

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760180

研究課題名（和文）

人間－ロボット協調作業系において固有動特性を運動規範とする力学的相互作用の実現

研究課題名（英文）

Object Inherent Dynamics Based Motion Control in Human-Robot Cooperative Task System

研究代表者

積 際 徹 (TSUMUGIWA Toru)

同志社大学 生命医科学部 医工学科・専任講師

研究者番号：90362912

研究成果の概要：

本研究では、人間とロボットの力学的な協調作業を実現する新しいタイプのロボット制御法を提案し、その有効性の検証を行った。人間とロボットの運動に伴う動特性を非干渉化・独立化しつつ、人間の運動にロボットが追従するように制御を行う、全く新しい概念に基づく inherent dynamics interaction を実現した。提案制御法の有効性を確認するため、従来制御法では実現困難だった精密な組立作業 (peg insertion task) を行い、提案制御法によって直感的、かつ、安定条件下で遂行可能であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	270,000	2,670,000

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

人間とロボットが力学的に協調しながら共に作業を行う協調作業系では、両者間に発生す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が必要であった。従来研究では、ロボットの力制御法の一つであるインピーダンス制御（アドミッタンス制御）が広く利用され、非常に重要な役割を果たしてきた。

しかしながら、インピーダンス制御は、あらかじめ決められたインピーダンス特性を、ロボットの“仮想的な”動特性として設定する運動制御法であったことから、次のような問題が生じていた（図1、2参照）。

(i) インピーダンス制御ではロボットと対象物が直接的に剛に接続されることから、対象物とロボットの動特性が“仮想的な”動特性（インピーダンス特性）に支配され、対象物が本来有する固有の動特性（以降、inherent dynamics と記述）と乖離が生じ、対象物の運動を人間が直感的に理解できない。

(ii) インピーダンス制御が有する接触安定性の問題から、拘束空間における作業ではシステムが不安定になりやすく、人間や外部環境に対して危険を及ぼしていた。

これらの問題を回避するには、対象物が有する inherent dynamics を規範とする相互作用を実現し、かつ、安定的なロボットの運動制御を行う必要がある。（インピーダンス制御

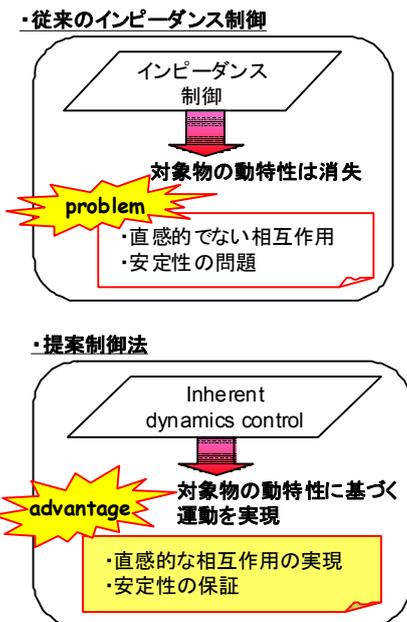


Fig.1 Concept of inherent dynamics interaction

において、これらは相反条件であった)

研究開始当初には、上述の問題を解決・改善する制御法として、[i]可変インピーダンス制御、[ii]スキルアシスト、[iii]Proxy-Based Sliding Mode Controlなどが考案されていた。[i]、[ii]では、ロボットに設定するインピーダンス特性の可変制御を行い、外部環境や作業状態に適応する制御を実現していた。[iii]では運搬対象物の位置決め作業および低速度域での動特性（主として操作性）の改善が図られ、ロボットに過大な力が加わった際の安全性確保も可能になると報告されていた。

しかしながら、いずれの研究も仮想的な動特性（インピーダンス特性）が対象物とロボットに設定されるため、対象物固有の動特性（inherent dynamics）との大きな乖離が生じ、上述の問題に対する本質的な解法にはなっていないかった。

