

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 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760197

研究課題名（和文） 作業動特性帯域の可変制御に基づく人間－機械協調系の力学的相互作用の実現

研究課題名（英文） Variable Dynamic Range Control Based on Object Inherent Dynamics in Human-Robot Cooperative Interaction System

研究代表者

積際 徹 (TSUMUGIWA TORU)

同志社大学・生命医科学部・准教授

研究者番号：90362912

研究成果の概要（和文）：

本研究では、人間とロボットの力学的な相互作用環境において、直感的な協調作業を実現するマン・マシンインターフェースとロボットの運動制御法を提案し、その有効性の検証を行った。具体的には、作業対象物が持つ固有の動特性である **inherent dynamics** と、従来制御法のインピーダンス制御（アドミタンス制御）との可変制御を実現する機械デバイスを開発し、両制御間での切替え制御が可能であることを実験的に示した。

研究成果の概要（英文）：

This paper presents development of a mechanical man-machine interface to stabilize robot motion control system in a human-robot dynamic interaction. The proposed interface provides a human operator with a hybrid control mode which is composed of an impedance control (an admittance control) and an inherent dynamics interaction. The control system combines the two control strategies into a single hybrid control strategy. To confirm the performance of the proposed system, a dynamic interaction experiment involving a human operator is carried out. Experimental results show that the proposed system is effective for controlling the motion of the robot in the human-robot cooperative interaction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボット、人間－ロボット協調系、インターフェース、制御

1. 研究開始当初の背景

人間とロボットの力学的相互作用（力学的協調作業）のように、両者が共に協同して作

業を行う協調作業系では、両者間に生じる力学情報に基づいた相互作用を実現するロボットの運動制御法「インピーダンス制御」がロボットの運動制御法として重要な役割を

果たしてきた。

しかし、ロボットのダイナミクスとして付与されるインピーダンス特性が“仮想的な動特性”として作用するため、次の問題が生じていた。

- (i) ロボットと高剛性環境の接触時に制御システムの不安定問題が生じる。(インピーダンス制御の接触安定問題)
- (ii) 作業対象物が持つ固有の動特性(以下、inherent dynamics と定義)とインピーダンス特性が乖離していることから、相互作用中の運動を人間が直感的に理解できない。

これらの原因として、インピーダンス特性が (i) “動特性のローパスフィルタ”として作用し、帯域整形(狭帯・低帯域化)が行われることが挙げられ、(ii) 作業性・操作性に加えて安定性にも悪影響を及ぼしていた。

そこで動特性の帯域整形を行わず、対象物の inherent dynamics を運動規範とする運動制御概念(inherent dynamics interaction と定義)が筆者らにより提案され、上述の問題について本質的な解決を図った。しかし、提案制御法では、動特性の帯域整形がなされないため、慣性負荷を軽減する機能(パワーアシスト機能:インピーダンス制御では実現可能であった)の提供ができなくなっていた。

このように研究開始当初は、(a) インピーダンス制御によりもたらされるパワーアシスト機能と(b) inherent dynamics に基づく直感的な制御に関わる条件が二律背反となっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人間とロボットの力学的相互作用において、(a) インピーダンス制御のパワーアシスト機能と(b)対象物の inherent dynamics を運動規範とする運動制御概念(inherent dynamics interaction と定義)の融合もしくは切り替えを目指し、安定的かつ直感的な相互作用を融合する画期的なロボット制御システムならびにロボットの運動制御法を開発することである。

運動制御法の切り替えにより、協調作業における動特性帯域の可変制御が実現され、人間にとって最適な動特性下での作業が可能になる。また、従来の制御法における種々の問題も解決される。

提案システムならびに制御概念は、従来制

御法では困難であったシステムの安定性と操作性の同時実現を可能にする、全く新しいロボットの運動制御法となる。

3. 研究の方法

各研究期間中(2010年度~2011年度)の研究スケジュールは下記の通りである。

- [I] 動特性帯域の可変制御を実現するマン・マシンインターフェースの開発(2010/4~2011/3)
- [II] 上記マン・マシンインターフェースを用いたロボット制御法の構築(2011/1~2011/10)
- [III] 動特性帯域の可変制御の効果に対する検証(2011/4~2012/3)

また、研究方法の詳細を下記に示す。

2010年度(平成22年度)

[A] マン・マシンインターフェースの製作(目的[I]に対応)

作業対象物(あるいは人間)とロボットの間に配置し、両者の動特性を分離・結合することのできるインターフェースの設計・製作を行う。両者間の間に摺動性を持つインターフェースを配置することで、両者の動特性を機構的に分離し(図1)、inherent dynamics interaction を実現することが可能になる。インピーダンス制御のように仮想的・能動的な受動動特性を持たせるのではなく、仮想ホイールモデルによる摺動特性により、純粋な“受動動特性”が実現できる。

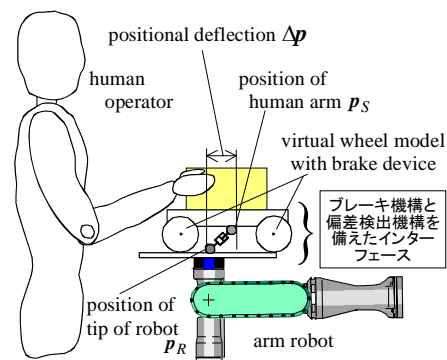


Fig.1 Human-robot interaction using proposed man-machine interface

インターフェースは図2に示すように、リンク機構により構築を行う。各リンクは受動ジョイントにより接続され、人間が触れる位置において上述の受動動特性を持つように

構成される。また、受動ジョイント部にブレーキ機構を設けることにより、ブレーキ力による摩擦特性を利用して、作業対象物とロボットの動特性を結合できるように設計を行う。これにより作業対象物とロボットの動特性どうしの干涉化、あるいは非干涉化の調整が実現できる。

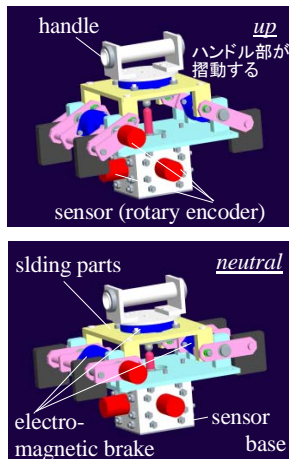


Fig.2 Overview of proposed man-machine interface prototype

提案機構により、両者の動特性を結合（干涉化）させる（インピーダンス制御と等価）、あるいは、分離（非干涉化）するにより、inherent dynamics に基づく制御を行い、inherent dynamics interaction を具現化する。

[B] マン・マシンインターフェースの性能評価（目的[I] に対応）

製作したインターフェースの性能仕様を明らかにするため、各種入力に対する応答性を確認し、目標への追従性能などの調査を行う。また、ブレーキ機構による動特性の干涉化、非干涉化の性能評価も行い、制御法の切り替えが実現できるように調整作業を実施する。加えてブレーキ力が線形的に加えられるよう、ブレーキ力制御で用いる校正曲線を求める実験を行う。

[C] 動特性帯域の可変制御を実現する運動制御法の構築（目的[II]、[III] に対応）

前項にて明らかになったインターフェースの性能仕様をもとに、ロボットの運動制御法の構築を行う。

本研究においては、2 種類の制御方法（インピーダンス制御、inherent dynamics interaction）を切り替えながらロボットの運動制御を具現化する必要があることから、制御則においてそれぞれの制御入力を融合しな

ければならない。

そこでインピーダンス制御では外力 F_H を制御入力、inherent dynamics interaction ではインターフェースで検出される相対距離 Δp （図 1 参照）にもとづいて $K_V \Delta p$ を制御入力とする。そして、係数 α によって、それぞれの制御法の重み付けを行い、次式によってロボットの運動を実現する。

$$M_R \ddot{p}_R + D_R \dot{p}_R + K_R \Delta p_R = (1 - \alpha) F_H + \alpha K_V \Delta p$$

（ M_R, D_R, K_R はインピーダンス特性、 p_R はロボットの手先位置、 K_V はゲイン）

また、係数 α の大きさに基づいてブレーキ力の制御を行い、両制御法の切り替えを行う。

2011 年度（平成 23 年度）

[D] 動特性帯域の可変制御を用いた協調作業実験（目的[II]、[III] に対応）

開発したインターフェースならびに提案制御法の有効性を確認するため、人間とロボットの力学的な相互作用環境下における協調作業実験を行う。本研究では、精密な丸棒を穴に挿入するはめあい作業（peg-insertion task）および書字動作を対象とする。

また、書字動作では脳機能診断を利用した検証を行う。光トポグラフィ装置を用いて、作業者の脳血流変化を調べ、高次脳機能の賦活状態を解析する。この検証によって、提案したシステムが、人間にとって直感的な相互作用・協調作業を提供できているかどうかの確認を行うことが可能になる。

[E] 研究の総括

本研究によって得られる成果は、従来のインピーダンス制御に関して議論されてきた種々の問題を解決する可能性を秘めている。実験より得られたデータについての検討・考察を行い、提案するロボット制御システムならびに運動制御法が「ヒトに対してどのような影響を及ぼすのか」についての検証を行う。

4. 研究成果

本研究で製作を行ったマン・マシンインターフェースを図 3 に示す。研究方法に示したように、本インターフェースはリンク機構によりされ、人間が操作する先端位置において、受動動作が実現できるように設計されている。

そして受動ジョイント部、摺動部に設置した電磁ブレーキから発生される力によって動きに対する抵抗が発生し、インターフェース先端位置の動特性とロボットの動特性を結合することが可能となった。

これにより、人間の操作部における動特性を可変させることができ、インピーダンス制御や inherent dynamics interaction を選択的に実現でき、両制御法が切り替え可能であることを実験的に確認した。

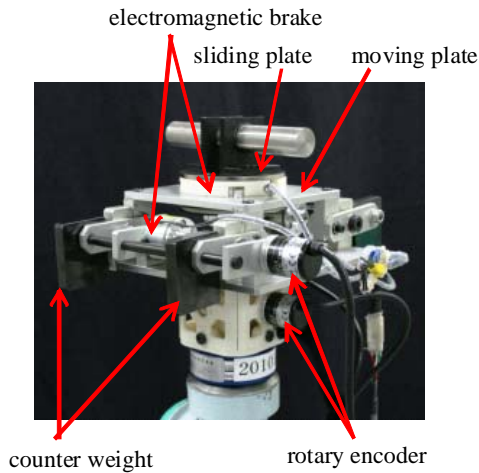


Fig.3 Overview of proposed man-machine interface

次に提案システムを用いて、人間とロボットが協調しながら精密な丸棒を穴に挿入するはめあい作業実験 (peg-insertion task) および書字動作実験を行った。

図4に示すはめあい作業実験では、peg 部品と hole 部品が接触するまではインピーダンス制御によってロボットの運動制御を行い、両部品が接触した直後に α を切り替える

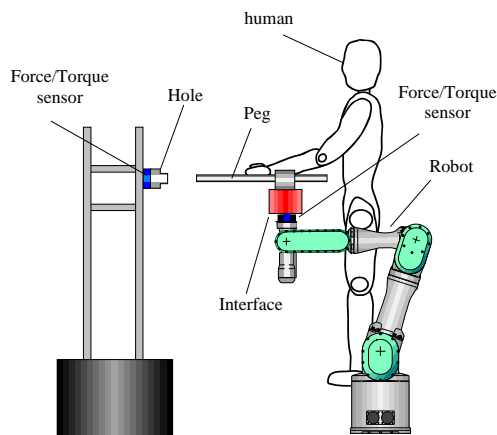


Fig.4 Experiment of human-robot cooperative peg-insertion task

ことで、inherent dynamics interaction を実現し作業を継続する。図5に示す実験結果 (α の時間変化と制御入力、挿入方向の力の大きさ) より、制御モードを切り替えることでシステムが安定のまま、精密なはめあいを伴う挿入作業が完了していることが分かる。また、丸棒を抜く作業も安定下で遂行しており、加えて、制御法を再び切り替えることが可能であることを示している (α が再び 0 となり、インピーダンス制御に切り替わっている)。

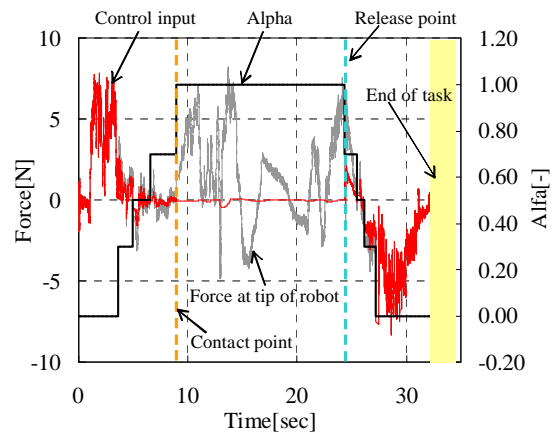


Fig.5 Experimental result of peg-insertion task

書字動作実験については、位置検出範囲が広がった新しいタイプのインターフェースを用いて実験を実施した。実験システムを図6に示す。被験者はロボット手先に設置されたインターフェースの上に取り付けられたペンを持ち、壁に線を描く。本実験では2種の制御条件 (Case1、Case2) を準備した。

Case1 : inherent dynamics interaction (位置偏差情報による入力のみでの制御 ($\alpha=1$)) を行い、人間とロボットの動特性の干渉はゼロとする。

Case2 : 壁に垂直な方向の運動制御は inherent dynamics interaction による制御 ($\alpha=1$) を行い、壁に平行な方向はインピーダンス制御 (力覚情報による入力のみでの制御 ($\alpha=0$)) による運動制御を行う。

被験者は、直線を書き続ける書字動作を30秒間行い、その後30秒の休憩時間を取る。これを3回連続で行う。被験者は実験への参加に同意が得られた5人 (22~24歳の男性健常者) である。

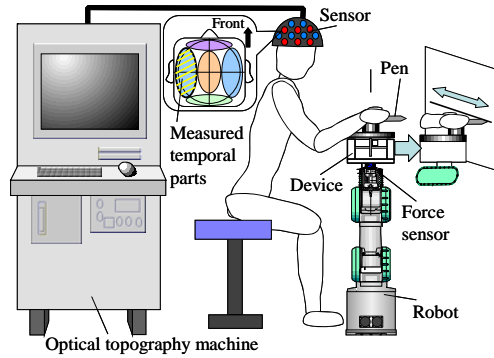


Fig.6 Experiment of human-robot cooperative writing task

分析はチャンネルごとの酸化ヘモグロビン濃度について計測したものに加算平均処理を行う。これらの結果に有意差が生じているかを検証するために5%の有意水準でt検定を行う。

図7に各条件における脳の賦活状態についての検定結果を示す。(a) Case1、(b) Case2共に左図が1回目、右図が2回目の実験結果を示す。今回の実験では被験者全員が右手でデバイスを操作し、主に運動野と感覚野に注目するため、左側頭部の賦活状況を図示している(赤色領域が賦活領域を表す)。

図7より、Case1の1回目と2回目の実験結果を比較すると、2回目の黒で囲まれた範囲の賦活状態が1回目よりも小さく、有意な差が生じていた。また、Case2の場合では、1回目と2回目では有意な差は検出できなかった。これは、Case2の制御法

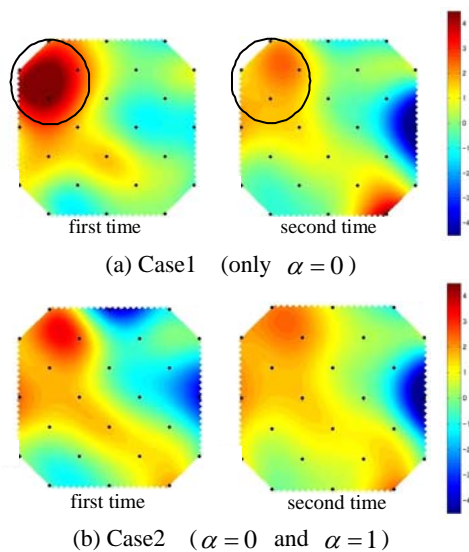


Fig.7 Experimental result of topographic mapping of human brain during the writing task

で実現されるロボットの運動制御が、人間書字動作に近い運動であると推測でき、人間の慣れを必要とせず、初めから同じように操作できるということを示唆していると考えられる。さらに、被験者全員が Case2の方が字を書き易かったと述べている。

以上より、Case2の制御法では、高剛性の壁に垂直な方向に対して人とロボット間の力学的協調関係を切り離し、システムを安定状態下におくことで、自然に字を書くことができたと考えられる。よって、検証を実施した書字動作限定ではあるが、提案デバイス及び制御システムは効果的であるといえる。

本研究では、対象物とロボットの動特性が互いに一致する状態(coupled dynamics)から、非干渉化する状態(uncoupled dynamics)までの制御を実現し、実験的な検証を行った。また、inherent dynamics interactionを用いて、技能の発現が必要な精密なはめあい作業や書字動作への適用が可能になることも示した。

本研究で提案を行い、具現化した制御概念は、作業者の持つ技能を最大限発揮できるパワーアシストシステムや、人間と力学的な協調作業を行うロボットシステムの確立に貢献し、インピーダンス制御に代わり得る新しい制御法となる可能性を秘めていると確信する。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

1. 谷口 嘉則、積際 徹、横川 隆一、3-DOF パラレルメカニズムを有する力覚提示装置の開発、日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011、pp. 2A1-B10、2011/05/28、岡山コンベンションセンター (岡山市)
2. 井上 亮、積際 徹、横川 隆一、人間-ロボット協調作業系におけるマンマシンインターフェースの開発、日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011、pp. 2A1-B09、2011/05/28、岡山コンベンションセンター (岡山市)
3. 中村 祐介、積際 徹、横川 隆一、生体情報を用いたパワーアシストシステムの操作性評価、日本機械学会 関西支部 第 86 期定時総会講演会、pp. no.8-24、2011/03/20、京都工芸繊維大学松ヶ崎キ

キャンパス（京都市）

4. 渡部 祐樹、積際 徹、横川 隆一、力伝達調節機構を有するマンマシンインターフェースの評価、第 28 回 日本ロボット学会学術講演会、pp. 3J1-5、2010/09/24、名古屋工業大学（名古屋市）
5. 山田 輔、積際 徹、横川 隆一、上肢運動の補助を行うパワーアシストロボットの開発、第 28 回 日本ロボット学会学術講演会、pp. 3J3-1、2010/09/24、名古屋工業大学（名古屋市）
6. 今井 園子、積際 徹、横川 隆一、機能性外装を有する上肢運動補助ロボットの制御法、第 28 回 日本ロボット学会学術講演会、pp. 3J3-5、2010/09/24、名古屋工業大学（名古屋市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

積際 徹 (TSUMUGIWA TORU)

同志社大学・生命医科学部・准教授

研究者番号：90362912