

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	化学繊維ロープを用いたワイヤ干涉駆動型長尺マニピュレータの力学と制御
Title(English)	
著者(和文)	高田敦
Author(English)	Atsushi Takata
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11743号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:遠藤 玄,鈴森 康一,武田 行生,岡田 昌史,中西 洋喜
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11743号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	高田 敦	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	遠藤 玄	教授	中西 洋喜	准教授
	審査員	鈴森 康一	教授		
		武田 行生	教授		
岡田 昌史		教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「化学繊維ロープを用いたワイヤ干涉駆動型長尺マニピュレータの力学と制御」と題し、以下の7章よりなる。

第1章「序論」では、本論文の研究背景と目的を述べている。すなわち、福島第一原子力発電所の廃炉作業に代表される危険かつ狭隘空間での作業では、高強度かつ軽量の化学繊維ロープとプーリからなるワイヤ干涉駆動を用いた長尺マニピュレータが有用であるとされている。マニピュレータ構造が細径・冗長多関節であることから、所望の運動を安定に実現するためにはロープやプーリ等の機械的性質を十分に考慮した上で力学的・運動学的冗長性を活用してロープ張力および関節角の目標値を決定することが必須であると述べている。そして、本研究の目的は冗長なロープ張力の決定法と、ロープの伸びと重力の釣り合いが安定平衡点となる目標関節角経路を計画する手法を提案し、関節駆動機構を高強度化した試作機による実験から、その有効性を明らかにすることである、と述べている。

第2章「全長 10m 試作機の機構の実現と制御系の構築」では、まず、従来試作機において強度不足により破損するプーリと化学繊維ロープを実験的に特定し、より高強度の材料に変更することで、根元関節に最も大きな自重トルクが働く水平姿勢保持を全長 10m の試作機により実現している。さらに、従来法ではマニピュレータ関節角に基づきアクチュエータ変位を制御していたため、ロープの伸びを含むマニピュレータの動特性と、サーボ系の動特性が互いに干渉することにより不安定化することを指摘し、これを解決するためにアクチュエータの角度センサに基づく変位制御を導入している。そして、手先位置決め誤差や消費電力などを計測し、試作機が十分な基本性能を有していることを示している。

第3章「ワイヤ干涉駆動機構の駆動冗長性と張力決定法」では、従来の干涉駆動系においては2本のロープ張力の差は関節トルクとして明示的に利用されてきたが、その和であるバイアス張力は有効利用されてこなかったことを指摘している。そこで当該マニピュレータに対して、バイアス張力を活用して所望の目標関節角を実現する新たな冗長ロープ張力の決定法を提案し、その有効性を数値解析により明らかにしている。すなわち、当該マニピュレータにおいて、ヨー軸関節を駆動するロープがより根元側のピッチ軸関節に巻きかけられていることから、自重に抗するピッチ軸関節トルクを分担できることに着目し、ヨー軸関節のバイアス張力を最適化の変数として、最急降下法によりロープ張力を求めることで、水平姿勢保持に必要な最大ロープ張力を従来法より低減できることを明らかにしている。

第4章「冗長逆運動学と可動範囲解析」では、まず、狭隘地での作業を想定すると障害物などによりロープ張力を最小化する関節角が実現できない場合があり、確実に動作するためには、いかなる関節角に対してもロープの破断が起こらない、手先位置の集合体である可動範囲を導出して活用することが必要であると述べている。次に、モンテカルロ法により手先位置を定め、ロープ張力が最大化する関節角を探索し、そのときの張力がロープ設計強度以下であれば、その手先位置は実現可能であると判定することで、可動範囲の体積を導出している。そして、第3章で提案した手法は従来法に比して可動範囲を23%拡大できることを数値解析により示すとともに、試作機を用いた実験でロープ破断が起こらず所望の動作を実現できることを明らかにしている。

第5章「化学繊維ロープの伸び特性」では、化学繊維ロープの張力による伸びをモデル化し、拮抗駆動系に適用した場合の関節角の周波数応答を、鋼鉄製ワイヤロープを用いた場合と比較している。まず、化学繊維ロープを粘弾塑性の四要素モデルで近似し、その値を実験的に同定している。次に、経路長が10mを超える長軸間距離を有する拮抗駆動系に同モデルを適用し、数値解析と実験により、関節角の周波数応答を得ることで化学繊維ロープが鋼鉄製ワイヤロープと同等の最大2Hz程度の制御帯域を実現できることを明らかにしている。

第6章「関節角の安定性解析と運動生成法」では、第4章で得られた可動範囲内で、関節角が安定平衡点へ収束する関節角経路生成手法を提案し、その有効性を実験により明らかにしている。すなわち、アクチュエータ変位を固定した状態で、第5章で得られたロープ弾性と、重力が釣り合う平衡点において微小な擾乱を加えたときを考え、局所線形化した運動方程式から得られる固有値の配置により安定平衡点を判別できることを利用する。この判別法と、高速な経路探索手法であるRapidly Exploring Random Trees法を組み合わせることで、安定平衡点へ収束する経路生成手法を提案している。試作機により水平姿勢から上方に5kgの錘を持ち上げる動作を達成し、その有効性を明らかにしている。

第7章「結論」では、本研究で得られた結果を総括し、今後の課題について述べている。

以上を要するに、本論文は、ワイヤ干涉駆動型長尺マニピュレータの冗長ロープ張力の決定法と、伸びに対して安定な関節角経路生成手法を提案し、関節駆動機構を高強度化した試作機を用いて、これらの有効性を明らかにしたものであり、工学上、工業上、貢献するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値があると認められる。

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。