

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	多重チューブ推進機構の変形・動作モデルの構築と多機能化
Title(English)	
著者(和文)	竹島啓純
Author(English)	Hirozumi Takeshima
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11122号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小俣 透,鈴森 康一,吉田 和弘,遠藤 玄,石田 忠,高山 俊男
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11122号, Conferred date:2019/3/26, 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

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	竹島 啓純		指導教員 (主)： Academic Supervisor (main) 小俣 透 教授
			指導教員 (副)： Academic Supervisor (sub) 高山 俊男 特定准教授

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx. 2000 Japanese Characters)

本論文は、多重チューブ推進機構と呼ばれる配管検査補助のための柔軟な管内推進機構について、実験に依存せずに変形・動作を予測するための変形・動作モデルと、複雑な動作を実現するための多機能化手法を提案している。

本論文は全5章から構成され、第1章「序論」では、配管の検査手法を整理して管内推進機構の重要性を述べた。様々な管内推進機構について整理し、多重チューブ推進機構を他の管内推進機構と比較した。多重チューブ推進機構は柔軟なチューブを周期的に編んで接着した管内推進機構で、チューブを順番に加圧・減圧することで動作するソフトロボットの1つの形態であること、周期的な構造が工業的な製造に適しており、他の管内推進機構より安価な製造が期待できるが、これまではその設計パラメータを適用する配管にあわせて試行錯誤的に探索していることを述べた。また、過去に提案された多重チューブ推進機構は管内の前後動のみが制御可能であり、分岐管で進行方向を選択したり、先端部の姿勢を制御したりすることができなかった。そのため、多重チューブ推進機構の変形と動作を定式化して設計手法を提案したり、単純な構造のまま機能を増やしたりできれば、多重チューブ推進機構が有用な装置になると期待でき、本論文の目的を変形・動作モデルの構築と多機能化とすることを述べた。

第2章「らせん型多重チューブ推進機構の変形と摩擦力のモデル化」では、3本のチューブを伸びない芯線の周りに巻き付けた構造を持つ、らせん型の多重チューブ推進機構について変形と摩擦力をモデル化した。チューブの内圧と機構中心曲線の屈曲の関係を幾何的に論じ、チューブの内圧が機構中心曲線の振率に影響を与えないことを明らかにした。このことから機構の変形や、機構と配管との間に生じる摩擦力をモデル化した。らせん型機構の変形後の外接円直径に最大値が存在することや、機構が発生する摩擦力が配管内の機構長さが増えるほど増加し、摩擦係数に依存しない上限値に収束することを明らかにして、実験で妥当性を確認した。さらに、提案モデルをもとに希望の配管内で推進できる機構を設計するための手法を提案した。連続的に押出成形する手法を実現し、提案した設計手法を用いてガス管等に用いられる内径28 mmの25A管で推進可能な安価な管内推進機構を実現した。押出成形したらせん型の機構は初期外径が6 mm、全長が2 m程度の機構で、屈曲部や垂直部を持った25A管を通過でき、最速で8 mm/sを達成したことで多重チューブ推進機構の実用性が示された。

第3章「編みチューブ式索状機構の変形・動作のモデル化」では、加圧により膨張するチューブだけでなく、加圧により軸方向に収縮する空気圧人工筋も含めたチューブ状のアクチュエータを任意の編み方で編んだ索状機構について、汎用的に用いることのできる変形・動作モデルを提案した。まず、機構中心曲線がらせん曲線や正弦曲線を描きながら、機構中心曲線回りに捻転したり機構中心曲線を時間変化させたりする動作によって生じる、機構先端部の配管内での直進速度と角速度を導出した。導出した速度を、先行研究と比較して動作モデルの妥当性を示した。続いて、チューブ状のアクチュエータを任意の編み方で編んだ機構について、複数のアクチュエータが1本のアクチュエータで近似できることを示し、任意のチューブ状アクチュエータによって生じる変形を予測するモデルを導出した。提案した変形・動作モデルを、空気圧人工筋を編んだ編みチューブ式アクチュエータへ応用し、提案モデルによって予測した変形や動作と実験結果が一致することを確認して、本研究の第一の目的であった多重チューブ推進機構の変形・動作モデルの構築を達成した。

第4章「多重チューブ推進機構の多機能化」では、新たに多機能な管内推進装置として六つ編み型多重チューブ推進機構を提案し、実験によりその有用性を示した。まず、配管検査を目的とした管内検査機構に求められる機能を整理し、前後移動、姿勢制御、分岐管の選択的推進が必要であることを述べ、このために六つ編み型多重チューブ推進機構を提案した。前章で提案した変形・動作モデルを用いて、配管内での前後移動や姿勢制御のための動作、分岐管で選択的に推進するための推進手法を提案した。提案した動作について試作機で検証し、初期外径8 mm程度、全長120 mm程度の機構で、内径14 mmから21 mmまでの配管で推進可能であった。また内径14 mmの配管では5 mm/s程度、内径21 mmの配管では30 mm/s程度の直進が可能であることを確かめた。また、直進と回転を自由に制御できることや希望する分岐管に進入できることを確認し、配管内での作業・検査に必要なとされる機能を備えた単純な構造の管内推進機構を実現した。

第5章「結論と今後の課題」では、本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の課題を整理し、多重チューブ推進機構の実用化には、安定した製造方法と高速な加圧・減圧手法が必要であることを示した。

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 1 copy 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 機械	系 コース	申請学位 (専攻分野) : 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名 : Student's Name	竹島 啓純		指導教員 (主) : Academic Supervisor(main) 小俣 透 教授
			指導教員 (副) : Academic Supervisor(sub) 高山 俊男 特定准教授

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

This study proposes two concepts: a prediction method for deformation and motion, and the multi-functionalization of a simple structure in-pipe locomotive devices, also known as bundled-tube locomotive devices. The thesis is organized into five chapters.

The first chapter describes the background and aims of this study. A bundled-tube locomotive device comprises braided inflatable tubes; their periodical inflation and deflation with fluid power generate locomotion in a pipe. Further, a comparison between a tube device and other in-pipe devices reveals several advantages of the tube device. However, the device has two limitations—its design process requires experimental trials, and it cannot control its attitude and select pathways in a branched pipe. Therefore, this study aims to propose a prediction method for deformation and motion of a bundled-tube locomotive device and achieve a multi-functional device.

The second chapter geometrically formulates a deformation of a helical bundled-tube device. The second chapter also proposes a design and production method with an extrusion, which achieves a low-cost helical device applicable in a practical piping system. Locomotive experiments with an extruded prototype show that a bundled-tube device and the proposed design method have value for practical uses.

The third chapter extends the formulation of a helical device into bundled-tube devices with general braiding methods. The extended principle successfully describes the relationships between designs, deformations, and motions of general bundled-tube devices. Further, the principle is applied to a bundled-tube linear-rotary actuator with pneumatic artificial muscles. The conducted experiments validated that the extended principle is applicable to a bundled-tube linear-rotary actuator with pneumatic artificial muscles.

Based on the proposed formulation, a multi-functional device—a six braided-tube locomotive device—is described in the fourth chapter. The new device can individually control its position and rotation. A hook attachment and steering method, which are also designed based on the proposed formulation, enable steering in a branched pipe.

The final chapter summarizes this study. It states that the aims of this study were achieved and that future works are required to put bundled-tube devices to practical use.

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).