

内98-26

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Control and Mechanisms for Collision-
tolerant Human Friendly Robots
衝突安全性を考慮したロボット
システムに関する研究

申請者

林 憲玉

Hun-ok Lim

機械工学

生物制御

1998年12月
(西暦)

近年、先進国において人口の高齢化が進み、それに伴ういくつかの深刻な問題が指摘されている。その一つは、例えば高齢者など、健康ではあるものの、体力が弱まることにより、豊かな日常生活を営む上で、何らかの支援を必要とする人の数が増大することである。また、就業人口の減少は、生産現場ばかりでなく、オフィス、流通、サービスなど、広範囲の産業分野に人手不足を深刻化させると予測される。こうした状況を解決する手段の一つとして、人と共に働き、人に種々のサービスを提供し得る人間共存型ロボットの重要性が指摘されている。

人が生活する空間で人と共存し、仕事や生活支援に利用できるいわゆる人間共存型ロボットには、安全性、操作性、機能性の各面から、産業用ロボットとは異なる性能が求められる。これまで使われてきた産業用ロボットは、人の労働を支援するものではあるが、安全対策上、稼働中は人がその作業空間に立ち入らないことを前提として、作業を遂行するものであり、人と共存できる安全なシステムではなかった。

人間共存型ロボットは、人間とロボットが同じ生活・作業空間に共存することが前提であり、その結果、例えば人が誤って接触しても安全性が保たれる構造が必要となる。また、操作性の面では、産業用ロボットのように、専門のプログラムが専用のロボット言語を駆使して動作をプログラムするのではなく、専門知識のない人でも容易に扱えるコミュニケーションインタフェースを持つことが不可欠である。さらに、ロボットが人間とともに作業を行う場合は、産業用ロボットに要求される高速/高精度という条件よりも、簡単な指令で確実に作業を遂行する作業ロボスタビリティや、人の動作にあわせて、柔らかく振る舞える機能がロボットには必要である。例えば、8mm ビデオカセットテープのような小箱を人に手渡す動作を産業用ロボットに行わせた場合、動作速度が0.5m/s以上になると、75%以上の人が「恐怖」を感じるという報告もある。これは、現在の産業用ロボットの平均的な最高動作速度3m/sと比較すれば、かなり低い速度である。人間生活空間で行動するロボットは、産業用ロボットのように高精度でかつ高速で動くのではなく、多少ゆっくり動く、コンプライアントな運動機能を持つロボットの方が望ましい。

本研究は、数ある人間共存型ロボット実現のための研究課題の中から、人および環境との予期せぬ衝突時における安全性の確保に主眼を置いた問題を追及することを目的とする。我々の体が何かに衝突すると、まず皮膚の粘弾性特性により、さらに大きな力が作用する場合は、胴体、特に腰部の粘弾性特性により、それでも耐えられない力には足が滑ることにより、それぞれ衝撃力を緩和することができる。人間共存型ロボットも、全体の表面および胴体部に受動的な粘弾性要素を付加し、また、従来の産業用ロボットのようにベースを床に固定するのではなく、有限な摩擦力で床面に拘束される形態を採用することにより、衝突に対する衝撃を緩和し、対人安全性を向上させることができる。このような人間の身体構造の

特徴に注目し、対人衝突安全性を保証する人間共存型ロボットの基本構造として、本研究では表面および腰部に受動的な粘弾性要素を備え、かつ脚・床接地面間で受動的移動が可能な構造を持つことが重要なことを提唱した。また、こうした構造を持つロボットの衝突安全性を評価し、その安全効果を確認すると共に、その制御手法を検討し、衝突安全性を維持しつつ、ロボット作業の遂行を保証する制御方式を確立した。

本論文は、全7章で構成されている。以下に、各章ごとの概略を示す。

第1章は、序論である。これまでに提案されたロボットに対する安全性を確保する手法について、人とロボットを隔離する方法、非接触センサにより人を検出し障害物として回避する方法、力覚センサなどの検出情報を用いて制御的に柔軟性を作り出す方法、機構的な粘弾性要素を用いる手法に分類して、従来の研究の概要、問題点を示し、本研究の位置付け、意義、方法を示した。

第2章では、まず人間共存型ロボットの一形態として、柔軟要素で覆われた表面を持つマニピュレータ、受動的な粘弾性要素で構成された腰部、受動/能動両者の移動が可能なベースから構成されるロボットシステム(PMHFRPT)を提案した。これと共に、移動ベース導入の対人衝突緩和対策上の意義を明確にするために、床面に固定された種々のマニピュレータシステム、すなわち、硬い表面あるいは柔らかい表面を持つロボットマニピュレータや、その各関節に受動的な粘弾性要素を加えた従来型のマニピュレータシステムと対比しつつ、軌道追従作業下でのPMHFRPTの有効性を定性的に論じた。そして、1) 予期せぬ衝突の際の最大接触力を、床面との摩擦力により規定される値以下に抑えることができる、2) 手先のみでなく、よりベースに近い部分で予期せぬ衝突が起こった場合でも、十分な柔軟性を確保できる、3) システムが持つ運動学的冗長性の活用と、移動ベースを考慮した軌道制御の導入で、衝突安全性を保証しつつ作業遂行が可能となるなど、PMHFRPTが持つ特徴を明らかにした。

第3章では、PMHFRPTの、人を含む環境下での接触時における接触力低減効果を検証する必要がある。このために、まずシミュレーションによって定量的に把握する上で基本となる、PMHFRPTの動力学モデル、環境との接触モデル、床面との摩擦による拘束モデルを定式化した。

第4章では、PMHFRPTのエンドエフェクタの制御法を論じた。PMHFRPTでは、衝突によって腰部の粘弾性要素の変形やベースの滑りが引き起こされ、それによって接触力が低減される。しかし、同時に、これらの変形は、マニピュレータのエンドエフェクタの目標値からの変動を引き起こし作業遂行に支障をきたす。そこで、腰部の受動的な粘弾性要素およびベースの運動の計測値に基づきマニピュレータの目標関節角指定を変更することを基本とする、エンドエフェクタの位置・姿勢の制御法を示した。

第5章では、第3章で示したPMHFRPT機構が持つ接触力緩和効果および、

第4章で示したPMHFRPTのエンドエフェクタの制御手法の有効性を確認するための計算機シミュレーションを行った。衝突状況としては、人がロボットに衝突する場合とロボットが人に衝突する場合の両者を想定した。計算機シミュレーションにおいては、ベースと床面との摩擦係数、腰部の粘弾性特性値を様々に変化させ、有効なパラメータの組み合わせを検討した。その結果、例えば、腰部の粘性係数150Ns/m、剛性係数200N/m、静止摩擦係数0.01、粘性摩擦係数100Ns/mと設定した上で、0.15m/sの速度でPMHFRPTのマニピュレータが衝突する場合、速やかに衝撃力を30N以下におさえることができ、人に対する安全性が十分に確保できることが検証された。また、PMHFRPTのエンドエフェクタの軌道追従性も同時に確保できることも検証され、安全性の面および作業継続性の面からPMHFRPTの機構およびその制御手法の有効性が確認された。

第6章では、第5章において計算機シミュレーション結果により示したPMHFRPTの機構的有効性および制御手法の有効性を、実システムで実験的に確認した。実験システムとして、2つのACサーボモータとボールスクリュウの組合せによって駆動される水平面移動テーブル上に2自由度の水平関節型ダイレクトドライブマニピュレータを6軸力覚センサを介して設置したシステムを構築した。このシステムにおいて、移動ベースおよび腰部の粘弾性効果を、水平面移動テーブルに力覚センサの情報に基づく摩擦を考慮したインピーダンス制御を適用して模擬した。衝突状況については第5章で行った計算機シミュレーションと同様に、人がロボットに衝突する場合とロボットが人に衝突する場合の両者を想定した。具体的には、人間がロボットに衝突する場合については、マニピュレータを人間が押すことにより、ロボットが人に衝突する場合については、マニピュレータ先端を直線運動させ、その途中で床面に固定されたアルミ棒にマニピュレータの中間リンクを衝突させることにより、それぞれ模擬実験を行った。また、両実験ともマニピュレータの衝突部分に力覚センサを取り付け、衝突力を直接計測した。実験対象として、ベースについては床面に固定されたものと受動的に移動可能なものとの2種類、腰部については受動的柔軟特性を有するものとなないものとの2種類、計4種類のシステムを用いた。PMHFRPTのベースと床面との摩擦係数、腰部の受動的粘弾性特性値としては、第5章で有効性が確認された値に設定した。実験結果より、安全性、作業継続性の両面からPMHFRPTの機構と制御手法の有効性が検証できた。

最後に第7章では、本研究で得られた結論をまとめ、さらに今後の研究の展望について述べた。

以上、本研究は人間とロボットの共存のために重要な機能として安全性の確保に有効なロボットの機構と作業性の確保に有効な制御則を提案し、人間とロボットの共存の実現に貢献した。