

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04924

研究課題名（和文）本質安全制御の確立とそのパワーアシストシステムへの適用

研究課題名（英文）Establishment of Inherently Safe Control 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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、本質安全制御の実装方法を提案し、それを適用したパワーアシストシステムの開発を行った。本質安全制御では安全な平衡状態を基本状態と定め、アクチュエータは崩れた平衡状態を回復するためだけに動作し、目的制御が実現される。開発したパワーアシスト台車は、上り坂では傾斜角の増加に伴って増大する負荷の分だけをモータでアシストすることで、傾斜角によらずに同程度の人の力で台車を移動させるシステムである。さらに、パワーアシストシステムを介助用車いすへ適用し、試作機の評価実験により、基本動作の確認を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間との共存が必要となる機械に対しては、人間の本質安全構造に基づいた制御により本質安全要求に応えることができるという考えに基づいた本質安全制御の一実装方法を確立した。そして、それを適用したパワーアシスト台車を開発し、有効性を示した。このシステムは安全性の高いパワーアシストシステムとして、様々な人間機械系に適用できる可能性を有している。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a power assist system that applies inherently safe control. In inherently safe control, a safe balanced state is defined as a basic state, and the actuator operates only to restore the collapsed balanced state, thereby achieving objective control. The developed power-assisted cart that moves the cart with the same amount of human power, regardless of the angle of inclination, by using a motor to assist only the amount of load that increases as the angle of inclination increases when going uphill. Furthermore, we applied the power assist system to a wheelchair for assistance, and confirmed its basic operation through an evaluation experiments of a prototype.

研究分野：安全工学

キーワード：人間機械系 パワーアシスト メカトロニクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

平成 27 年に「ロボット新戦略」が公表され、様々な分野で生活支援ロボットや人間協働型機械の産業化が図られている。そこでは、産業用ロボットのような人間と機械の動作空間を分離する安全方策は適用できず、国際規格はまだ整備途中である。このような中、研究代表者らのグループ(代表者：清田、分担者：南山、協力者：杉本)は安全な制御としてパッシブダイナミック制御を提案し、実システムへの適用に関する研究を進めてきた。しかし、まだ適用に制約があり、一般的な制御法とはなっていない。一方、研究協力者の杉本は、「安全とは事故の前に止めること」という確実な停止の実現を目指す本質安全制御の概念を提唱しているが、具体的な制御方法を示すまでには至っていない。「安全な制御とは」という問題に対する答と、実用的な安全な制御法(制御理論、制御手法)が求められている。本研究は、この問題に対する一つの解決策である。

### 2. 研究の目的

パッシブダイナミック制御の特長を要約すると、以下のようになる。

- ・ばねなどの受動要素によって作り出した平衡状態(=安全な状態)を基本とし、平衡操作と移動操作を分けて実行することで目的制御を小さな力やエネルギーで実現する。
- ・制御プロセスに安全確認の原理を取り入れ、制御の実行には安全確認を条件とする。
- ・アクチュエータ操作よりも「止める」ブレーキ操作が主要な役割を果たす。

これまでに基礎理論を確立し、様々なシステムへの適用に関する研究を行ってきた。リスクに基づく安全理論ではなく、「制御によって安全を確保する」という目的に基づく体系的な研究は研究代表者らのグループ独自のものである。一方、本質安全制御は「機械の力は、対象物、環境、そして人間に対して出力されるが、少なくとも人間には防御能力の限界(人間の耐性)を越えた出力がなされてはならない。」という原理のもと、監視構造を有する目的制御、調整制御、停止制御の構成によるという概念が示されている段階である。本研究の目的は、2つの人間協調型機械システムへの適用を通して、本質安全制御を確立することである。本質安全制御は、高い安全性が求められる人と接する様々な機械類に適用が期待できる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 本質安全制御の確立

本質安全制御は、パッシブダイナミック制御の上位にある概念と位置付けることができると考えている。目的制御が移動操作、調整操作が平衡操作、停止操作はブレーキ操作に対応する。そこでまず、パッシブダイナミック制御に監視構造を持たせる。この考えを発展させ、本質安全制御の確立を目指す。人間協調型機械システムの開発を通して、その結果をフィードバックすることで本質安全制御の有効性を立証する形で研究を進める。

#### (2) 本質安全制御を適用するパワーアシストシステムの開発

本研究で開発を行うパワーアシストシステムは、ボタンやレバーなどを用いることなく、重量物を直接手で操作できるダイレクトハンドリング装置であり、非熟練者や高齢者でも安全に容易に操作できるシステムを目指している。バネによるバランス状態を基本状態とすることで、人の力を変位として検出する。この研究を発展させて本システムに本質安全制御の考えを適用する。基本構造から再設計を行うことで、実用化可能な装置の開発を目指す。操作性の向上、システム全体の小型軽量化、水平方向の移動付加、3次元での移動実現などが課題である。

#### (3) 本質安全制御に基づくパワーアシスト台車と車いすの開発

上下方向ダイレクトハンドリング装置を台車に適用し、斜面の角度が変わっても同程度の操作力で操作できるパワーアシスト台車を開発する。負荷が変わっても常にばねによって平衡状態を作り出し、人の操作力によって崩れたバランス状態を取り戻そうとすることで移動が生じる。本システムも、これまでの研究により、基本原理の有効性が確認できた段階である。この装置に本質安全制御を適用することで、モータにより直接パワーアシストを行うシステムに比べ、高い安全性を実現する台車を開発する。前進・後退、上昇・下降、傾斜角の変化、摩擦面の変化など、環境変化への対応を調べた後、操作性の向上、システム全体の小型軽量化、安全システムの構築

に取り組む。さらに、システムを車いすにも適用し、本質安全制御の確立を目指す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 本質安全制御の確立

通常の機械システムの操作では、常にシステムの正常性を監視し、正常性が確認できないときは直ちに運転を停止することで安全が確保される。これに対して、本質安全制御は、安全な平衡状態を基本とし、人の手の力により崩れた平衡状態を回復するためにモータが動作する。すなわち、アクチュエータは常に安全状態を取り戻すために動作し、結果として目的制御（アシスト）が実現される。この考え方が、本質安全制御のひとつの実装方法であることを示した。図1にその概念を示す。この原理に基づいたパワーアシストシステム開発を進めた。

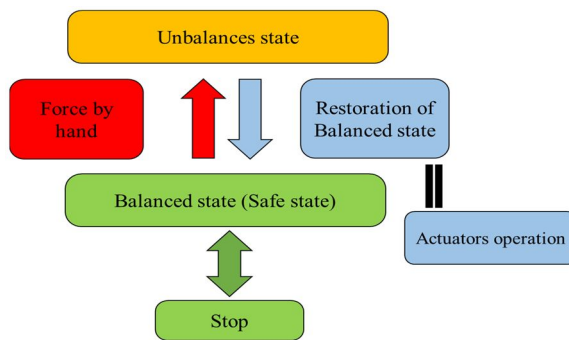


図1 本質安全制御の実装概念

##### (2) パワーアシストシステムの開発

本研究で開発中のパワーアシストシステムは、ばねを用いて重力との平衡状態を作り出し、人の手の力でその平衡状態を崩すことでモータが回転する。MATLABを用いたシステムからArduinoを用いたシステムに移行し、コイルばねの設計に関する検討を行った。ばねの違いによる制御性の差を調べ、閾値の設定などの指針を示し、得られた知見を台車と車いすの開発に生かした。

