

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820100

研究課題名(和文) 超高繊細な力覚伝達機能を有する遠隔型人・機械協調システムの開発・研究

研究課題名(英文) Research and Development on Human-Machine Cooperative System Based on Remote Control with Vivid Force Transmission

研究代表者

元井 直樹 (Motoi, Naoki)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・講師

研究者番号：10611270

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：

本研究課題では、多種多様な製品生産に適した生産性・安全性を有する遠隔操作型人・機械協調システムにおける基礎要素技術の研究・開発を行うことを目的とし、研究・開発を遂行した。本研究課題において得られた成果としては、主として次の三点が挙げられる。(1)動的に変化する作業環境に柔軟に適応可能な力制御に基づくコンプライアンス制御手法を確立した。(2)遠隔操作型の人・機械協調運動制御手法を確立し、人間動作に基づく位置・力情報を有する教示信号の生成および再現を行った。(3)ハプティクス伝達機能を有する人・機械協調システムの試作を行い、試作機を用いた多機能化に関する研究を実施した。

研究成果の概要(英文)：

This project aimed at the realization of a human-machine cooperative system based on a remote control with vivid force transmission. The research achievements can be summarized as the following points. (1) The force-based compliance control method to adapt to dynamic environment was developed. (2) The motion control method for the human-machine cooperative system based on a remote control with vivid force transmission was developed. In addition, position and force teaching information from human motion is extracted and reproduced. (3) The human-machine cooperative system was prototyped. Then, the researches for the system with multi-functions were conducted by using this prototype.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：モーションコントロール ハプティクス バイラテラル制御 電気機器工学 制御工学

1. 研究開始当初の背景

日本は、現在超高齢社会を迎えている。また、世界的にも高齢社会が到来することが予測されている。このような社会情勢のもと、労働力不足が今後生じることは想像に難しくない。そのため、人間の代替作業を行い、労働力を創出可能なシステムの構築が望まれている。このような観点から、産業システムにおいて産業用ロボットに代表されるような様々な技術開発が行われ、人間の代替作業としての労働力が創出されてきた。事実、多くの産業用ロボットが世界中で稼働しており、生産性向上に大きく貢献をしていることは、疑いのない事実である。

一方で、従来の大量生産を目的とした産業システムではなく、多種多様な製品生産を目指す産業システムの構築が望まれている。多種多様な製品の生産を実現するためには、製品に応じた動作の判断が必須となる。これらの観点から、判断を人が行いつつ、人間動作をアシスト可能な人・機械協調システムの開発研究が国内外の研究機関や大学、企業において行われており、実際に実用化された例も少なくない。

また、製造業における大きな問題の一つとして生産ラインへの巻き込み等による労働災害があげられる。特に、人・機械協調システムのようなシステムの動作可動域内に人間が介在するシステムにおいては、労働災害への危険性の高まりが懸念される。このため、遠隔操作技術を用いた安全な人・機械協調システムの構築が望まれている。

このような背景から、本研究では多種多様な製品生産に適した安全性・生産性を有する革新的生産ライン構築を目指し、「判断」を人が行いつつ、人の「動作」をアシスト可能な超高繊細な力覚伝達機能を有する遠隔操作型人・機械協調システムの開発研究を目的とする。

2. 研究の目的

本研究では、多種多様な製品生産に適した生産性・安全性を有する遠隔操作型人・機械協調システムにおける基礎要素技術の研究・開発を行う。

研究代表者は、これまでの研究経験においてヒューマノイドロボットシステムを用いた人の代替作業の実現を目指し、人支援システムの研究・開発を行っており、自律動作型ヒューマノイドロボットシステムによる未知対象物に対する押し動作タスク実現に成功している。一方で、遠隔操作型ロボットシステムにおける研究においては、操作者が操作するマスタシステムと、遠隔地で動作するスレーブシステムが有する自由度が異なる場合における、異自由度バイラテラル制御システムの運動制御理論を確立した。

本研究課題では、上述の研究経験をもとに、動的に変化する環境に適応し、高い安全性・生産性を有する遠隔操作型人・機械協調シ

テム実現のために、下記3点の目的を達成する。

- (1) 動的に変化する作業環境に柔軟に適応可能な運動制御手法の開発
- (2) 遠隔操作型の人・機械協調運動制御手法の研究
- (3) ハプティクス伝達機能を有する人・機械協調システムの試作と多機能化に関する研究

