

京都大学	博士（工学）	氏名	Xixun Wang
論文題目	A Robot-type-independent Intuitive Teleoperation System without an Awareness of Robots (ロボットの存在を感じさせない汎用的かつ直感的な遠隔操作システム)		
(論文内容の要旨)			
<p>ロボットの遠隔操作は、宇宙や災害現場などの極限環境だけでなく、地上の屋内外における日常的な作業遂行においても重要な役割を果たすようになってきている。ロボットの遠隔操作はオペレータの技量に依るところが大きく、熟練するまでに相当の訓練が必要になり、熟練オペレータの育成には多大なコストをかける必要がある。また、災害現場での人命救助や外科手術のようなタスクでは、オペレータには肉体的にも精神的にも大きな負担がかかる。オペレータの負担を軽減するとともに、直感的な操作を可能とする遠隔操作システムの開発が望まれている。また、オペレータにとっての本来の目的はロボットを操作することではなく、作業を遂行することである。本論文では、ロボットの存在を意識することなく、自身が作業している感覚で、ロボットに作業を遂行させることを最終目標としている。その目標達成のために必要となる要素技術を開発するとともに、各要素を統合化し、ロボットの存在を感じさせない汎用的かつ直感的な遠隔操作システムを実現し、その有効性を被験者実験により検証した。</p> <p>本論文は5章からなり、各章の要旨は以下の通りである。</p> <p>第1章は、序論であり、従来のロボットの遠隔操作システムを概観するとともに、既存のシステムの問題点を明らかにしている。具体的には、オペレータに対してロボットに関する十分な知識を持つことが要求され、作業負荷が高いなどの問題と、ロボットの構造に制限がある、システムの通信遅延を許容できないなどの問題があることを指摘している。これらの課題を解決するためのコンセプトを述べ、それを実現するための要素技術に必要とされる要件を明らかにしている。さらに、本論文の構成について述べている。</p> <p>第2章では、本論文のコンセプトを実現するための要素技術として、点群データを用いた移動ロボットの実時間自律ナビゲーションについて述べている。広域な環境における移動ロボットの最適な運動を実現するためには、経路計画と実時間制御に基づく自律ナビゲーションが重要となる。複雑環境で作業する自律移動マニピュレータに対しては、3次元の動的障害物や物体を把持したロボットの複雑な形状を考慮したうえで、実時間で経路計画を遂行することが求められる。現状では、計算時間が膨大になり、実時間性が大きな問題である。本章では、この問題を解決するために、PRM(Probabilistic RoadMap)を導入し、ハードウェアで環境との衝突の可能性のある経路を抽出し、最適経路の候補から除くことにより、経路計画の実時間性を担保している。まず、事前に取得した環境の3次元の点群データとロボットの形状を考慮した大域的な PRM を予め作成し、オフラインで大域的な最適経路を計画する。次に、現在のロボットの近傍において実時間で検出された静的障害物や動的障害物の3次元点群データを加え、ロボット近傍の局所的な PRM を作成する。この局所的な PRM に基づき、現在のロボット位置姿勢から大域的な軌道上の次の目標位置姿勢まで移動するための局所的な最適軌道を算出し、それに追従するようにロボットを実時間制御する。これにより、動的障害物を含んだ環境変化にも対応できる実時間自律ナビゲーションを可能とした。提案手法の有効性をシミュレーションおよび実機実験により検証した。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	Xixun Wang
<p>第3章では、移動マニピュレータにより物体を把持し運搬するための物体の最適把持戦略について考えている。環境の3次元点群データを取得する場合に、物体に遮蔽されセンサで計測できない空間が存在する。したがって、ロボットハンドによる物体の最適把持位置姿勢の決定には不完全な物体形状情報を前提として、安全に把持できるハンドの位置姿勢を求めることが必要となる。物体に遮蔽されて見えない領域とロボットハンドの占有領域との共通部分を求め、その共通領域が小さいハンド位置姿勢を安全な把持位置姿勢と定義する。安全性の低いハンドの物体把持位置姿勢を最適解の候補から除くことで計算の効率化を図り、絞り込まれた候補からニューラルネットを用いて最適把持位置姿勢を求める。複数の様々な形状の把持物体が狭い領域に配置された複雑な実環境での実機実験により、提案手法は従来手法に比べて高い成功率と低い計算コストを有することを明らかにした。</p> <p>第4章では、第2, 3章で述べた要素技術を統合化し、本論文で提案するロボットの存在を感じさせない汎用的かつ直感的な遠隔操作システムを実現した。オペレータは実作業空間が再構築された仮想空間においてアバターに没入して、ロボットの存在を意識することなく物体の運搬タスクを実行することができる。実際の物体の運搬は異なる構造を持つ複数の移動マニピュレータにより、自律的に遂行される。現状のロボット技術では完璧な自律機能を実現することは困難であり、様々な要因でロボットはタスクの遂行に失敗する。実装したシステムでは、ロボットが自律的にタスクを遂行できなかった場合の対応策として、リカバリーモードを持っている。リカバリーモードでは、仮想空間の時間軸を作業失敗時刻まで戻して、オペレータにアバターとロボットによる作業と失敗の様子を第三者視点で提示し、その原因を理解させる。オペレータが失敗した状況でロボットにより作業を再開できると判断した場合には、失敗発生時刻から再度アバターとして仮想空間で作業を再開することができる。また、オペレータ自身でロボットを操作した方が良いと判断した場合には、仮想空間でロボットの動きを確認しながらロボットを遠隔操作するモードも実装されている。実際には、一人では運搬が難しい長尺な物体の運搬タスクを取りあげ、提案した遠隔操作システムを実装した。実作業空間では、まず2台の移動マニピュレータが自律的に物体の近傍に移動し、2台がそれぞれ物体の最適把持位置姿勢を算出する。把持終了後は2台の移動マニピュレータが自律的に協調運搬を行い、タスクを遂行する。この物体運搬タスクに対する被験者実験を実施し、提案システムの有効性を示した。</p> <p>第5章は結論であり、本論文のまとめと、今後の課題について述べている。</p>			

氏名	Xixun Wang
----	------------

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、ロボットの種類や台数に依存せず、オペレータが仮想空間に没入して直感的に作業を遂行することができる遠隔操作システムを提案している。まず、目標とするシステムを構築するための基盤技術として、3次元動的環境下での移動マニピュレータの自律移動機能、自律的な物体把持を実現するための最適把持戦略アルゴリズムを開発している。大型重量物体の運搬タスクに対して、基盤技術を統合化することによりオペレータにロボットの存在を感じさせない直感的な遠隔操作システムを実現し、被験者実験により提案システムの有効性を検証している。本論文は、これらの結果をまとめたものであり、主な成果は以下の通りである。

1. 3次元動的環境において、例えば複数のロボットで大型物体を把持して協調運搬するような、全体が3次的に複雑な形状をもつ移動ロボットシステムが目標の位置姿勢に自律移動するための実時間経路計画アルゴリズムを提案している。大型物体を把持した2台の移動マニピュレータが移動障害物を回避しながら、把持物体を目標位置姿勢に運搬するタスクを実現するために、実ロボットに実時間経路計画アルゴリズムを実装し、シミュレーションおよび実機実験により提案アルゴリズムの有効性を検証した。
2. カメラやレーザレンジファインダーなどのセンサは、障害物の裏側を計測できないというオクルージョンの問題が発生する。ロボットハンドによる物体把持において、これらのセンサからの不十分な環境情報に基づいて、確実な把持を実現するためのハンドの把持位置姿勢の最適化アルゴリズムを提案した。複数の様々な形状の把持物体が狭い領域に配置された複雑環境における実機実験により、提案手法が従来手法に比べ、高い成功率と低い計算コストを有することを明らかにした。
3. 開発した基盤技術を統合化して、ロボットの種類や台数に依存せず、直感的にタスクを遂行することを可能とする遠隔操作システムを構築した。具体的には、大型重量物体の運搬をタスクとして、2台の移動マニピュレータによる自律的な協調運搬を実現した。実環境を再構築した仮想空間において、オペレータがアバターとして自身で物体を搬送することで、ロボットを意識することなくタスクを遂行することを可能とした。2台の移動マニピュレータを用いて提案システムを実現し、長尺な物体の運搬タスクに対して被験者実験を行い、提案システムの有効性を検証した。

以上要するに、本論文はロボットの種類や台数に依存せず、オペレータが仮想空間に没入して直感的に作業を遂行することができる遠隔操作システムについて有用な知見を与えたものであり、その成果は学術上、實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、令和5年1月30日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。