このように研究開始当初においては、人間

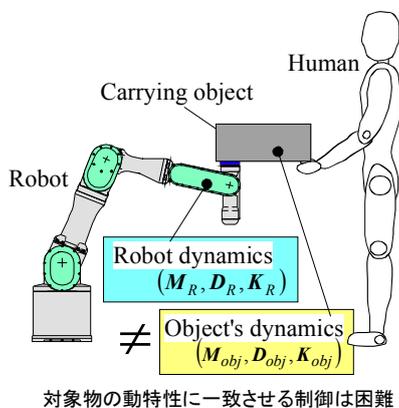


Fig.2 Human-robot cooperative task using impedance control

とロボットの力学的な相互作用を実現するロボットの運動制御法（主としてインピーダンス制御、アドミタンス制御）に種々の問題があり、直感的かつ安定な相互作用を実現することが困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、前章に述べた問題を解決する“ロボットの新しい運動制御法の実現”を目的とし、従来制御法では解決が困難であった「協調作業における直感性の向上」と「ロボットの安定制御」の相反する条件を両立させる制御手法の考案を目指した。

具体的には、人間とロボットの力学的な相互作用を実現する協調作業において、ロボットの運動制御に関わる動特性と作業対象物の動特性の間で生じる相互干渉を低減し、作業対象物が本来有する動特性を運動規範とした相互作用（inherent dynamics interaction）を実現する制御法と制御システムの考案ならびに構築が目的である。

ロボットの動作における動特性（従来はインピーダンス特性）と、作業対象物が持つ対象物固有の動特性（inherent dynamics）を分離、非干渉化する制御法を構築することにより、従来の問題に対して本質的な解決が行われると予想される。そして、人間とロボットによる協調作業実験を行い、「協調作業における直感性の向上」と「ロボットの安定制御」を同時に満足するかを検証し、本研究において提案する inherent dynamics interaction についての知見を明らかにする。

人間とロボットの力学的な相互作用において、inherent dynamics interaction という新たな概念によって従来の諸問題の解決を試みる手法が本研究の特色であり、独創的な点である。また、inherent dynamics interaction の有効性、実用性が明らかになれば、人間とロボットの相互作用に関わる研究の新基軸となり得る可能性がある。

3. 研究の方法

研究目的を実現するため、本研究では、まず、(1) 作業対象物が本来有する動特性を運動規範とした相互作用 inherent dynamics interaction について理論的に明らかにする。次に、(2) 機構的に実現するマン・マシンインターフェースの開発を行い、(3) インターフェース自身を広範囲の運動に追従させるために必要となるロボットの運動制御法の提案を行う。最後に、(4) 提案した制御法の有効性を確認する実験を行い、inherent dynamics interaction に関する様々な知見を明らかにする。

本研究では、人間とロボットの協調作業系において、全く新しい概念となる inherent dynamics interaction を実現し、それらに関わ

る知見を明らかにするために、下記項目に従って研究を遂行する。

(1) 作業対象物が持つ固有の動特性に基づく相互作用 (inherent dynamics interaction)

① 人間とロボットの協調作業系における inherent dynamics interaction の実現法

人間とロボットが協調しつつ作業を行う協調作業系において、人間がその作業を直感的に感じるためには、作業対象物が持つ固有の動特性に基づく相互作用を実現する必要がある。

inherent dynamics interaction を実現するアイデアとして、人間とロボットの間提案するインターフェースを配置し、対象物の動特性とロボットの動特性の非干渉化を図ることを行う。これによって、ロボットの動特性と対象物・外部環境の動特性が切り離されるため、それぞれの動特性に基づく運動が実現できる。これにより、人間にとって直感的な相互作用が可能になるだけでなく、制御システムの安定性を確保することができる。

② ロボットと作業対象物の動特性

本研究で想定する人間とロボットの相互作用形態において、それぞれの動特性について関数表現を行うと、次のように表される。

(i) インピーダンス制御時のロボットの動特性

$$Robot\ dynamics = f(M_R, D_R, K_R)$$

(ii) インピーダンス制御時の作業対象物の動特性

$$Object\ dynamics = f(M_{Obj}, D_{Obj}, K_{Obj})$$

(iii) inherent dynamics interaction 実現時の作業対象物の動特性

$$Object\ dynamics = f(M_{Obj}, D_{Obj}, K_{Obj}, F_{friction})$$

M_R 、 D_R 、 K_R はインピーダンス制御における慣性、粘性、剛性のパラメータを表す。 M_{Obj} 、 D_{Obj} 、 K_{Obj} は作業対象物が持つ動特性を表し、 $F_{friction}$ は作業対象物とロボットの間で生じる摩擦力である。

