

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25年 3月31日現在

機関番号：12701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860023

研究課題名（和文） 遠隔・自律融合人支援システムの開発・研究

研究課題名（英文） Research and Development on Fusion System of Remote Control and Autonomous Control for Realization of Human Support System

研究代表者

元井 直樹 (MOTOI NAOKI)

横浜国立大学・工学研究院・研究教員

研究者番号：10611270

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、人間の代替作業を実現する人支援システム構築のために様々なタスクを実現可能にする遠隔・自律融合人支援システムの開発・研究を行うことを目的とし、研究・開発を遂行した。本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) 道具を用いたタスク実現のための運動制御手法および内界センサと外界センサのセンサフィージョンによる未知道具のパラメータ推定手法を確立した。(2) 遠隔・自律融合システムにおける機能分離に基づく異自由度ロボット間バイラテラル制御器設計論を確立した。(3) 対象物とシステムとの接触状況に柔軟に対応可能な力ベース可変コンプライアンス制御手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：

This project aimed at the realization of human support system by using the fusion controller of remote control and autonomous control. The research achievements can be summarized as the following points. (1) The control method for the task by using the tool is developed and the kinetic parameters between the robotic system and the tool are estimated by using the internal sensors and external sensors. (2) The bilateral control with functional decomposition for master and slave with different degrees of freedom is developed. (3) A force-based variable compliance controller is proposed to archive flexible motion due to the contact condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

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、制御工学

1. 研究開始当初の背景

少子高齢社会により今後、労働力が著しく不足することが懸念されている。また災害時における危険な場所において、人の代替作業を実現するロボットが急務の問題である。このように人の代わりに労働力として、環境に適応しタスクを実現する人支援システムの実現が望まれている。このような背景のもと、現在までに多くの研究機関や、様々な企業において労働力の創造を目指したロボット技術の研究・開発が盛んに行われている。これらの研究・開発の多くは自律型ロボットシステムを用いた特定タスクの実現に注視されている。自律型ロボットシステムは人の介在が不要であるため、労働力の創造という観点においては非常に有益な手法である。しかしながら、自律型ロボットは事前に環境・タスクを既定し動作を行う。そのため家庭内や災害時といった時々刻々と変化する環境においては、環境変化に対応できず、所望タスクを実現することが困難である。

一方で、人の操作によりタスクを実現しようとする遠隔操作型ロボットシステムの開発も進められている。遠隔操作型ロボットシステムを用いることにより、人がシステム内に介在し、環境変化に対する柔軟な対応が可能となる。遠隔操作技術に関しては、特に位置情報のみならず、操作者が操作するうえで重要となる触覚情報の通信を目指した遠隔操作技術に関する研究が国内外の多くの研究機関において活発に行われている。これらの研究の多くは医療用ロボットや宇宙用ロボットなどの特定のアプリケーションを対象とした研究である。また遠隔操作型ロボットシステムの多くは、操作用ロボット（マスタシステム）および遠隔動作ロボット（スレーブシステム）が同構造を有している。そのため複雑なタスクを実現するためには、人の操作も複雑となり、操作者の熟練・経験が必要となる。つまり、タスクの複雑さが増すにつれ、操作量が爆発的に増大する。

このような背景から、時々刻々と変化する環境下において、環境に適応しつつ、容易に所望タスクを実現可能な人支援システムの実現が熱望されている。

2. 研究の目的

本研究では、遠隔・自律融合人支援システムの実現を目指し、異自由度ロボットシステム間遠隔操作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

知対象物に対する所望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、1自由度鉗子型システムを用いて、大きさの異なるシステム間における鮮明な力覚を有する遠隔操作技術を実現している。

本研究課題では、上述の研究経験をもとに時々刻々と変化する環境に適応しつつ、所望タスクを実現可能な人支援システムの実現を目指す。ここで環境変化への適応には、人の判断を用いる。一方で、操作者の操作量低減を目指し、遠隔・自律融合システムを構築する。以上より、本研究では人の代替作業を実現する遠隔・自律融合人支援システム構築のために、下記3点の目的を達成する。

- (1) 道具を用いた複雑なタスクを実現する運動制御技術の開発
- (2) マスタ・スレーブ間の構造・自由度の差を吸収する階層化制御器設計理論の確立
- (3) 接触状況に応じて柔軟に対応可能なフレキシブル制御手法の開発

3. 研究の方法

上述の本課題における三つの具体的な開発研究目標毎に、研究方法の概要について述べる。

- (1) 道具を用いた複雑なタスクを実現する運動制御技術の開発

人支援システムを構築するためには、システムが実現可能なタスク数を拡充することが必須である。そこでシステムの実現可能タスク数増大のために、道具を用いたタスク実現手法の研究・開発を行う。まず、運動学的パラメータが既知の道具を用いて、人支援システムによる所望タスク実現のための運動制御手法の開発を行う。その後、運動学的パラメータが未知の道具を用いた所望タスクを実現するために、内界センサと外界センサのセンサフュージョン理論の確立を行う。

- (2) マスタ・スレーブ間の構造・自由度の差を吸収する階層化制御器設計理論の確立

マスタシステムへの操作者の少ない操作量のみで、スレーブシステムにおける複雑なタスクを実現するための制御器設計理論の研究を行う。まず、タスク実現機能と環境適応機能の2機能に動作を分離した階層化制御器理論の確立を行い、最もシンプルなタスクの一例である様々な形状を有する対象物に対する押し動作タスクの実現を目指す。その後、複雑なタスクの一例である未知形状対象物に対する把持・操りタスクの実現を目指す。

- (3) 接触状況に応じて柔軟に対応可能なフレキシブル制御手法の開発

複数のタスクを順次実現していくために

は、システムと対象物との接触状況に応じたフレキシブルな制御器を構成する必要がある。そこで環境への接触力に着目した力ベースのコンプライアンス制御器を開発する。また、典型タスクの一例である対象物へのアプローチ動作およびアプローチ後の押し動作タスクを提案した制御器を用いて行い、提案制御器の評価を実施する。

4. 研究成果

上述の3点の開発研究目標に対して次の3点の研究成果が得られた。

- ・ 道具を用いたタスク実現のための運動制御手法および内界センサと外界センサのセンサフィージョンによる未知道具のパラメータ推定手法の確立
- ・ 遠隔・自律融合システムにおける機能分離に基づく異自由度ロボット間バイラテラル制御器設計理論の確立
- ・ 対象物とシステムとの接触状況に柔軟に対応可能な力ベース可変コンプライアンス制御手法の確立

それぞれの開発研究目標の観点より、得られた研究成果について詳述する。

(1) 道具を用いた複雑なタスクを実現する運動制御技術の開発

道具を用いたタスク実現のための運動制御手法として運動学的パラメータが既知の道具を自由に操作するための道具座標系に基づく運動制御手法を提案した。ここでは一例として、システムが把持した道具を用いた様々な所望軌道追従手法について報告した[学会発表文献③]。

また、運動学的パラメータが未知の道具に対する運動学的パラメータ推定手法を提案した。ここでは、内界センサと外界センサのセンサフィージョンによりパラメータ推定を実施した。具体的には図1に示す実験システムを用いた。ここで、外界センサとして視覚センサをまた内界センサとしては各リニ

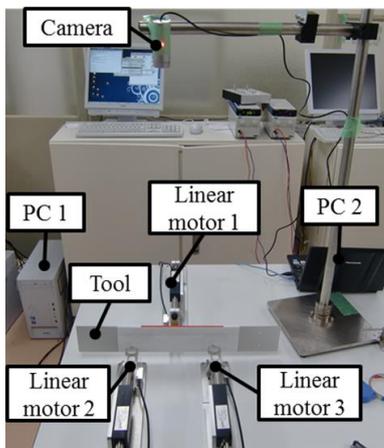


図1 運動学的パラメータ推定実験システム

アモータに実装されているエンコーダ情報を用いた。結果、各モータと道具との相対関係を実時間で推定し、道具の運動制御に反映することが可能となった[学会発表文献⑤]。

以上より、道具を用いたタスク実現のための運動制御手法および内界センサと外界センサのセンサフィージョンによる未知道具のパラメータ推定手法を確立した。

(2) マスタ・スレーブ間の構造・自由度の差を吸収する階層化制御器設計理論の確立

操作者のマスタシステムへの少ない操作量のみで、スレーブシステムにおける複雑なタスクを実現するための制御器設計理論の研究を行った。ここでは、操作者の操作量低減を目指すため図2に示すようにスレーブシステムの構成リニアモータの台数をマスタシステムの構成リニアモータの台数より多くした。ここでは、1台のマスタ側リニアモータを用いて複数台のスレーブ側リニアモータを制御した。

図3に1台のマスタ側リニアモータと3台のスレーブ側リニアモータを用いた際の異自由度ロボット間バイラテラル制御手法を示す。対象物からの位置・力情報をもとに

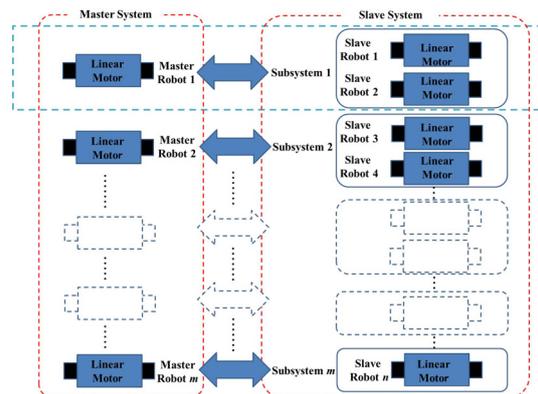


図2 マスタ/スレーブシステムの関係

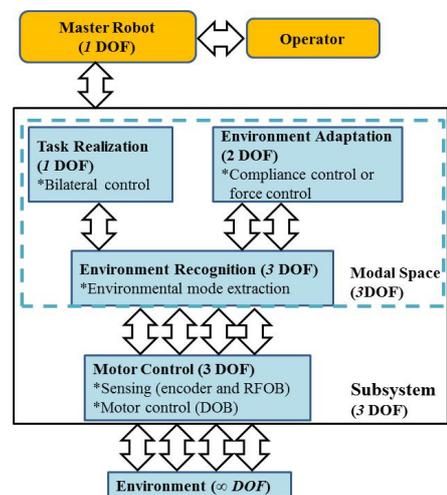
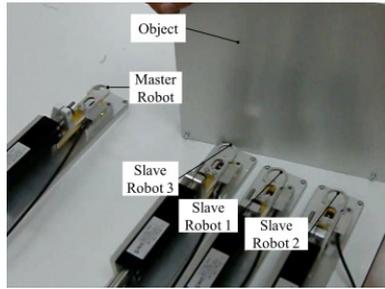
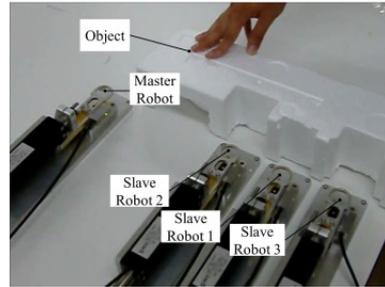


図3 異自由度ロボット間バイラテラル制御



(a) 斜めに設置された対象物



(b) 凸凹形状を有する対象物

図4 未知形状対象物に対する押し動作

環境適応機能およびタスク実現機能へと分離を行う。ここで、環境適応機能は自律制御で行い、タスク実現制御はマスタシステムからの位置・力指令値に基づいて行う。結果、マスタシステムへの操作者の少ない操作のみで、スレーブシステムにおいて環境適応およびタスク実現という2機能を同時に実現することが可能となる。

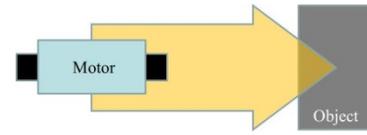
提案手法を用いて、図4に示す様々な形状を有する対象物に対する押し動作実験を行った[学会発表文献②]。また、より複雑なタスク実現のために、提案手法を複数のシステムに実装し、未知形状の対象物に対する把持・操りタスクを行った[学会発表文献⑦]。

以上より、遠隔・自律融合システムにおける機能分離に基づく異自由度ロボット間バイラテラル制御器設計論の確立を実現した。

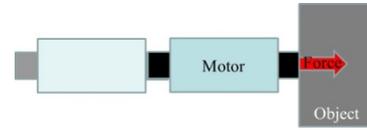
(3) 接触状況に応じて柔軟に対応可能なフレキシブル制御手法の開発

システムと対象物との接触状況に応じた複数のタスクを順次実現していくため、接触状況に応じたフレキシブルな力制御器ベースの変換コンプライアンス制御手法の開発を行った。ここでは、図5に示すように1台のリニアモータを用いて、対象物に対するアプローチタスクおよび接触後の押し動作タスクに対する動作確認を行った。

図6に本提案手法である力制御器ベースの変換コンプライアンス制御手法と従来の制御器を用いた場合の実験結果を示す。本稿には記載していないが従来法、制御法ともアプローチ動作に対しては精度よくタスク実現

