T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

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渉駆動型長尺マニピュレータの力学と制御
Title(English)	
著者(和文)	髙田敦
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)	論文要旨
Type(English)	Summary

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 系 機械 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 （ 工学 ） Doctor of
学生氏名： Student's Name	髙田 敦	指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	遠藤 玄 教授
		指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)	鈴森 康一 教授

要旨（和文 2000 字程度）
Thesis Summary（approx.2000 Japanese Characters ）

本論文は「化学繊維ロープを用いたワイヤ干渉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 章からなる．
第 1 章「序論」では，長尺多関節マニピュレータが求められる社会背景として狭隘部探査を取り上げ，ワイヤ干渉駆動型マニピュレータに注目した．前任者により全長 10 m のマニピュレータ試作機が設計されたが，全体の空中支持，マニピュレーション動作が実証されていなかった．この原因を整理し，本研究で取り組む研究課題を関節駆動機構の耐荷重向上と，腱の剛性限界に起因する関節角制御の不安定性を回避する運動生成とした．鋼鉄に匹敵する剛性を仮定しても腱の剛性が十分でないことから，強度だけでなく腱の剛性もまた，全長 10 m スケールのマニピュレータ実現を制約する要因であることを指摘した．これらの課題を解決し，マニピュレーション動作を全長 10 m 試作機にて実証することが本論文の目的である．
続いて，関節角は腱の弾性と重力によって生成されるポテンシャルに従って動き，関節角目標値が平衡点となるようにアクチュエータ変位が制御される枠組み，ダイナミクスベースト制御を採用した．長尺なマニピュレータでは腱の伸びが無視できないためである．つまり，マニピュレーション動作の実現には関節角の安定性を担保する運動生成法が必要であり，3 章以降で取り組む課題として，ポテンシャルの形状を左右する冗長な関節角の定め方，関節角を支える冗長な腱の張力の定め方，関節剛性を左右する化学繊維ロープの伸び特性の解明に分析した．
第 2 章「全長 10 m 試作機の機構の実現と制御系の構築」では，マニピュレータの痩身さを保ったまま伝達機構の耐荷重を向上させる方法として材質変更が特に有効であることを議論し．この改修によって全長 10 m 試作機の空中支持を達成した．続いて，ダイナミクスベースト制御に基づくアクチュエータ変位制御の導入について述べた．
第 3 章「ワイヤ干渉駆動機構の駆動冗長性と張力決定法」では，駆動冗長性を活用した張力決定法を提案した．本研究における腱の最大の役割は重力による関節トルクを支えることである．従って，張力をできるだけ小さく済むように張力を決定する方法が望ましい．そこで，ワイヤ干渉駆動機構に固有の特徴を活用し，腱の張力最大値を減じる決定法を提案し，特定の姿勢を支持する場合の張力を従来手法と比較し，低減効果を確認した．
第 4 章「冗長逆運動学と可動範囲解析」では，手先位置の自由度に対して冗長な逆運動学解を腱張力の最大値を評価指標に用いて解いた．その結果，全長 10 m 試作機のスケールでは，同じ手先位置となる逆運動学解の中でも必要な張力が 2 倍程度と大きく違うものがあることを確認した．従って，手先の可動範囲の大きさは前章の張力決定法だけでなく，逆運動学の解き方に依存する．そこで，逆運動学は腱の負担が最も大きくなるように解き，可動範囲を安全側に評価した．また，3 章で提案した張力決定法の評価として，可動範囲の体積を計算し，従来の張力決定法の場合と比較した結果，提案手法は従来手法にくらべ，最大で 46%大きい可動範囲を達成することを確認した．
第 5 章「化学繊維ロープの伸び特性」では，化学繊維ロープの複雑な伸び特性の表現として，過去最大荷重に比例した塑性伸びと線形粘弾性による伸びを直列に分解したモデルが提案されていた．従って，事前にプリストレッチを施すことで線形な粘弾性挙動となることに着目し，粘弾性パラメータを応力緩和法により測定した．その結果，化学繊維ロープの弾性係数は鋼鉄製ワイヤロープの半分程度となった．しかし，機構の関節剛性は腱の弾性係数を腱の長さで除した値として表れるため，一概に小さいとは言えない．実際，全長 10 m 試験機の腱の長さを模擬した 1 自由度試験機にて周波数応答を測定したところ，化学繊維ロープは鋼鉄製ワイヤロープと同程度の駆動帯域を実現することを確認した．
第 6 章「関節角の安定性解析と運動生成法」では，関節角の安定性解析を行った．化学繊維ロープの剛性は鋼鉄製ワイヤロープと比べても遜色ないことが 5 章で明らかにしたが，大きな張力によって大きな伸びが生じるため，2 章において導入したアクチュエータ変位制御を行ったとしてもマニピュレータの関節角が安定に収束するか自明でない．そこで，運動方程式の固有値配置から，マニピュレータ体幹を上向きにする姿勢では不安定となる機序を分析した．このような不安定な姿勢を避け，なおかつ腱の張力が設計強度を超えずに与えられた目標手先位置に到達するまでの関節角経路を計画する運動生成法を提案した．すなわち，関節角安定性の評価指標を腱弾性と重力項のバランス，張力低減の評価指標を張力最大値とし，各々の閾値を超えない関節角の経路を目標位置まで探索した．最後に全長 10 m 試作機にて探索した経路の実証実験を行い，手法の有効性を示した．
第 7 章「結論」では，本研究で得られた結果を総括し，今後の課題と展望について述べた．

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(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。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 系 機械 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 (工学) Doctor of
学生氏名： Student's Name	髙田 敦	指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	遠藤 玄 教授
		指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)	鈴森 康一 教授

要旨（英文 300 語程度）
Thesis Summary（approx.300 English Words ）

Tendon-driven mechanism with a weight-compensation using synthetic fiber ropes had been proposed as a suitable mechanical design for a long-reach light-weight manipulator. However, a 10-m-long prototype was unable to lift itself off the ground. Moreover, the instability of joints due to low joint stiffness was observed. Thus, Chapter 1 presents two research tasks. One is to improve the load capacity of pulleys guiding tendons enough to support the weight of the manipulator. The other is a control method for such a manipulator, in which big elongations of tendons occur. This research aims to demonstrate manipulation task by 10-m-long prototype.

After that, it was adopted a control scheme that the joint angles move on the potential generated by the elasticity of tendons and gravity. To propose a planning method for stable motion, research tasks were dealt with in the following chapters.

In Chapter 2, a modified pulley design with a high-strength material made the manipulator successfully support its weight.

In Chapter 3, a tension control method utilizing two mechanical features of the manipulator to reduce the tension to support the weight of a manipulator was proposed to enlarge the workspace of manipulators.

In Chapter 4, a maximum tension of tendons was used as an objective function of redundant inverse kinematics because how to solve inverse kinematics constrains the size of the workspace not only the tension control method. The tension control method in Chapter 3 was evaluated based on the workspace volume and it was shown that the proposed method expands the workspace by up to 45%.

In Chapter 5, the elongation characteristics of synthetic fiber ropes were measured using a model composed of nonlinear elasto-plasticity and visco-elasticity. The measured frequency response of the cable-pulley system showed that synthetic fiber ropes achieve comparable bandwidth to that of the stainless wire rope.

In Chapter 6, The stability of joints was analyzed using a map of eigenvalues. Finally, it was proposed the joint path planning method that keeps joint stability and tension under the design load. The effectiveness of the planning was demonstrated by the actual manipulator.

Chapter 7 concludes the thesis and describes future work.

備考 ： 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（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。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).