この摩擦力の影響によって、ロボットの動特性と作業対象物が持つ動特性の間に若干の干渉が生じるが、協調作業には大きな影響を及ぼさないと仮定する。

インピーダンス制御を用いた協調作業では、作業対象物がロボットに把持されるため、両者の運動は同一の動特性 (インピーダンス特性) によって規定されることが分かる (Case (i)、(ii)、図3(a)参照)。このため、作業者は作業対象物の運動を直感的に捉えることが難しく、作業性、操作性に悪影響を及ぼしていた。

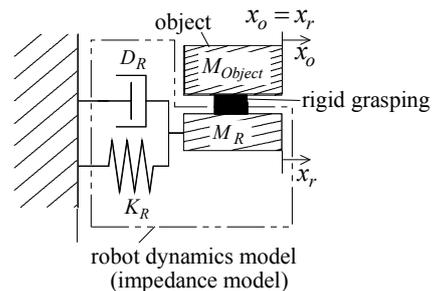
本研究で提案する制御システムでは、作業対象物とロボットの間滑らかに摺動する機構を配置し、互いの動特性の相互干渉を低減している (Case (iii)、図 3(b)参照)。作業者は図 2 に示すように対象物を把持して運動 (作業) を行うため、作業対象物および検出装置の動特性 (摺動部で生じる摩擦抵抗力 $F_{friction}$ を含む) を直接的に知覚できるようになる。

このように作業対象物とロボットの動特性の互いの影響が低減できれば、人間と作業対象物の間だけに力学的な相互作用が発生することから、作業者は作業対象物が持つ動特性そのものを直感的に理解できるようになると考えられる (inherent dynamics interaction の発現)。

なお、作業対象物とロボットの間には、両者の相対運動 (相対位置) を検出する位置センサが設置され、作業対象物の動きにロボットが追従するよう、互いの位置偏差をゼロにするロボットの運動制御が行われる (次節以降参照)。

(2) 人間とロボットの動特性の非干渉化を実現するインターフェースの開発

提案するインターフェースはロボットの

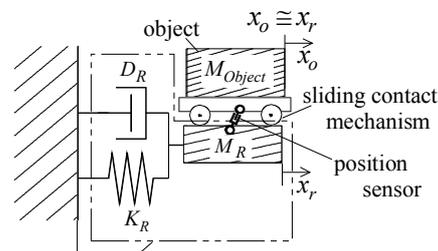


$$\begin{cases} Object\ dynamics = f(M_{Obj}, D_{Obj}, K_{Obj}) \\ Robot\ dynamics = f(M_R, D_R, K_R) \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

$$Object\ dynamics = Robot\ dynamics$$

(a) Impedance control model



$$\begin{cases} Object\ dynamics = f(M_{Obj}, D_{Obj}, K_{Obj}, F_{friction}) \\ Robot\ dynamics = f(M_R, D_R, K_R) \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

$$Object\ dynamics \neq Robot\ dynamics$$

(b) Inherent dynamics based control model

Fig.3 Dynamics models of impedance control and inherent dynamics based motion control

手先に配置され、作業対象物とロボットの間に滑らかに摺動する機構を設置することで、互いの動特性の相互干渉を低減する。これにより、対象物の動特性とロボットの動特性の非干渉化を図ることができる（図3(b)参照）。また、作業対象物は検出装置上の位置 p_S に配置され、図4に示す機構によって xyz 軸方向への並進運動が実現できるようになっている。

同時に、作業対象物—ロボット間に生じる相対運動に関する位置情報 p_{SR} を検出することが可能であり、本制御システムでは、この相対運動情報をロボットの運動制御に利用する（次節参照）。

実際、図3(b)に示すように、人間とロボットの相互作用に伴い、両者間には相対的な位置偏差 p_{SR} が生じる。 p_{SR} は、検出装置内部の角度センサで得られる角度と、検出装置の幾何学条件より次のように算出できる。

$$p_{SR} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_S \tan \theta_1 \\ l_S \tan \theta_2 \\ l_H \sin \theta_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、ロボットの先端位置 p_R から角度センサまでの距離 l_S は l_R と比較して十分短いとする。また、検出可能な p_{SR} の範囲は、検出装置の可動範囲の制約から、ある一定値内に制限される。

