

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24680062

研究課題名(和文)安全かつ低消費電力な高機能福祉システムを実現するハイブリッド型運動制御手法の構築

研究課題名(英文)Development of Hybrid-type Motion Control Method for Intelligent Human Assistive System with Safe Function and Low Power Consumption

研究代表者

平田 泰久(Hirata, Yasuhisa)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20323040

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、複数の支援機能を持つ車いすや歩行支援機、ハプティックデバイスなどの人間支援システムを開発した。このような人間支援システムを制御するために、本研究ではDCサーボモータを回生ブレーキとして利用し、そのブレーキ力を制御することで、様々な支援機能が安全に実現できることを示した。また、回生ブレーキを用いることで、ブレーキ制御中の電力をバッテリーに蓄えることを可能とし、一時的に能動的な駆動力を発揮できるシステムを開発した。これにより、上り坂の登坂支援のようなブレーキ制御では実現できない補助的な能動支援も実現することが可能となり、安全かつ低消費電力な高機能人間支援システムを実現した。

研究成果の概要(英文): In this research, we developed assistive systems such as the wheelchair, walker, and haptic device, with multiple functions. For controlling the assistive systems, we mainly used the DC servo motors as the regenerative brake. Based on the braking control, we could realize several assistive functions. This system can also charge the battery during the braking control, and we switches the control mode from braking one to active one in some situations such as climbing upslope. By changing the passive and active control methods appropriately, we realized the intelligent human assistive system with safe function and low power consumption.

研究分野：ロボット工学

キーワード：医療・福祉 福祉ロボット 人間支援 ブレーキ制御

1. 研究開始当初の背景

近年、ロボット技術を用いることで、車いすや歩行器などの福祉機器の高度化を目的とした研究開発や上肢・下肢のリハビリテーションを行う運動支援システム（ハプティックデバイス）の研究開発が盛んに行われている。一般に従来のロボット技術では、福祉機器やハプティックデバイスにサーボモータを取り付け、それらを能動的に駆動することで様々な機能を実現する。高機能を実現するためにサーボモータを用いることは有効であるが、歩行器や車いすなどの移動体においては、長時間駆動のために大きく重いバッテリーを利用することになる。その結果システムの重量増につながり、パワーアシストがないと高齢者や障害者がシステムを動かすことが困難になるという本末転倒な事態が起こり得る。また、高出力モータを用いたシステムでは、システムが何らかの誤動作を起こした場合に人間の意図に反して駆動される恐れがあり、危機回避能力の低下した高齢者や障害者にとっては非常に危険な状況に陥る可能性がある。

そもそも、重度な障害者を対象とした福祉機器を除けば、ほとんどの福祉機器やリハビリテーション機器は、患者自身の操作力で動かすことができるものであり、パワーアシストが必要となる機会は非常に少ない。逆に患者が容易に機器を動かしてしまうことから、適切に操作力を加えることができなかった場合に、段差から落下、速度超過、転倒などの問題が起こっているのが現状である。すなわち、福祉機器やリハビリテーション機器の高度化を行う場合には、駆動も含めた運動制御すべてをサーボモータで行うのではなく、患者が自身の力で機器を動かす、危険な状況においてのみ補助的に機器の運動をアクチュエータで制御するという方が自然である。

従来、我々は人が移動ロボットに加える力を、車輪に取り付けられたブレーキを用いて独立かつ適切に制御する技術を開発した。本研究では、このブレーキ制御技術を福祉機器やリハビリテーション機器に応用することで、システムに多くの機能を実現するとともにシステムに異常があっても能動的に動作することがない本質的な安全な福祉システムの開発を目指す。また、ブレーキ制御を行うユニットとしてサーボモータを回生ブレーキとして用いることを考える。回生ブレーキを用いることで、支援に必要な機能を実現する度にエネルギーが充電されるため、低消費電力と高機能を両立した福祉システムを開発することが可能となる。さらに、上り坂での支援などブレーキのみでは支援不可能な一部の状況でのみ、回生ブレーキによって蓄えられたエネルギーを用いて、モータを能動的に駆動させるブレーキ制御とアクティブ制御を統合したハイブリッド型運動制御手法の構築も目指す。

