

いまむら じゅん

氏 名 今 村 純  
授 与 学 位 博士 (工学)  
学 位 授 与 年 月 日 平成15年3月24日  
学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学位規則第4条第1項  
研 究 科 , 専 攻 の 名 称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻  
学 位 論 文 題 目 マニピュレータによる仮想非駆動関節を用いた物体のハンドリング  
指 導 教 官 東北大学教授 小菅 一弘  
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 小菅 一弘 東北大学教授 江村 超  
東北大学教授 内山 勝 東北大学教授 中野 栄二

## 論 文 内 容 要 旨

本論文では、マニピュレータによる物体のハンドリングにおいて、問題となっているマニピュレータの自重に対する可搬重量の小ささに着目し、その解決策として、人間の腕が重量物ハンドリングの際に無意識に行っている、許容負荷が小さい手先付近の関節にはトルクが加わらないようにする、という手法をマニピュレータに適用することを考えた。そのために、あたかも非駆動関節であるかのように制御される仮想非駆動関節を提案した。

まず、第1章において、本研究の目的、研究の背景、研究課題、関連する研究および本論文の構成を述べた。

本研究の目的では、現在の社会で問題になっている高齢化を解決するための方法として研究されている、ヒューマノイド型ロボットを紹介した。また、そのヒューマノイド型ロボットの腕 (マニピュレータ) の問題点である可搬重量の小ささを指摘した。次に、その問題点を解決するために、まず、何故そのような問題が起こってしまうのかを、マニピュレータの機構的な特性および物体のハンドリング方法から明らかにし、人間の腕が、重量物ハンドリングの際に無意識の内に効率良く行っている手法に着目し、その手法をマニピュレータに適用することを考えた。そのために、仮想非駆動関節という、あたかも非駆動関節であるかのような挙動を示すように制御される関節を提案した。

研究の背景では、本研究で提案する手法により、マニピュレータによる可搬重量を超えた物体のハンドリングが行えることにより可能となることを述べた。例えば、従来用いていたマニピュレータによる物体の操りにおいて、従来取り扱っていたものよりも重い物体を扱うことができるようになる。また、従来取り扱うことが出来た物体を、より小型、軽量、小出力のマニピュレータで操ることが可能となる。小出力のマニピュレータは大出力のマニピュレータと比較して、人間に危害を加える心配が少なくなるため、このように人間の生活空間内で作業を行う用途には非常に適している。以上のような利点が挙げられる。

研究課題では、マニピュレータによる可搬重量を超えた物体のハンドリングを実現するためにはどうすれば良いのかを述べた。本論文では、一般的に用いられているシリアルリンク型マニピュレ

ータを用いて重量物を操る際に、許容負荷が小さい関節を仮想非駆動関節として制御する方法を提案している。ここで、仮想非駆動関節とはあたかも非駆動関節であるかのような挙動を示すように、その関節にはトルクが加わらないように制御される関節のことである。そこで、どのようにして非駆動関節を実現すれば良いのかが問題となる。非駆動関節の挙動を実現する一番簡単なものとして、その関節のアクチュエータに出力しないという方法が考えられる。しかし、通常のマニピュレータの関節には、ダイレクトドライブマニピュレータ等と違い、減速機を搭載しているため、アクチュエータの出力を切ったとしても、非駆動関節のような挙動を示すとは限らない。例えば、減速機に back drivability を持たないウォームギアを使っている関節の場合は、その関節の出力を切っても、その関節は全く回転しないということが考えられる。そのため、たとえ減速機を搭載していても、手先に作用する力/モーメントに対して、その関節にはトルクが加わらないようにする方法を考える必要がある。

関連研究では、本研究に関連する研究として、主な重量物をハンドリングするマニピュレータの研究と非駆動関節を有するマニピュレータの研究を紹介し、本研究との比較を行った。

本論文の構成では、本論文の第2章以降の各章の概要を述べた。

第2章では、本研究で提案する仮想非駆動関節の制御法について説明した。その際に、マニピュレータ手先に加わった力/モーメントが仮想非駆動関節にトルクを生じないようにするための方法として、関節の運動方程式を用いる方法、ヤコビ行列の成分を用いた連立方程式による方法、ベクトル方程式を用いた方法（仮想非駆動関節を1個有する場合）を紹介した。次に、それらの中で最良の方法と考えられる、ベクトル方程式を用いた方法を仮想非駆動関節を2個以上有する場合に拡張し、その方法を用いて実験を行い、実際に仮想非駆動関節があたかも非駆動関節であるかのように制御されることを確認した。

第3章では、1台のマニピュレータを用いてその可搬重量以上の物体を操ることを考えた。そこでまず、一般的なマニピュレータの関節の内、どの関節を仮想非駆動関節として制御するかを決めた。仮想非駆動関節の角度は、マニピュレータ手先に作用する力/モーメントに依存するため、操作者が任意に指定することができない。そのため、物体の運動を全自由度制御することができるとは限らない。そこで、どの関節を仮想非駆動関節として制御するかを決めたマニピュレータを用いて物体を操る際に、制御することができる物体の運動を求めた。そして最後に実験を行い、仮想非駆動関節にほとんどトルクを加えることなく、可搬重量以上の物体のハンドリングを行うことができることを示した。

第4章では、第3章において、物体の操りの際に、仮想非駆動関節を用いたことにより、物体の運動を制御するための自由度が減少してしまったことを補うために、仮想非駆動関節を有する双腕マニピュレータを用いて物体を操ることを提案した。そこで、まず、双腕マニピュレータの関節の内、いくつかが仮想非駆動関節であっても、物体の運動を完全に制御できる場合を考え、そのための必要十分条件を示した。次に、物体を操るために必要な物体の運動方程式を示し、この条件が成り立つ場合において物体を操ることを考え、そのために必要な、物体に加わる外力/モーメントおよび内力/モーメントと通常の駆動関節のトルクとの関係を示した。そして、この関係を用いて、物体を操るための方法を示した。次に、一般的な機構の6自由度マニピュレータに仮想非駆動関節を適用することを考えた。このようなマニピュレータの場合、手首3関節を仮想非駆動関節として

制御することが妥当である。このようなマニピュレータの手首3関節の軸は一般に一点で交わり、このような手首3関節は1つの球対偶と見なすことが可能である。また、仮想非駆動関節はその関節で連結されたリンク間に力を伝達することができるが、関節軸方向のモーメントを伝達することができない。よって、仮想非駆動関節で構成された球対偶は連結されたリンク間を力のみ伝達することとなり、手首3関節を仮想非駆動関節とする双腕マニピュレータで物体を操ることを考えた場合、両手首に加わる力のみを用いて、物体を操ることを考えることができる。しかし、このように手首3関節を仮想非駆動関節としたマニピュレータで双腕協調を行った場合に、物体の運動を完全に拘束することができない。そこで第4章では、物体の運動を拘束することができない方向および物体に加えることができる内力／モーメントの方向を求め、これらの関係を用いて、物体を操る方法を示した。最後に実験を行い、この章で提案した手法の有効性を確認した。

第5章では、第4章まで提案してきた仮想非駆動関節にダンピングの特性を追加する手法を提案した。第4章までの仮想非駆動関節は完全に back drivable な非駆動関節であるかのように制御される関節であった。このような仮想非駆動関節は、マニピュレータ手先に加わった力／モーメントにより、その関節角度を即座に変えてしまう。そのため、把持物体をその運動を制御できない方向に素早く動かすような場合に、把持物体に加わった慣性力等により、物体に振動が生じてしまい、その位置／姿勢等が安定するのに時間が掛かってしまうことがあった。本論文で提案している仮想非駆動関節は、非駆動関節をソフトウェア的に実現するものであり、これらの関節も小出力ながらトルクを出力することが可能である。そこで、上述のように生じてしまった振動を減少させるためのダンピングの特性を、ソフトウェア的に新たに追加することが可能となる。そこで第4章では、従来の仮想非駆動関節にダンピング特性を追加し、仮想非駆動関節に振動が生じてしまっても、その振動の振幅をより小さく、より速く収束できるようにするための手法を示した。そして最後に実験を行い、把持物体の運動があまり不安定になることなく、短い時間で安定な位置／姿勢になることを示した。

第6章では、これまで仮想非駆動関節として制御してきた小出力の関節を通常の駆動関節として制御する方法を提案した。本論文で提案している仮想非駆動関節は、あたかも非駆動関節であるかのように制御される関節であるために、マニピュレータ手先に作用する力／モーメントの値によっては、物体の運動を制御できない方向が存在する。しかし、実際の仮想非駆動関節は、非駆動関節をソフトウェア的に実現するものであり、これらの関節も小出力ながらトルクを出力することが可能である。そこで第6章では、仮想非駆動関節として制御してきた手先付近の小出力の関節を通常の駆動関節として制御することを考えた。そうすることによって、これまで運動を制御することができなかった方向にも把持物体の運動を制御することが可能となる。そこで、まず、第4章まで仮想非駆動関節として制御してきた双腕6自由度マニピュレータの手首3関節を、通常の駆動関節として制御した場合に、把持物体には両手首を結ぶ直線回りの回転運動のみ指定できることを示した。次に、手首3関節が両手首を結ぶ直線回りに出力することができるトルクの導出法を示した。次に、マニピュレータの関節があるトルクを出力することができるとしたときに、把持物体に指定することができる姿勢の導出法を示した。そして最後に実験を行い、その有効性を示した。

第7章では、本論文の結論を述べた。

# 論文審査結果の要旨

産業用ロボットとして様々なロボットが開発され、実用化されてきた。高齢化社会の到来とともに、人間の生活空間内で作業を代行したり支援したりするロボットの開発が期待されているが、人間に合わせて設計されている生活空間の大きさや、ロボットが人と共存する場合の安全性を考えると、生活空間内で用いることができるロボットの大きさや重量には制限があり、ロボットが行える作業は限られてしまう。特に、ロボットの可搬重量はロボットその自重と比較すると小さく、生活空間内で無理なく利用できる小型ロボットには、実現可能な作業が大きく制限されてしまう。人が重い物体をハンドリングする時には、無意識に、許容負荷が小さい手先付近の関節には負荷トルクが加わらないように作業を行っており、手先付近の関節は仮想的に非駆動状態にある。本研究は、このような仮想非駆動関節の概念を、マニピュレータによる物体のハンドリングに導入することによって、可搬重量を超えた物体のハンドリングを実現しようとするもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、仮想非駆動関節の概念を紹介するとともに、実際のマニピュレータにおいて、特定の関節を仮想非駆動関節とするためのマニピュレータの制御方法について考察し、実用的な制御アルゴリズムを導出するとともに、産業用ロボットを用いて実験を行い、その有効性を確認している。

第3章では、1台のマニピュレータで、その可搬重量を超えた重さの物体をハンドリングする問題を考え、手先付近の関節を仮想非駆動関節として制御することによって、実際に可搬重量を超えた物体のハンドリングが可能であることを示している。また、実験を行い、仮想非駆動関節には負荷トルクがほとんど加わらないことを実験により確認している。仮想非駆動関節を導入することによって、マニピュレータの可搬重量を超えた物体のハンドリングができることは、実用上極めて有用な手段である。

第4章では、仮想非駆動関節を用いて物体のハンドリングを行う際に失われる、物体の運動自由度を補うために、双腕マニピュレータを用いて物体を操る方法を提案するとともに、実験を行いその有効性を確認している。双腕アームを用いることによって、操れる物体の自由度の制限を緩和する方法は、実環境では極めて有用な方法である。

第5章は、完全にバックドライバブルに制御されている仮想非駆動関節に、許容トルクを考慮したダンピング特性を付加することによって、物体の安定なハンドリングが実現できることを示している。

第6章は、許容トルクが小さい関節をその範囲内で利用することによって、物体にどのような運動が指定できるかについて考察している。仮想非駆動関節による物体のハンドリングと、本章での手法を組み合わせることによって、物体の実用的なハンドリングが可能になる。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、仮想非駆動関節という新たな概念をマニピュレータの運動制御に導入することによって、可搬重量を超えた物体のハンドリングを可能にしようとするものであり、仮想非駆動関節を用いた単一マニピュレータによる物体のハンドリングならびに双腕マニピュレータによる物体のハンドリング手法を提案するとともに、実験によりそれらの有効性を示したもので、機械知能工学の発展に寄与することが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。