高専 (福岡県)

清田高德, 杉村裕希, 平野力, 南山靖博, 杉本旭, 本質安全制御に基づくパワーアシスト台車, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演会, 2017.9.4, 埼玉大学 (埼玉県)

平野力, 杉村裕希, 清田高德, 南山靖博, 杉本旭, コイルばねを用いるパワーアシスト台車の提案, 日本機械学会九州支部第 70 期総会講演会, 2017.3.14, 佐賀大学 (佐賀県)

杉村裕希, 清田高德, 南山靖博, 杉本旭,

コイルばねを用いるダイレクトハンドリング可能なパワーアシスト装置，日本機械学会 2016 年度年次大会講演会 2016.9.12，九州大学（福岡県）

南山靖博，中村正英，清田高德，杉本旭，定トルク装置の改良とダイレクトハンドリング装置への応用，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016，2016.6.10，パシフィコ横浜（神奈川県）

成松功貴，南山靖博，山本秀平，清田高德，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持ち上げ制御，日本機械学会 2015 年度年次大会講演会，2015.9.15，北海道大学（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・  
准教授  
研究者番号：20549088

### (3)研究協力者

杉本 旭（SUGIMOTO, Noboru）