従来回生ブレーキを用いてエネルギーを

回収・再利用し、低消費電力システムを実現する研究は、鉄道や自動車の分野において数多く行われているが、そのほとんどはモータやエンジンなどで能動的に駆動されているシステムを前提とし、減速させるという単一の機能でのみでエネルギーを回収している。すなわち回生ブレーキを用いた従来システムの制御技術は、「アクティブシステムを基盤としたハイブリッド型運動制御手法」である。

しかし、我々は福祉機器が利用者の操作力で動かされることが前提で、その際に速度超過を防ぐための減速機能だけでなく、障害物・段差回避や重力補償、転倒防止といった多くの機能をブレーキ制御で行うパッシブシステムの実現を目指すものである。さらには、上り坂などの環境で利用者に不足している操作力や関節トルクなどを推定し、不足した身体能力のみを回生ブレーキで蓄えられたエネルギーで能動的に支援する。これは、「パッシブシステムを基盤としたハイブリッド型運動制御技術」であり、従来の回生ブレーキを用いたシステムの研究やアクティブシステムを前提としたロボット研究とは概念が異なる新しい研究分野である。人間の操作力で容易に動かすことができ、かつ安全性や低消費電力が要求される福祉機器においては、すべてにおいてパワーアシストを前提とする必要はなく、必要なときのみ適切な制御を行う「パッシブシステムを基盤としたハイブリッド型運動制御技術」の開発が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、車いすや歩行器をはじめ車輪の種類や数、配置が異なる様々な移動型福祉機器に対応可能なブレーキ制御技術の一般化を行う。また、上肢や下肢のリハビリテーションを実現するハプティックデバイスの開発を行い、ブレーキ制御にて3次元空間での軌道追従機能や力覚提示機能などを実現する安全なリハビリテーション機器の開発を目指す。特に、システムの運動方向に応じて実時間で変化するブレーキ発生可能領域を解析し、支援機能を実現するための最適なブレーキ力の導出を行う従来にない新しいブレーキ制御型安全支援技術の構築を目指す。

また、ブレーキ制御を実現するデバイスとしてサーボモータを利用した回生ブレーキを開発する。回生ブレーキは単にオンオフで制御するのではなく、実現したい機能に応じて適切に目標のブレーキ力を発生するブレーキアンプおよびその制御手法を開発する。同時に、その制御に使われたブレーキ力をエネルギーとして回収することで、高機能と低消費電力を両立するエネルギー回生型運動制御技術を構築する。また、ブレーキ制御のみでは実現できず能動的な支援が要求される状況を環境計測や人間の動作解析に基づ

いて推定する手法を構築し、ブレーキ制御によって蓄えられたエネルギーを用いて補助的な能動支援も実現するハイブリッド型運動制御技術を構築する。

3. 研究の方法

本研究開発では、まず、連続的にブレーキトルクの制御が可能な回生ブレーキユニットを開発し、回生ブレーキユニットを用いた移動型の福祉機器を開発する。また、従来、平面内の移動に限定し特定のアプリケーションやハードウェアに基づいて設計してきたブレーキ制御のための運動制御手法の一般化を行い、3次元空間での支援も想定した様々な用途に適用できるブレーキ制御基盤技術の研究開発を行う。その後、3次元空間で動作が可能なりハビリテーションのためのハプティックデバイスを構築する。また、回生ブレーキユニットの拡張を行い、ブレーキ力の制御だけでなく、回生されたエネルギーを再利用して補助的にサーボモータとしても機能する新しい回生ブレーキユニットを開発し、その制御に基づいた運動制御手法の研究開発を行う。

4. 研究成果

連続的にブレーキ力の制御が可能で、かつブレーキに使われたエネルギーをバッテリーに回収することができる回生ブレーキユニットの開発を行った。特にブレーキデバイスとしてはサーボモータを用いることを考え、そのサーボモータのブレーキ制御を行うモータドライバを開発した。このモータドライバは、Hブリッジ回路を短絡することでモータにブレーキトルクを発生させる。外力によって回転した際に発生する電流をPWMで制御することでブレーキトルクを制御する。これにより、ブレーキ制御状態においては能動動作を行うことが不可能となるため、本質的な安全なシステムとなる。また、回路が短絡されている状況においては、その電流がバッテリーに戻り充電できるようになっている。そのほか、一部の環境で能動制御が必要な場合には、Hブリッジ回路の結線を変更し、バッテリーからの電流に基づきCW回転またはCCW回転の能動トルクを制御する。