3. 研究の方法

上述の本研究課題における三つの具体的な開発研究目標に対する研究方法の概要について述べる。

- (1) 動的に変化する作業環境に柔軟に適応可能な運動制御手法の開発

安全性を有するシステムを構築するためには、システムと人/環境との接触状況に柔軟に適応可能な制御器を構築する必要がある。そこで、環境への接触力に着目し、力制御ベース可変コンプライアンス制御器を開発する。また、可変ゲインに基づく制御器のチャタリングを防ぐために、制御ゲインの設計手法および力閾値を有する力制御ベースコンプライアンス制御器を確立する。

- (2) 遠隔操作型の人・機械協調運動制御手法の研究

人間/環境への接触を含むシステムの動作実現のためには、位置・力情報を有する教示信号の抽出が必要である。そのために、バイラテラル制御を用い、人間動作における位置・力情報を抽出し、教示信号を生成する。また、抽出した教示信号の再現において、動作環境が抽出時と異なる場合、抽出した動作の再現が困難となる。そこで、教示信号の実時間修正が可能な遠隔操作型人・機械協調運動制御手法の研究を実施し、動作環境が異なる場合における人間動作の再現を実現する。

- (3) ハプティクス伝達機能を有する人・機械協調システムの試作と多機能化に関する研究

遠隔操作型人・機械協調システムを実現するために、直動型遠隔操作システムの試作を行う。また、試作システムを複数台用い、多機能作業の実現を検討し、操作者の直接動作によるシステムの運動修正が可能な人・機械協調システムを実現する。また、多機能動作の一例として把持・操り動作に対する実験を行い、有効性を確認する。

4. 研究成果

上述の3点の開発研究目標に対して、得られた研究成果について詳述する。

- (1) 動的に変化する作業環境に柔軟に適応可能な運動制御手法の開発

安全性を有するシステムを構築するためには、システムと人/環境との接触状況に柔軟に適応可能な制御器を構築する必要がある。

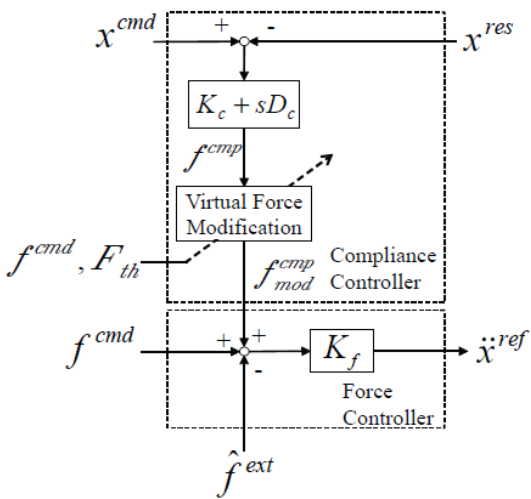


図1 力制御ベースコンプライアンス制御器

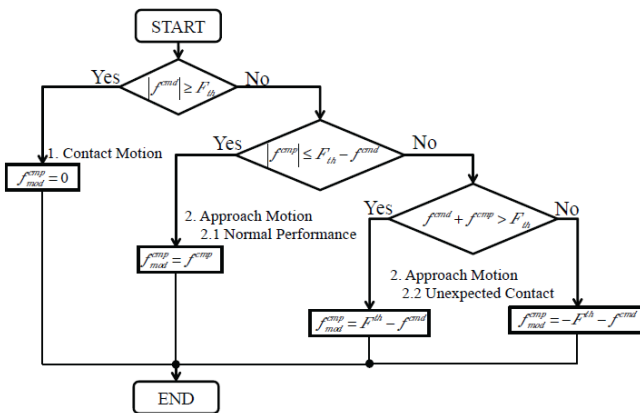


図2 力閾値を用いた運動制御切り替え手法

従来、産業応用ロボットに代表されるロボティクス技術において様々な運動制御手法が研究・開発されているが、その多くが繰り返し動作を主目的とした位置制御ベースの手法である。位置制御ベースの手法においては、高精度な位置追従動作が可能となる。しかしながら、システムが人/環境と接触する際、環境からの反力を外乱として捉えるため、過大な力が生じうる。