(3)inherent dynamics interaction におけるロボットの運動制御法

inherent dynamics interaction が実現されると、作業対象物の運動とロボットの運動は独立することになる。しかし、両者が協調して

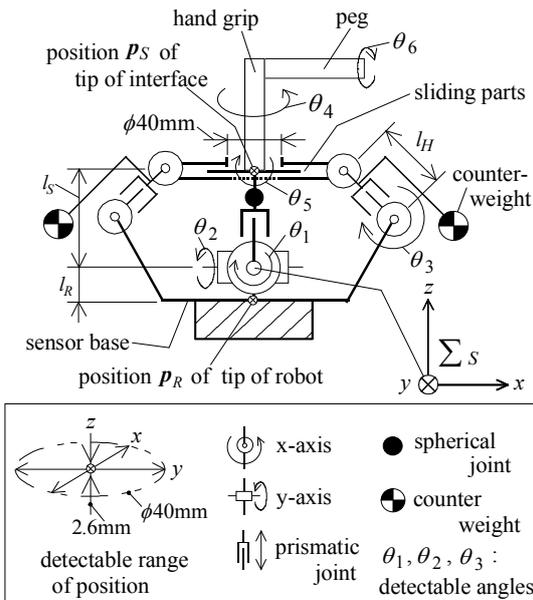


Fig.4 Joint model of 3-D position-detecting interface with rotary encoders

作業を行うためには、ロボットが作業対象物の動きに追従しなければならない。

本研究では、相互作用に伴って生じる位置偏差 p_{SR} を、ロボットの制御入力として利用し、作業対象物の運動にロボットの先端位置 p_R が追従するよう、ロボットの運動制御を行う（図5参照）。

$$M_R \ddot{p}_R + D_R \dot{p}_R = K_V p_{SR} \quad (2)$$

ここで、 M_R 、 D_R はインピーダンス特性における慣性係数、粘性係数を表す。 p_R はロボットの先端位置を表し、 \dot{p}_R 、 \ddot{p}_R は p_R の速度、加速度を表す。 K_V は位置偏差 p_{SR} に関わるゲインである。

上式により、ロボットの先端位置 p_R と検出装置の先端位置 p_S の間に位置偏差 p_{SR} が生じると、ゲイン K_V との積によって制御入力が発生する。式(2)に基づいて、 p_R と p_S の位置偏差が小さくなるように（ただし機構上の位置偏差は除く）、ロボットの運動制御が行われる。

このように、ロボットの運動と独立した状態で作業対象物（検出装置の摺動部）の運動が実現されることから、ロボットと作業対象物の動特性が互いに及ぼしあう影響は低減される。これによって作業対象物が持つ固有の動特性とほぼ同一の動特性に従う運動が可能になり、協調作業において操作性や直感性が向上すると考えられる。

(4)inherent dynamics interaction の効果に対する検証

①実験および考察

実験では、作業遂行のための技巧やスキルの発現を必要とするタスクを対象とした。熟練や技巧・スキルを必要とするタスクでは、作業対象物そのものの動特性に基づいて作業を行わなければならない、inherent dynamics interaction の効果が最大限に発揮できると考えたからである。

選定したタスクは寸法公差 H7/h7 の条件下におけるはめあい作業 (peg-in-hole 作業) で、はめあいを行う円柱と丸穴の間隙の最大値はわずか 0.03mm である。各部品の精度が非常に精密であることから、この作業を遂行す

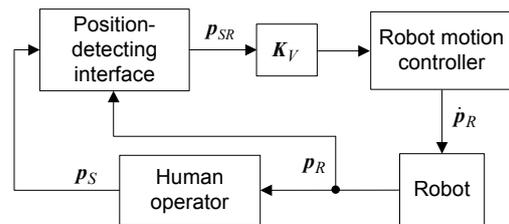


Fig.5 Block diagram of robot motion controller using 3-D position-detecting interface

るにはスキルと熟練を要する。

実験装置および実験外観を図6に示す。インターフェースの上部に直径 20[mm]の peg 部品 (円柱) を取付け、土台部に hole 部品 (丸穴) を設置した。

実験結果を図7に示す。なお、ロボットの運動はロボットの手先において検出される位置偏差の大きさに応じてのみ生成され、ロボットに加えられる力情報は制御には利用していない。

図7に示すように、被験者は実験開始後6秒をかけて、peg 部品を動かしながら hole 部品との位置決め作業を行っている。その間、ロボットの運動 (赤色の線) は peg 部品の動き (黒色の線) に追従していることが分かる。試行開始後、約8秒で両部品が接触状態になり、部品同士を接触させながら挿入作業に向けた最終的な位置決め作業を行っている。その後、挿入作業を開始し、11.5秒から13.5秒までの約2秒間で所定の深さまで peg 部品を挿入している。作業完了までに14秒もの時間を要しているのは、部品間の間隙が非常に小さく、作業の遂行が困難であることに起因する。

hole 部品側に取り付けた力センサによって、はめあい作業に関わる力情報の解析を行ったところ、挿入方向である x 軸方向を含めてその他の方向にも過大な力は発生しておらず、安定条件下で作業が遂行されたことを確認した。

実験中には、検出装置の摺動に伴う摩擦が生じていたため、摩擦力によって作業対象物とロボットの動特性の間にわずかな干渉が発生していたはずであるが、作業自体に与える影響はほとんどなかったという感想が被験者より得られている。多少の干渉が生じて、作業対象物の動特性がロボットの動特性 (インピーダンス特性) に合致するわけでは

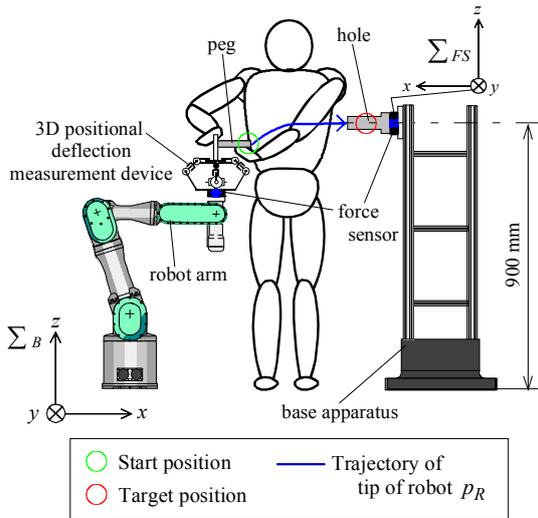


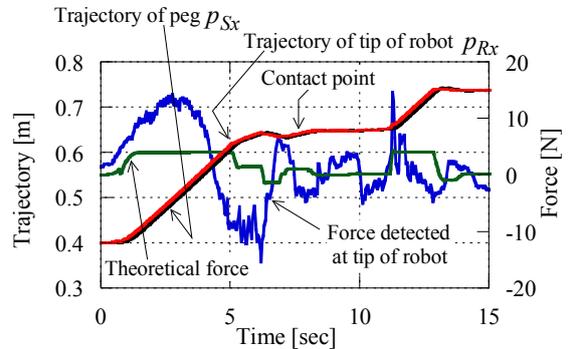
Fig.6 Overview of human-robot cooperative peg insertion task

ないことから、作業者は対象物の動特性と運動を直感的に理解し、自身が持つスキルに基づいて作業を遂行できたと予想される。

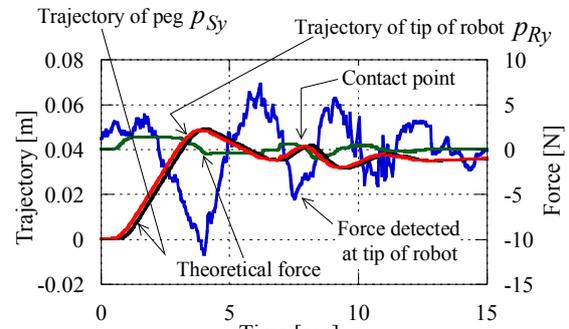
また、作業対象物とロボットの間における動特性の干渉は、制御の安定性にも影響を与えていないことから、検出装置の摩擦に起因する悪影響はそれほど大きくないと判断できる。