##### (3) パワーアシスト台車と車いすの開発

台車の構成を図2に示す。上部がダイレクトハンドリング装置、下部が台車の車輪部である。

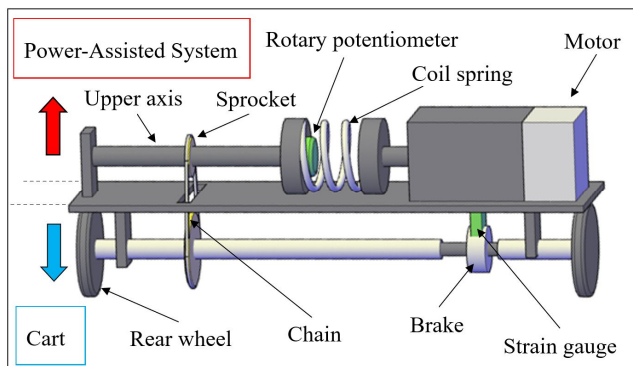


図2 パワーアシスト台車

ベースとなる台車は市販品を利用した。モータの軸にコイルばねを接続し、コイルばねに続く軸にスプロケットを取り付けた。また台車の後輪同士を一つの軸で結合し、スプロケットを取り付けた。そしてスプロケット同士を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ともに、後輪側からの台車荷重の傾斜方向成分をコイルばねに伝達し、コイルばねの復元力により平衡状態を形成する。また、停止、位置保持のために電磁摩擦ブレーキを、ブレーキのトルク計測のためにひずみゲージを、コイルばねの角度変位検出用に回転ポテンシオメータを、台車の移動距離計測用にポテンシオメータを使用した。さらに、台車を押すハンドル部に装着した力センサにより、操作力の検出を行う。これはブレーキのスイッチングの役割を果たし、操作力を検出するとブレーキが解除される。ダイレクトハンドリング装置を適用した台車は、負荷が変わっても常にばねによって平衡状態を作り出し、人の操作力によって崩れたバランス状態を取り戻そうとすることで移動が生じる。モータの交換などを行うことで、これまでの不具合を解消した。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通りである。

基本状態：ブレーキにより台車の後輪を固定する。このときのブレーキにかかるトルクが設定した閾値内に収まるようにモータを回転させる。こうして台車の重力の傾斜方向成分とコイルばねの復元力が釣り合うことで基本状態を生成する。

操作力の入力：ハンドル部の力センサに操作力の入力を行うとブレーキは解除され、コイル

ばねに角度変位が生じ、平衡状態が崩れる。

移動：角度変位が予め設定していた閾値を超え、かつハンドル部に操作力が入力されている間、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。このときのアシスト力はチェーンを介して後輪へと伝達し、台車は操作力方向に移動する。

停止：ハンドル部の力センサから手を離し操作力の入力を止めると、コイルばねの角度変位は閾値内に収まり、モータが停止する。同時にブレーキにより、台車の後輪を固定する。そして再度の基本状態へ戻る。

基本状態：移動の始点と終点と同じ傾斜角の場合は、同様の平衡状態が形成されるため制御シーケンスはで終了となる。傾斜が移動途中で変化する場合は、ブレーキにより固定された状態で、ブレーキにかかるトルクを閾値内に収めるようにモータを回転させ、角度変位を調整する。このように、本システムでは、アクチュエータは、ばねの角度変位が閾値を超えるかどうかでモータのオンオフ制御を行っているだけであり、それにブレーキの操作が加わる。システムのモデルも必要とせず、簡単に制御系を設計できる。屋外での様々な条件での実験により、前進・後退、上昇・下降、傾斜角の変化などに対する有効性を確認した。

さらに、基本システムを市販の介助用車いすへの適用し、設計と試作を行った。基本システムはパワーアシスト台車と同様であるが、デファレンシャルギアを用いて車いすの規格に沿った実験を行った。人を乗せない状態では、登坂実験、回転性能実験、段差乗り越え実験、傾斜停止力実験、斜面直進走行実験において、良好な結果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Minamiyama, S. Katada, Y. Hirai, T. Kiyota, N. Sugimoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Evaluation of Power-Assisted Cart Based on Inherently Safe Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics 2021 (ICM2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 那須智晴, 清田高德, 南山靖博
2. 発表標題 本質安全制御に基づく介助用パワーアシスト車いすの試作と評価
3. 学会等名 第41回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 那須智晴, 南山靖博, 清田高德
2. 発表標題 本質安全制御に基づく介助用パワーアシスト車いすの提案
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 那須智晴, 戸田真鈴, 南山靖博, 清田高德
2. 発表標題 本質安全制御に基づく介助用パワーアシスト車いすの開発
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第75期総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平井勇太, 南山靖博, 清田高德
2. 発表標題 本質安全制御に基づくパワーアシスト台車の小型化
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第75期総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堅田真伍, 清田高德, 平井勇太, 南山靖博, 杉本旭
2. 発表標題 本質安全制御に基づくパワーアシスト台車の傾斜面における動作評価
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樋口侑史, 三浦朋希, 清田高德, 南山靖博
2. 発表標題 本質安全制御に基づくダイレクトハンドリング装置の改良
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堅田真伍, 清田高德, 南山靖博, 杉本旭
2. 発表標題 本質安全制御に基づくパワーアシスト台車の評価
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	南山 靖博  (Minamiyama Yasuhiro)  (20549688)	久留米工業高等専門学校・機械工学科・准教授   (57101)	
研究 分担者	岡田 伸廣  (Okada Nobuhiro)  (80224020)	北九州市立大学・国際環境工学部・教授   (27101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------