そこで、本研究課題では環境への接触力に着目し、力制御ベース可変コンプライアンス制御器を開発した[雑誌論文]。開発した制御器のブロック線図を図1に示す。環境からの反力に基づき可変ゲインを修正することにより、システムと人/環境との接触状況に応じた柔軟な動作が可能となる[学会発表]。具体的には、システムと人/環境が非接触の場合には、所望の位置指令値を追従する。一方で、システムと人/環境が接触している際には、力指令値を追従し、人/環境に対する押し動作制御を実現する。ここで、システムと人/環境との予めせぬ接触が生じた際においても、力制御器への切り替えが行われるため、安全なシステムの構築が可能となる。

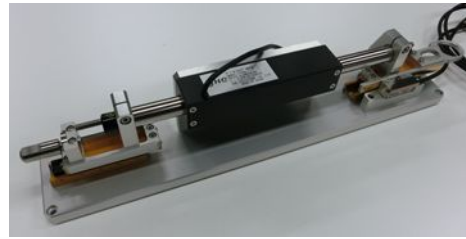
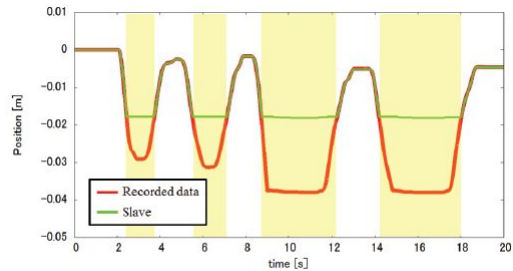
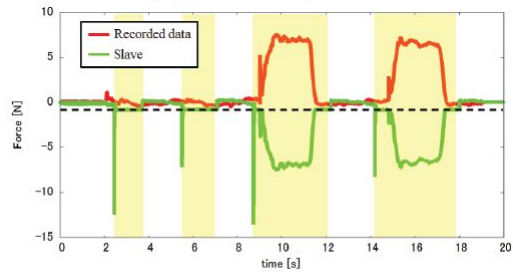


図3 基礎実験システム



(a) position response



(b) force response

図4 実験結果

一方で、可変制御ゲインに基づく運動制御手法においては可変制御ゲインのチャタリングが生じ、適切なシステム動作の障害が生じうる。そこで図2に示すように、力閾値を用いた運動制御器の切り替え手法を開発した[学会発表]。本手法を用いることにより、運動制御器の切り替えに起因するチャタリングを防ぐことが可能となる。また、予めせぬシステムと人/環境との接触においても、予め設定した力閾値以上の力が生じず、安全性の高い運動制御器である。本運動制御器の有効性を確認するために図3に示す基礎実験システムおよびアルミブロックを用いた実験結果を図4に示す。図4における網掛け部分はシステムとアルミブロックとの接触状態を示す。非接触状態における位置指令値への追従、接触状態における力指令値への追従がそれぞれ実現できている。また予めせぬ接触が生じた際においても、力閾値以上の力が生じておらず、安全性の高い動作が実現できている。以上より、開発した運動制御器の有効性が確認できた。

(2) 遠隔操作型の人・機械協調運動制御手法の研究

環境への接触を含むシステムの動作実現のためには、位置・力情報を有する教示信号の抽出が必要である。そこで本研究においては、バイラテラル制御[雑誌論文]を用い、

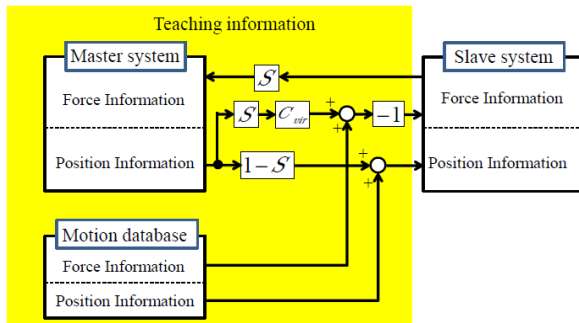


図5 教示信号の実時間修正手法

環境への接触を含む人間動作における位置・力情報の時系列データを抽出し、抽出した時系列データを位置・力情報を有する教示信号として用いる。

また、抽出した位置・力情報を有する教示信号を用いて、人間動作の再現を行う。従来の研究において、情報を抽出した際の動作環境と再現する際の動作環境が異なる場合、所望の人間動作の実現が困難であった。そこで、動作再現時において、(1)により開発した力制御ベース可変コンプライアンス制御器を用いることにより、動作環境の差異に柔軟に対応可能であることを示した[学会発表]。

また、上述の位置・力情報を実時間修正可能な遠隔操作型の人・機械協調システムを開発した[学会発表]。図5に位置・力教示信号の修正手法を示す。人間の意図的な操作がない場合には、予め設定した位置・力教示信号を実現する。一方で、人間の意図的な操作を加えた場合においては、位置・力教示信号の実時間修正が可能である。なお、開発した遠隔操作型人・機械協調システムにおいては、力覚フィードバックを有しており、システムと環境との接触力を操作者が実時間で感じることが可能である。

(3) ハプティクス伝達機能を有する人・機械協調システムの試作と多機能化に関する研究

遠隔操作型人・機械協調システムの有効性を確認するために、直動型遠隔操作システムの試作を実施した(図3)。リニアモータシステムにより構成されており、複数台を同時に用いることにより、多機能動作が可能となる。

多機能動作の一例として把持・操り動作に対する人・機械協調システムの実証を行った。(1)により開発した力閾値を有する力制御ベースコンプライアンス制御器を、各試作システムに実装し、把持・操り実験を行った。図6に実験のスナップショットを示す。人・機械協調動作として、機械による自律的な運動制御と人間のシステムに対する直接動作による運動修正を同時に実現した。また、各システムに実装されている力閾値を有する力制御ベースコンプライアンス制御器における力閾値により、各操り動作におけるプライオリティを実時間修正可能であることを理

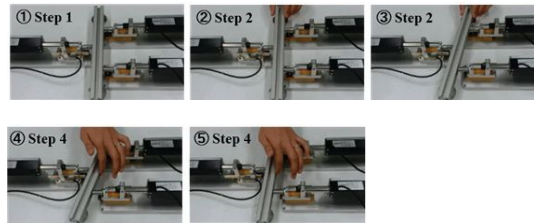


図6 把持・操り動作における人・機械協調システムの実験

論的に解明し、実験により実証した。

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4件)

元井直樹, 下野誠通, 久保亮吾, 河村篤男, “操作性向上のための機能分解による異自由度ロボット間バイラテラル制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 7, pp. 651-658, 2013.

N. Motoi, K. Sasahara, and A. Kawamura, “Switching Control Method for Stable Landing by Legged Robot Based on Zero Moment Point”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 25, No. 5, pp. 831-839, 2013.

N. Motoi, T. Shimono, R. Kubo, and A. Kawamura, “Task Realization by a Force-Based Variable Compliance Controller for Flexible Motion Control Systems”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 2, pp. 1009-1021, 2014.

N. Motoi, Y. Hatta, T. Shimono, and A. Kawamura, “An Estimation Method of Kinematics Relation between Multiple Robots and Their Grasping Tool”, IEEE Journal of Industry Applications, Vol. 3, No. 2, pp. 149-155, 2014.

[学会発表](計4件)

N. Motoi, T. Shimono, R. Kubo, and A. Kawamura, “Design Method of Variable Compliance Gain for Force-based Compliance Controller”, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1-6, 27th-31th March, 2014, Taipei, Taiwan.

元井直樹, 下野誠通, 河村篤男, “力制御ベース可変コンプライアンス制御器に基づく人間動作再現手法に関する一考察”, 平成25年電気学会産業計測/メカトロニクス制御合同研究会, 2014年3月10日-11日, 芝浦工業大学(東京都港区).

元井直樹, 久保亮吾, 下野誠通, “人・機械協調システムによる位置・力情報を有

する教示信号の実時間修正手法”,平成
26年電気学会産業応用部門大会,2014
年8月26日-28日,東京電機大学(東京
都足立区).

元井直樹,久保亮吾,下野誠通,“異なる
動作環境における人動作再現のための
力閾値を用いたカベースコンプライア
ンス制御器”,平成26年電気学会メカ
トロニクス制御研究会,2014年10月11
日,横浜国立大学(神奈川県保土ヶ谷
区).

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/gmsc-motlab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

元井 直樹 (MOTOI NAOKI)
神戸大学・海事科学研究科・講師
研究者番号: 10611270

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし