

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560312

研究課題名(和文)人間とロボットの力学的協調作業に伴う動特性帯域を滑らかに調整する機械的可変機構

研究課題名(英文)Development of mechanical regulator to adjust gradual transition of dynamical interaction between human operator and robot

研究代表者

積 徹 (Tsumugiwa, Toru)

同志社大学・生命医科学部・准教授

研究者番号：90362912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

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相互作用下において、(i)人間およびロボットが有するそれぞれの動特性の干渉状態を滑らかに可変制御する機械インターフェースを開発し、干渉状態の遷移制御を実現したうえで、(ii)提案制御下で実施される協調作業に関する定量評価手法の提案を行った。研究成果として、(i)開発した動特性可変制御インターフェースを用いることで動特性の干渉状態を滑らかに遷移できることを実験的に確認し、(ii)人間とロボットの協調作業を定量的に評価できる解析手法を提案することができた。これらの研究成果については、学会や国際会議での発表ならびに原著論文の掲載にて公開を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a mechanical device to regulate gradually the magnitude of interference of the dynamic characteristic of a human operator and a robot under the human-robot cooperative task. The experimental results show that the proposed mechanical device enables a gradual transition of interference of the dynamical interaction between the human operator and the robot. To investigate the effectiveness of the proposed control strategy, a quantitative analysis method for evaluating the human-robot cooperative task is developed. The results of this study are published in the internal/international conferences and journals of the mechanical engineering and the robotics.

研究分野：ロボット工学、制御工学、機械工学

キーワード：ロボット 人間 - 機械協調系 ロボットの運動制御 マンマシンインターフェース

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下における協調作業では、人間-ロボット間に生じる力学情報に基づいてロボットの運動を制御する「インピーダンス制御」が重要な役割を果たしてきた[1-2]。

しかし、ロボットの運動特性として付与されるインピーダンス特性が原因となり、次の問題が生じていた。

- (i) 高剛性環境との接触時に制御システムの不安定問題が生じる。(接触安定問題 [3-4])
- (ii) 作業対象物の動特性とロボットに付与したインピーダンス特性が大きく異なることから、協調作業が直感的にできない。

これらの問題は協調作業の作業性・操作性だけでなく、安定性にも悪影響を及ぼしていた。そこで人間とロボットが持つそれぞれの動特性を干渉制御することで問題解決を図る新たな制御戦略が提案されたものの、干渉状態は二値の切替制御に止まっていた。

このように研究開始当初においては、人間とロボットが有するそれぞれの動特性に関わる干渉制御は、干渉状態あるいは非干渉状態の二値制御に限定されており、両状態の遷移を滑らかに制御するという概念は提案されていなかった。

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下において、(i) 人間およびロボットが有するそれぞれの動特性の干渉状態を滑らかに可変制御する機械インターフェースを開発し、干渉状態の遷移制御を実現したうえで、(ii) 提案制御下で実施される協調作業に関する定量評価手法の提案を行うことである。

従来研究では、上述したような制御戦略については提案・実現されておらず、その効果や評価方法も明らかになっていないことから、本研究を通して提案概念を具現化し、実験から得られた知見・成果を明らかにする意義はきわめて大きい。

3. 研究の方法

本研究では、次の研究計画に従って研究を遂行した。

- (1) 干渉状態の連続的な可変制御を実現する機械インターフェースの開発 (2012年4月～2013年3月)
 動特性の可変制御を実現する機械インターフェースを開発し、人間とロボットの

動特性を機械的に結合・分離することで干渉状態の可変制御を実現する。ブレーキ機構によって発生させる摩擦力の調整制御によって提案概念を具現化する。

- (2) 機械インターフェースならびにロボットの制御法構築と実装 (2012年10～2014年10月)

機械インターフェースとロボットの運動制御法に関する検討を行いつつ、制御系の安定解析に基づいて、提案制御法の妥当性についての検証を実施する。

- (3) 提案制御法の効果に対する検証 (2013年4月～2015年1月)

提案概念の有効性を確認するため、実験データの客観的・定量的な解析を実現する手法の検討を行う。統計的概念に基づくデータ解析法の構築ならびに光トポグラフィ装置(fNIRS)を用いた高次脳機能の賦活状態に関する解析法の提案を行い、得られた実験データに対する検証を行う。

- (4) 研究の総括 (2015年1月～3月)

本研究によって得られた研究成果を国内外に広く公表するため、国内・海外雑誌へ論文投稿を行う。最終年度以降に成果の公開を行うことで本研究の総括とする。

4. 研究成果

本研究で実機製作した機械インターフェースを図1に示す。

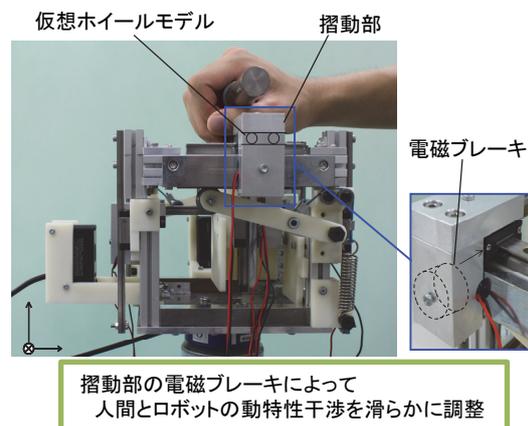


図1 干渉状態の連続的な可変制御を実現する機械インターフェース

ロボットの手先位置に機械インターフェースを設置し、人間とロボットが持つそれぞれの動特性の干渉具合を調整することができる。直交3方向に摺動するよう自由度を配置し、その摺動特性を電磁ブレーキで発生させるブレーキ力によって調整することで、動特性の干渉制御が実現される。

機械インターフェースの運動制御法の構築を行うために動作実験を行い、指令値と出力となる伝達結合力の校正関係を求めた。結果を図2に示す。

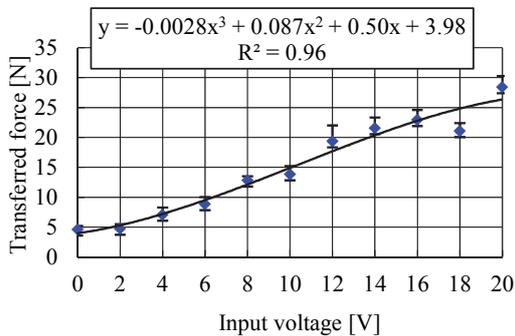


図2 機械インターフェースの運動制御に関わる指令電圧(V)と伝達結合力(N)の校正曲線 (プロットデータ上側のエラーバーは標準偏差(S.D.)を示す)

実験的に得られた校正曲線に基づく可変制御を行うことで、滑らかな状態遷移を伴う干渉制御が実現され、提案概念の具現化を図ることができた。図2に示すように各データの標準偏差(SD)を示すエラーバーが小さいことから、制御性能のばらつきは小さいことが分かる。

次に、従来研究で用いられていたインピーダンス制御との比較実験に関する結果を図3に示す。赤線が提案概念に基づく制御により得られた力データの実際値であり、青線は従来のインピーダンス制御を用いて同様の運動を行った際に計測された力である。両実験とも、ほぼ同じ運動(動作軌跡)が計測されたことを確認している。

図3(a)の干渉制御状態における実験は、従来のインピーダンス制御と同様の結果となり、得られた実験データもほぼ同じ傾向となっている。図3(b)の半干渉制御状態では、従来のインピーダンス制御よりも検出される力データが小さくなっており、人間とロボットの干渉具合が調整されていることが分かる。また、図3(c)の非干渉制御状態では、両データの傾向が大きく異なり、提案概念に基づく制御法では0Nに近い値が計測されている。これは人間とロボットの干渉が失われていることを示し、図3(a)から(c)に至るまでの状態遷移によって、干渉具合の可変制御が実現できることを明らかにした。

図4には、干渉状態の違いによって被験者の脳血流変化に生じる差異を検出するために実施した検証実験の結果を示す。実験では、

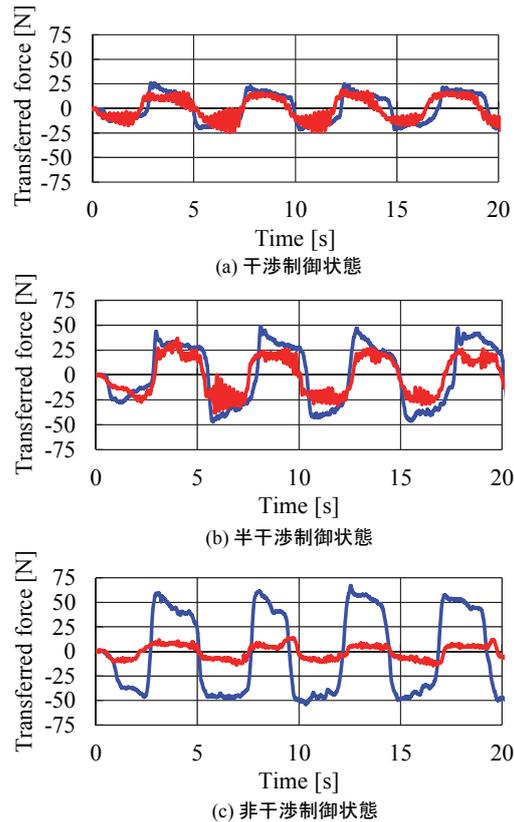


図3 人間とロボットの干渉状態の遷移状態
機械インターフェースの運動制御に関わる伝達結合力の変化(赤線:運動に伴う力データ、青線:従来のインピーダンス制御を用いて同様の運動を行った際の力データ)

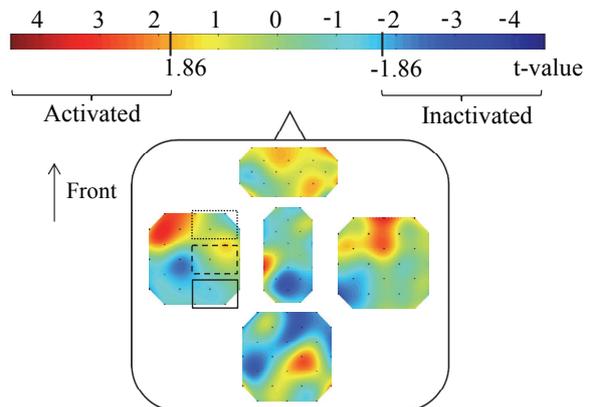


図4 人間とロボットの干渉状態の差異に対する高次脳機能の賦活度合いの違い(赤色部は脳血流変化に有意差が認められ、賦活していることを示す)

干渉状態と半干渉状態のそれぞれを模擬した運動を被験者が行い、試行中の高次脳機能の賦活度合いを計測したうえで両試行間に有意差が認められるかどうかの検定を行った。

実験結果から、運動に関わる領域について、

前運動野 (Premotor area) と一次運動野 (Primary motor area) 付近で賦活の違いが発現した。本実験試行では、人間の手先に加わる力がほぼ 0N である運動と、数 N 程度の力がかかる運動を対象として比較しており、僅かな力の差であっても、高次脳機能の賦活度合いの変化についての検証が可能であることが分かった。計測された脳血流変化の違いは小さいものの、本研究において開発した fNIRS を用いた解析手法を用いることにより、干渉状態の差異を脳機能の賦活度合いに基づいて検出できることが示唆された。

このように、定量的に得ることのできる生体情報から人間の運動を検証することができれば、従来は主観に頼って調整していたロボットの運動制御パラメータを定量評価に基づいて決定することが可能になると考えられる。「ヒト」の運動に関わる高次脳機能の働きを定量評価する手法の提案には高い有用性があり、本研究を通して得られた研究成果・知見の意義はきわめて大きいといえる。

<引用文献>

- [1] 小菅一弘, 仮想ツールダイナミクスに基づく人とロボットの協調作業, 計測と制御, Vol.34, No.4, 1995, pp.303-306.
- [2] R. Ikeura, H. Inooka, Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995, pp.3097-3102.
- [3] N. Hogan, On the stability of manipulators performing contact tasks, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.6, 1988, pp.677-686.
- [4] D.A. Lawrence, Impedance Control Stability Properties in Common Implementations, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, pp.1185-1190.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

1. 衣川 卓志, 森川 翔太, 積際 徹, 横川 隆一, 装着型力覚提示装置の可動範囲の拡大を実現する可変制御機構の開発 (可変制御機構の設計開発と力覚提示状態の評価), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.80, No.817, 2014.
DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0265
2. 森川 翔太, 積際 徹, 横川 隆一, 装着型力覚提示装置の可動範囲の拡大を実現する可変制御機構の開発 (可動範囲の広域化に対応した力覚提示手法の提案と評価), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.80, No.816, 2014.
DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0234
3. Toru Tsumugiwa, Yasuhiro Fukui, Ryuichi Yokogawa, Compliance measurement for the Mitsubishi PA-10 robot, Advanced Robotics, 査読有, Volume 28, Issue 14, 2014. pp. 919-928.
DOI:10.1080/01691864.2014.899159
4. 木下 敦之, 積際 徹, 横川 隆一, 人間とロボットの協調作業系における作業動特性の干渉制御を実現する動特性調節器の開発および評価, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol.79, No.808, 2013, pp.4705-4720.
5. 岡田 昌也, 積際 徹, 横川 隆一, 垂直多関節型マニピュレータ PA-10 の手先コンプライアンス特性のモデル設計に関する一考察, 設計工学会, 査読有, Vol.48, No.11, 2013, pp.514-522.
6. 森多 隼也, 積際 徹, 横川 隆一, 被歩行補助者の位置変位検出に基づく杖型歩行支援ロボットの運動制御法の開発, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol.79, No.806, 2013, pp.3584-3596.
7. 岡本 健太郎, 積際 徹, 横川 隆一, 人とロボットの協調位置決め作業における人の運動習熟に関する一考察, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol.79, No.803, 2013, pp.2394-2407.
8. 入野 功輔, 積際 徹, 横川 隆一, 拘束空間におけるインピーダンス制御の安定化を実現する動特性調節器の設計・開発, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol.79, No.802, 2013, pp.2048-2061.

[学会発表] (計 19 件)

1. Yusuke Soga, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, The Motion Control of Adjustment Mechanism of Transferred Force Rates for Human-Robot Cooperative Tasks, SICE Annual Conference 2014, pp.995-998, 2014/9/11, Hokkaido University, Sapporo (Japan).
2. Ryo Ikuta, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Investigation for Motor Skill of Operators During Human-Robot Cooperative Work, SICE Annual Conference 2014, pp.706-709, 2014/9/10, Hokkaido University, Sapporo (Japan).

3. 横溝 秀一, 積際 徹, 横川 隆一, 人間とロボットの協調作業における力伝達量調節機構の設計, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会(SSI2013), pp.767-768, 2013/10/20, ピアザ淡海 (大津市) .
4. 生田 涼, 積際 徹, 横川 隆一, 人とロボットの協調作業における操作者の運動スキルに関する一考察, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会(SSI2013), pp.765-766, 2013/10/20, ピアザ淡海 (大津市) .
5. Takashi Kinugawa, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Development of Wearable Haptic Device Using Variable Structure Control for End Effector of Haptic Device, SICE Annual Conference 2013, pp.279-281, 2013/9/17, Nagoya University, Nagoya (Japan).
6. Katsuhiko Nishizawa, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Development of the Walking-Support Robot Equipped with Force Detecting System, SICE Annual Conference 2013, pp.2696-2698, 2013/9/14, Nagoya University, Nagoya (Japan).
7. 竹内 良樹, 積際 徹, 横川 隆一, 位置決め作業に対する補助力を付加した作業の操作性評価, 第 55 回 自動制御連合講演会, pp.1437-1438, 2012/11/18, 京都大学吉田キャンパス (京都市) .
8. 岡本 健太郎, 積際 徹, 横川 隆一, 位置決め作業支援が人とロボットの協調作業に及ぼす影響, 第 55 回 自動制御連合講演会, pp.1418-1419, 2012/11/18, 京都大学吉田キャンパス (京都市) .
9. 積際 徹, 入野 功輔, 木下 敦之, 横川 隆一, 人間とロボットの力学的相互作用における動特性帯域の可変制御を実現するデバイスの開発, 第 30 回 日本ロボット学会 学術講演会 , page no. RSJ2012AC4C3-6, 2012/09/20, 札幌コンベンションセンター (札幌市) .
10. 入野 功輔, 積際 徹, 横川 隆一, 拘束空間におけるインピーダンス制御の安定化を実現するデバイスの設計・開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, page no.1A2-V08(1)-(4), 2012/5/28, アクトシティ浜松 (浜松市) .
11. 木下 敦之, 積際 徹, 横川 隆一, 拘束空間におけるインピーダンス制御の安定化を実現するデバイスの開発及び評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012,

page no.1A2-V07(1)-(4), 2012/5/28, アクトシティ浜松 (浜松市) .

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