本研究では、この回生ブレーキユニットによって制御される図1に示すような足こぎ車いすと呼ばれる新しい車いすをベースとした移動支援システムを開発した。足こぎ車椅子は、下肢不自由者であっても自身の脚を用いて大きなペダリング駆動力を発生させることができることが分かっている。しかし、その駆動力をうまく調節できないことが問題となり、坂道などが存在する屋外での移動の障害になっている。本研究では我々が提案してきたブレーキ制御手法を応用することで回生ブレーキによって多くの機能を実現した。また、上り坂において停止状態から再発進する場合や急な坂道を登坂するといっ

た一部の状況では能動的な駆動力が必要となるため、回生ブレーキ制御において生じた回生エネルギーをバッテリーに充電し、上り坂などの一部の状況においては、能動的な支援を行うように制御モードを切り替える手法を提案した。ただし、例えサーボモータが能動制御されていたとしても、足こぎ車椅子の運動は利用者が加える駆動力に対して受動的な特性を持つように制御系を設計することで、安全性の高いシステムを実現した。



図1 開発した足こぎ型移動支援システム

また、特定の構造をもつ移動ロボットのために設計してきた従来のブレーキを用いた2次元平面運動制御手法の一般化を行い、移動支援型福祉システムの車輪の種類や数、配置に依存しない運動制御手法の構築を行った。具体的には、車輪の種類、数、配置によって変化するブレーキ発生可能領域を解析し、システムの運動状態とそのときのブレーキ発生可能領域の関係から、線形計画問題を解くことにより適切なブレーキ力を導出する手法の構築を行った。これにより図2に示すようなキャスタ型物体搬送システムの開発に成功し、ブレーキ制御されるキャスタの位置を任意に変化させることができ、様々な形状の移動台車に支援機能を持たせることが可能となった。これはキャスタが用いられる福祉システムにも応用可能な技術である。

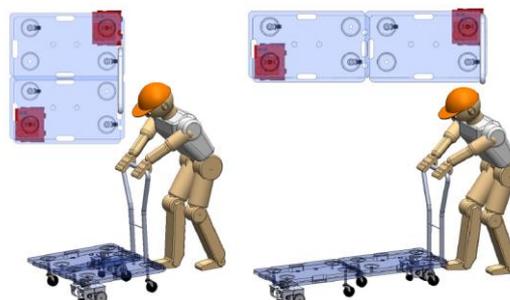
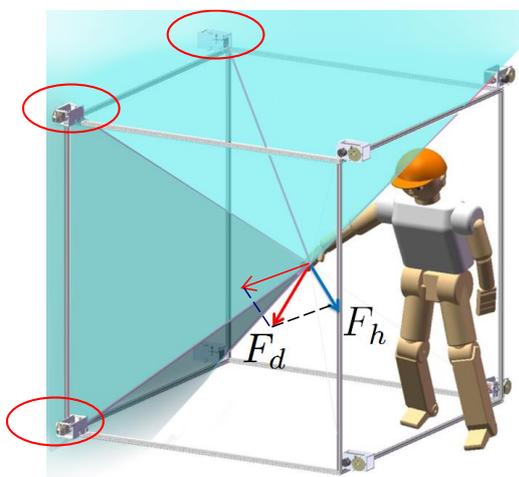


図2 キャスタ型物体搬送システム

その他、2次元平面ブレーキ制御技術を発展させ、3次元空間で運動支援を行うハプテ

ィックデバイスのための3次元空間ブレーキ制御基盤技術の研究開発を行った。特に3次元でのブレーキ発生可能領域の解析は図3に示すように非常に複雑になるが、数値解析手法により適切なブレーキ力を導出する手法



の構築を行った。

図3 ワイヤ型ハプティックデバイスとそのブレーキ制御可能領域

開発してきた回生ブレーキを用いた運動制御手法を適用した移動支援システムやリハビリテーション等に応用可能なハプティックデバイスの有効性を検証する評価実験を行った。実際に回生ブレーキによって制御される歩行支援機を企業との共同開発し、2015年7月より販売を開始した。また、別の企業との共同研究により、回生ブレーキ制御による足こぎ車いすの走行支援システムの商品化に向けた取り組みを進めている。ハプティックデバイスの評価に関しては、操作点を目標経路に追従させる実験を健常者によって行い、その経路追従性を定量的に評価した。これは今後の高齢者や障害者による実験のための安全性の確認や評価項目の検討に大きく貢献した。

そのほか、構築した制御アルゴリズムやそれを適用した人間支援システムの成果は、学術論文誌、国内学会や国際学系で発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① Shinji Suzuki, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Motion Control of Wearable-Type Walking Support System based on the Spring-Mass Model, Advanced Robotics, 査読有, 2015, 1339-1355.
DOI:10.1080/01691864.2015.1090335
- ② Aya Kaisumi, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Investigation of User Load and Evaluation of Power

Assistive Control on Cycling Wheelchair, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 25, No. 6, 2013, 959-965.

URL:https://www.fujipress.jp/jrm/rb/robot002500060959/

- ③ Shinji Suzuki, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Hiroshi Onodera, Motion Support during the Swing Phase using Cooperative Walking Support System, Advanced Robotics, 査読有, Vol. 27, No. 17, 2013, 1337-1349.
DOI:10.1080/01691864.2013.826412
- ④ 平田泰久, 小嶋洋介, 小菅一弘, 複数のパッシブ型移動ロボットと人間との協調による単一物体の搬送, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 49巻3号, 2013, 353-361.
DOI:10.9746/sicetr.49.353
- ⑤ Masao Saida, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Motion Control of Caster-type Passive Mobile Robot with Servo Brakes, Advanced Robotics, 査読有, Vol. 26, No. 2, 2012, 1271-1290.
DOI:10.1080/01691864.2012.689728

〔学会発表〕(計10件)

- ① Yasuhisa Hirata, Shotaro Ando, Kazuhiro Kosuge, Cadence Control of Cycling Wheelchair with Continuously Variable Transmission and Servo Brake, Proceeding of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016年5月18日, ストックホルム(スウェーデン).
- ② Yasuhisa Hirata, Hiroki Yamaya, Kazuhiro Kosuge, Atsushi Koujina, Tomohiro Shirakawa, Takahiro Katayama, Anomaly State Assessing of Human using Walker-type Support System Based on Statistical Analysis, Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2015年9月1日, 神戸国際会議場(神戸).
- ③ Aya Kaisumi, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge Pedaling Assistive Control Method of Cycling Wheelchair for Hemiplegia Patients, Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015年5月29日, シアトル(米国).
- ④ Masao Saida, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Pose Estimation of

Servo-Brake-Controlled Caster Units Arbitrarily Located on a Mobile Base, Proceeding of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014年9月16日, シカゴ (米国).

- ⑤ Shinji Suzuki, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Walking Support by Wearable System based on the Spring-Mass Model, Proceedings of the 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2014年7月30日, ブサンソン (フランス).
- ⑥ Aya Kaisumi, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Assistance Control Method for One-Leg Pedaling Motion of a Cycling Wheelchair, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014年6月4日, 香港 (中国).
- ⑦ Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Eric Monacelli, Power Steering and Force Display Controls for a Cycling Wheelchair Using Servo Brakes, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014年6月4日, 香港 (中国).
- ⑧ Aya Kaisumi, Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Assistive Motion Control of Cycling Wheelchair Based on Investigation of Load on User, Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2013年12月16日, 神戸国際会議場 (神戸).
- ⑨ Yasuhisa Hirata, Kazuhiro Kosuge, Eric Monacelli, Steering Assist System for a Cycling Wheelchair Based on Braking Control, Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013年11月4日, 東京ビックサイト (東京).
- ⑩ Yasuhisa Hirata, Kota Kawamata, Kana Sasaki, Aya Kaisumi, Kazuhiro Kosuge, Eric Monacelli, Regenerative Brake Control of Cycling Wheelchair with Passive Behavior, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013年5月8日, カールスルーエ (ドイツ).

〔図書〕 (計2件)

- ① 平田泰久 他, 技術情報協会, 高齢者・アクティブシニアの本音・ニーズの発掘と製品開発の進め方, 2016, 492.
- ② 平田泰久 他, 技術情報協会, パワーアシスト・ロボットに関する材料, 電子機器, 制御と実用化, その最新技術, 2015, 590.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 泰久 (HIRATA YASUHISA)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20323040