

氏 名	きく うえ りょう 菊 植 亮
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2304 号
学位授与の日付	平 成 15 年 7 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 機 械 工 学 専 攻
学位論文題目	Impedance Perception of Robots and Skill Transfer to Humans Based on Position and Force Information (位置・力情報に基づいたロボットのインピーダンス知覚と人間への技能教示)
論文調査委員	(主 査) 教 授 吉 川 恒 夫 教 授 足 立 紀 彦 教 授 土 屋 和 雄

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、各種技能作業においては位置情報と力情報の相互関係が重要であるとの認識に立ち、これらから得られるインピーダンス情報をロボットの知覚のための基礎情報とする手法、および人間作業への技能教示に利用するための手法についての研究をまとめたものである。全体で6章から成っている。

第1章は序論であり、研究の背景、関連研究、研究目的と本論文の構成について述べている。

第2章では、環境に対するロボットの力覚的な認識能力を構築するための基礎技術として、「インピーダンス知覚」という手法を提案している。提案手法では、任意動作中のロボットの手先位置および手先にかかる力をセンサで計測し、その計測値を線形の回帰方程式に当てはめることによって、手先運動を拘束する剛性、粘性、慣性の各係数行列の推定を行う。ただし、このときのセンサ信号は一般に十分に励起されていないため、ここから得られる推定値は信頼性が低い、したがってここでは、位置信号の励起状態と線形回帰からの残差に基づいて推定値の不確定性を見積もり、これにより意味のある推定値とそうでない推定値を区別できるようにする。さらに、インピーダンスの不連続変化の検出も同時に行う。基礎的な実験によって、この手法で得られる情報は、手先効果器と環境との接触状態、環境の属性、およびその変化に密接な関連があることが認められた。推定されたインピーダンスは、環境との接触状態や環境の属性とよく対応した。また、インピーダンスの不連続変化が起こった時刻は接触状態の変化が起こった時刻と、その位置は環境の要素間の境界とよく一致した。これらの結果は、接触状態や環境の属性に対するロボットの定性的な知覚を本手法によって構成することが可能であることを示唆するものである。この手法は特定の制御手法を前提としないセンシング法であるので、自律的な知能ロボットと遠隔操作ロボットの両方に実装することが可能であると期待される。また、人間による作業動作の監視への応用も考えられる。

第3章では、インピーダンス知覚で得られる情報からさらに高次の情報を抽出するための研究について述べている。ロボットの手先効果器が環境表面に接触しているときに、インピーダンス知覚の出力はその環境表面の形状および属性についての多くの情報を含んでいる。この章では、手先効果器が平らな物体表面上で動摩擦状態にある状況の下で、インピーダンス知覚により得られた剛性行列とその不確定性に基づいて、その表面の法線方向、剛性係数および摩擦係数を推定する方法を提案している。ここで、表面の剛性係数と摩擦係数は不確定性をもった値として得られる。基礎実験の結果により推定値は正しい値とよく一致することが示された。この手法は正確な同定には不向きであるものの、特定の制御手法に基づかない定性的な知覚手法として有効であると考えられる。

第4章でも同じく、インピーダンス知覚の出力からの情報抽出について考察している。手先効果器が凸の円筒状の物体表面で動摩擦状態にあるとき、インピーダンス知覚で得られる剛性行列とその不確定性が、その表面の剛性係数、摩擦係数、法線方向、主方向、および最大曲率の情報を含んでいることを示し、それらの情報を取り出す方法を提案している。また、実験によってその有効性を確かめている。

第5章では、力覚人工現実感を用いて、人間の手先動作技能を他の人間に教示するための研究について述べている。力覚

人工現実感を用いた技能訓練に関しては多くの研究があるが、ある人間の動作を他の人間に教示する手法についてはほとんど考えられてこなかった。教示者の手先動作を動かす位置情報は、位置制御された力覚提示装置を用いて被教示者の手先を動かすことで伝えることができるが、力の情報を伝えるのは通常の力覚提示装置を用いては困難であった。そこでこの章では、教示者が指先で対象物を押し付ける力の情報を、被教示者の指先を上下から圧迫する力として提示する方法を提案している。簡単な実験によって、指先への圧迫力 (F) と、それと主観的に等しい自発的な指先力 (f) の間には両対数グラフ上の直線で表される関係 ($F=Cf^m$) があることが明らかになった。また、これらの係数 C と m の値は被験者により異なり、また、同一被験者でも数日程度の時間間隔をあけると多少変動することが分かった。さらに、未知の仮想物体を指定された深さまで押し付けるタスクを想定して、指先圧迫と位置提示を組み合わせた手法の実験も行った。この実験によって、指先圧迫法は人間の位置間隔にある不正確さを補償するものではないということが明らかになったが、提示される感覚を明瞭することで不精密さを減少することが示された。これにより、提案手法の有用性を示すことができた。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は各種技能作業においては位置情報と力情報の相互関係が重要であるとの認識に立ち、これらから得られるインピーダンス情報をロボットの知覚のための基礎情報とする手法、および人間作業への技能教示に利用するための手法についての研究をまとめたものである。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 環境に対するロボットの力覚的な知覚能力を構築するための基礎技術として、「インピーダンス知覚」という手法を提案した。提案手法では、ロボットの指先位置と指先力のセンサ情報を線形の回帰方程式に当てはめることによって、指先を拘束する剛性、粘性、慣性の各係数行列の推定を行う。また、位置信号の励起状態と線形回帰からの残差に基づいて、推定値の不確定性を見積もりも行う。さらに、インピーダンスの不連続変化の検出も同時に行う。基礎実験の結果により、提案手法で得られる情報は、指先効果器と環境との接触状態や環境の属性と密接な関連があることが認められた。
- (2) ロボットの指先効果器が平らな物体表面上で動摩擦状態にある状況の下で、インピーダンス知覚により得られた剛性行列とその不確定性から、法線方向、剛性係数、摩擦係数についての情報を抽出する方法を提案した。
- (3) ロボットの指先効果器が凸な円筒曲面上で動摩擦状態にあるとき、インピーダンス知覚で得られる剛性行列とその不確定性から、剛性係数、摩擦係数、法線方向、主方向、および最大曲率についての情報を抽出する方法を提案した。
- (4) 力覚人工現実感を用いて人間に何らかの指先動作を教示する場面において、教示者が指先で対象物を押し付ける力の情報を、被教示者の指先を圧迫する力によって提示する方法を提案した。簡単な実験によって、指先への圧迫力と、それと主観的に等しい自発的な指先力の関係が明らかにされた。また、指先圧迫と位置提示を組み合わせた実験によって、有用性を示唆する結果が得られた。

以上、本論文は、ロボットの力覚的な知覚能力の構成法および、力覚を用いた人間から人間への技能伝達法について新たな手法を提案したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年5月29日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。