次に inherent dynamics interaction が発現されているかどうかの確認を数値シミュレーションによって行った。実験中に得られた peg 部品の運動と同一の運動を、インピーダンス制御を用いて実現する場合に必要な力の大きさを求め、図中の緑色の線で示す。実際に検出された力 (青色の線) との差異が大きく、本実験で得られた運動は、インピーダンス特性に基づいて生成された運動とは全く異なることが分かる。

これにより、提案システムを用いて、inherent dynamics interaction が発現されていることが確認できた。しかし、上述した摩擦力の影響もあり、純粋な inherent dynamics interaction は実現されていない。この問題の解決については今後の課題である。



(a) x-direction



(b) y-direction

Fig.7 Experimental results of human-robot cooperative peg insertion task

4. 研究成果

本研究では、人間-ロボット協調作業系において作業対象物が本来有する動特性を運動規範とした協調作業を実現する制御システムの構築を行った。得られた研究成果は以下の通りである。

(1) inherent dynamics interaction についての概念を提案し、人間-ロボット協調作業系に適用する手法を考案した。

(2) 人間-ロボット協調作業系において inherent dynamics interaction を実現するために必要なインターフェースの構築を行った。

(3) inherent dynamics interaction を実現するためのロボットの運動制御法を提案した。

(4) 実機実験によって inherent dynamics interaction の発現を確認し、精密な組立作業 (peg-in-hole 作業) が遂行できることを確認した。また、実験結果より、提案した制御システムの有効性を示した。

なお、本研究で提案した制御システムの利用法としては、[i]生産現場における作業補助に止まることなく、[ii]医療・福祉の現場での利用や、[iii]人間の運動計測を行う計測器としての利用も考えられる。具体的には、[i]パワーアシストシステムへの利用、[ii]リハビリロボットや手術サポートロボット、[iii]パーキンソン病に代表されるような病的戦振や生理的戦振の微小変位計測や制振を挙げることができる。特に[iii]に関しては、広範囲に及ぶ運動過程の中で生じる微小変位を検出できる従来にはないシステムとなることから、その効果や意義は大きい。

人間とロボットの協調作業系において inherent dynamics interaction を実現できる提案制御法は、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おり、その有用性は単なる理論の範疇にとどまらず、高い実用性が期待できると確信する。

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0件)

[学会発表] (計8件)

1. Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Inherent Dynamics Based Motion Control in Human-Robot Cooperative Task System, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3377-3382, 2009/05/16, Kobe, Japan
2. 積際徹、山本晋、横川隆一、作業対象物

の動特性を運動規範とする人間とロボットの協調制御法、第26回日本ロボット学会学術講演会、pp.3E1-01、2008/09/11、神戸大学

3. 山本晋、田邑昌己、積際徹、横川隆一、表面筋電位により推定した力覚情報と運動方向の同時検出によるロボット運動制御法、第26回日本ロボット学会学術講演会、pp.2K2-01、2008/09/10、神戸大学
4. 積際徹、上野友博、山本晋、横川隆一、柴田浩、作業対象物の固有動特性に基づく人間-ロボット協調作業システムの開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会、pp.1A1-D03(1)-1A1-D03(2)、2008/06/06、ビッグハット(長野市)
5. 山本晋、上野友博、積際徹、横川隆一、柴田浩、作業対象物の固有動特性に基づく人間-ロボット協調作業システムの開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会、pp.1A1-D07(1)-1A1-D07(2)、2008/06/06、ビッグハット(長野市)
6. 上野友博、山本晋、積際徹、横川隆一、柴田浩、人間とロボットの協調作業における操作部の動特性が作業に与える影響、第25回日本ロボット学会学術講演会、pp.1E25、2007/09/13、千葉工業大学
7. 積際徹、上野友博、山本晋、横川隆一、柴田浩、人間-ロボット協調作業系において固有動特性を運動規範とする力学的相互作用の実現、第25回日本ロボット学会学術講演会、pp.3E14/JSAE20074532、2007、2007/09/15、千葉工業大学
8. 積際徹、神吉厚之、横川隆一、柴田浩、力学的相互作用を伴う協調系における人間-ロボット間の相対運動情報に基づくロボットの運動制御法、ロボティクス・メカトロニクス講演会、pp.1A1-M08、2007/05/11、秋田拠点センターALVE

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

なし

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 医工学科・専任講師

研究者番号：90362912