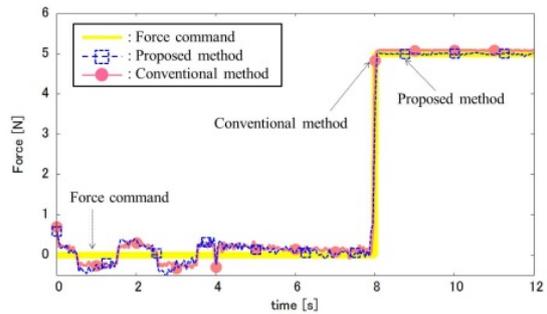


(a) アプローチタスク

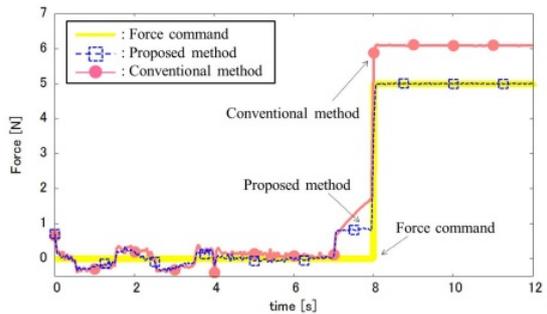


(b) 押し動作タスク

図5 接触状況に応じたタスクの遷移



(a) 位置指令値誤差なし



(b) 位置指令値誤差あり

図6 提案手法と従来手法の比較(力応答値)

ができた。接触後の押し動作タスクに着目した場合、図6(a)に示すように位置指令値誤差がない場合においては、所望の押し動作タスクが従来法、提案法ともに実現できている。しかしながら、図6(b)に示すように位置指令値誤差がある場合においては、従来法においては位置指令値偏差の影響を受け、所望の押し動作タスクが実現できない。一方で、提案法においては力制御器ベースの制御手法となっているため、接触状況に応じて柔軟な制御器修正が行われ所望の押し動作制御が実現できていることが分かる[学会発表文献④]。

以上より、対象物とシステムとの接触状況に応じて柔軟に修正可能な力ベース変換コンプライアンス制御手法が確立された。また、その効果について実証した。

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)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 元井直樹, 八田禎之, 下野誠通, 河村篤男, “画像情報を用いた道具座標系に基づくタスク実現のための一制御手法”, 2012 年産業計測制御研究会優秀論文発表会, 2013 年 1 月 8 日, 芝浦工業大学.
- ② 元井直樹, 下野誠通, 久保亮吾, 河村篤男, “多自由度スレーブシステムと少自由度マスタシステム間における異自由度バイラテラル制御実現のための一手法”, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, AC2E3-3, 2012 年 9 月 18 日, 札幌コンベンションセンター.
- ③ 元井直樹, 黄塚森, 河村篤男, “快適未来社会を育むモーションテクノロジーの創生 – 滑りを用いた二足歩行ロボットの運動制御”, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, AC1L2-2, 2012 年 9 月 17 日, 札幌コンベンションセンター.
- ④ N. Motoi, T. Shimono, R. Kubo, and A. Kawamura, “Force-based Variable Compliance Control Method for Bilateral System with Different Degrees of Freedom,” Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 1-6, 26th March, 2012, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.
- ⑤ 元井直樹, 八田禎之, 下野誠通, 河村篤男, “画像情報を用いた道具座標系に基づくタスク実現のための一制御手法”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-12-148, pp. 89-94, 2012 年 3 月 7 日, 横浜国立大学.
- ⑥ N. Motoi, T. Shimono, and A. Kawamura, “Task Realization Method Based on Modal Space Considering Tool Kinematics,” Proceedings of the 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 295-300, 8th November, 2011, Melbourne, Australia.
- ⑦ 黄塚森, 笹原健太, 剣持拓哉, 元井直樹, 河村篤男, “快適未来社会を育むモーションテクノロジーの創生 – ヒューマンライク・モーション実現のための制御”, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 3C3-2, 2011 年 9 月 9 日, 芝浦工業大学.
- ⑧ 元井直樹, 久保亮吾, 下野誠通, 河村篤男, “接触環境への自立適応機能を有

する異自由度バイラテラル制御”, 平成 23 年度電気学会産業応用部門大会, No. 2-105, pp. II-807 - II-812, 2011 年 9 月 8 日, 琉球大学.

[その他]

受賞: 2 件

- ① 産業計測制御技術委員会優秀論文賞, 2013 年 1 月 8 日 (受賞者: 元井直樹)
- ② 電気学会優秀論文発表賞, 2013 年 3 月 31 日 (受賞者: 元井直樹)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

元井 直樹 (MOTOI NAOKI)
横浜国立大学・工学研究院・研究教員
研究者番号: 10611270

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし