

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820080

研究課題名(和文)柔軟索状体の形状計測のための体内移動型計測装置に関する研究

研究課題名(英文) Mobile measurement system for flexible tube shape measurement

研究代表者

竹内 栄二郎 (Takeuchi, Eijiro)

名古屋大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：00509680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はスコープカメラなどの形状を推定するための、管内を移動する慣性計測装置を有する小型の移動体の開発が目的である。本研究の課題は、慣性計測装置の小型化と、その通信、管内の移動方式、およびその高精度化であった。慣性計測装置の小型化については、近年の通信機能付きマイコン、6軸ジャイロ、リチウムイオン電池等を利用することにより12mm程度までの小型化が可能であった。また、ジャイロの計測限界を超えずに高速に計測可能な、移動体形状を考案した。また画像による位置推定手法について実験を行い、画像検索に基づく位置推定復帰機能が有効であり、また複数地図による位置推定のロバスト化が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a compact moving body having an inertia measuring device moving in a pipe for estimating the shape of a scope camera or the like. The problem of this research was miniaturization of the inertial measurement device, its communication, the moving method inside the pipe, and its high accuracy. As for miniaturization of the inertial measurement device, it has been possible to downsize down to about 12 mm by using microcomputer with communication function, 6 axis gyro, lithium ion battery etc in recent years. We also devised a moving body shape that can measure at high speed without exceeding the measurement limit of the gyro. We also conducted experiments on image position estimation method, showed that the position estimation return function based on image retrieval is effective, and that robustness of position estimation by multiple maps is possible.

研究分野：知能ロボット

キーワード：形状計測 移動ロボット

1. 研究開始当初の背景

スコープカメラ等の検査装置は体内や装置内、倒壊家屋内等の、狭い領域の内部状態調査等、広く用いられている。申請者らは、倒壊した被災建物内の被災者を捜索するため、能動スコープカメラを開発している(図1)。これは柔軟ケーブルを繊維振動で分布的に駆動する柔軟機構であり、瓦礫内深部まで捜索することが可能である。



図1 能動スコープカメラによる瓦礫内探査

こうしたスコープカメラは、深部まで到達することが可能であるが、先端カメラの画像からだけでは先端位置もしくはケーブル形状を把握することが困難である問題があり、現在未解決である。

ケーブル形状および先端位置を推定する手法の一つとしてケーブルにセンサを多数配置し計測する方法があげられる。例えば慣性センサ、角度センサ、光ファイバ等である。これら分布姿勢センサによる計測法は、長尺化に伴いシステムが複雑になる事や、振動の影響、故障率の増大が課題であった。申請者らは、柔軟体の動力学モデルと確率的な状態推定法を併用することで、少ないセンサでの形状推定を実現したが、安定性や計算時間に課題があった[1]。もう一つの方法として、先端カメラによる姿勢推定手法があげられる。これは近年活発に行われているVisualSLAMやStructure from Motion等のカメラ画像による位置推定手法である。申請者らは先端カメラ画像による位置推定手法は、カメラ単体では本質的に困難な場合が存在することを確かめた[2]。例えばスコープカメラは狭隘空間内をカメラ近傍についた照明により照らし撮影するため、近傍と遠方の明るさが著しく異なり、姿勢推定に必要な特徴点を安定して得ることが困難であることや、壁に対面した場合等姿勢によっては、全く特徴点が得られない場合等である。一方、屋外移動ロボットやクローラ型ロボットの位置推定では、慣性センサにより姿勢を、クローラ等により並進量を計測し、これを積分することで位置を推定する、ジャイロベースドオドメトリが用いられる。これによりロ

ボットが移動することで長距離の3次元の位置および軌跡を高精度に推定できる[3]。また近年スマートフォン等への普及により慣性センサの小型高精度化が進んでおり、ジャイロベースドオドメトリによる位置推定機能の小型実装が可能となってきている。

本申請では、このクローラ型移動ロボットで用いている位置推定手法を小型実装し、チューブ内を走行できるようにすることで、長尺ケーブルの形状推定を可能にする。

2. 研究の目的

本申請は長尺なケーブル状装置の3次元形状を高精度に計測するための、長尺・小径のケーブル内を移動する小型の計測用移動体の計測装置・移動機構・通信・給電機能の開発、および、その形状推定の高速度・高精度化を実現する事が目的である。提案するチューブ内走行型形状計測装置は、図2に示すように、外壁となるチューブと、その中を走行する小型移動計測装置(以降移動体)からなる。移動体は、角速度等を計測する慣性センサと並進量を計測するセンサを有し、移動量と共に角速度を計測する。これにより、角速度および並進量を積分する事でその軌跡を計測する事が提案装置の形状推定の基本原理である。

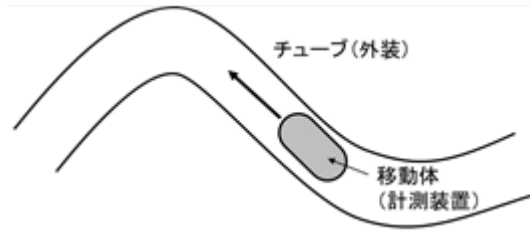


図2 体内走行型移動計測装置概要

本手法を実現するための課題として次の3点があげられる。1つめは長尺化可能な、移動体への電力の供給および通信手段の確立。2つめは移動体の駆動方法。3つめは形状を高速・高精度に計測するための手法である。電力供給、通信および移動方式は、長尺化に伴い、摩擦や損失等の課題が無視できなくなり、長尺化、小径化およびコストを両立する実現法の確立が必要である。本申請では、電力供給および通信には、有線による方法や、蓄電・蓄積による方法、ケーブル外部からの電磁誘導による方法を試みる。移動法については、空気圧やケーブルの巻取りによる方法等を試みる。

まだ形状計測の速度・精度においては、本方式は移動体が移動することで形状を計測するため、本質的に計測に時間を要する。本申請では、全体を等速で計測するのではなく更新部をと重複部で能動的に変化させることで、計測精度と更新速度を向上する手法を実現する。

3. 研究の方法

本研究は高速化、細径化・長尺化を実現する小型移動体の開発と、その位置推定手法について研究する。

小型移動体の開発としては、基本機能を検証するための給電・通信に有線を用いた計測装置を開発するとともに、形状計測精度の検証、課題の抽出を行う。無線化と小型化を進め、長尺化可能な実装法を研究する。具体的には、蓄積方式および電磁誘導方式の2方式を試みる。これにより、直径8mm以下、長さ10m以上のチューブ状の計測装置の実現を目指す。また本提案手法は形状計測に移動体を移動させるための時間が必要であり、長尺化に伴い計測時間が長くなる課題がある。また装置の開発に加えて、形状の計測精度と更新速度を向上するための手法の研究を行う。また、提案手法の有効性を検証するため、鉛直降下型能動スコープカメラを用いた能動スコープカメラでの実機検証を行う。

有線式形状計測装置の開発

有線方式では、移動体側に慣性センサを搭載し、電力および通信はケーブルにより行う。ケーブル先端方向への移動は空気圧により行い、引き戻しはケーブルを引き込むことにより行う。並進量の計測はケーブルの進行量から推定する。本手法はケーブルの摩擦から長さに限界はあるが、実現が容易であり、移動体部の構造が単純であることから小径化が望め、数m程度のスコープカメラには有効であると考えられる。

本装置により、実際に提案手法により3次元形状が計測可能であるかを検証する。移動速度と形状計測精度の関係について検証を行う。

形状更新速度および精度の向上に関する研究

形状の更新を迅速に行うための、計算法および移動体の動作法についての研究を行う。能動スコープカメラ等は狭隘空間を探索するため、先端以外の形状は障害物に拘束され大きく変化しない。そのため、先端部を重点的に繰り返し計測し、形状の更新を行う事が可能であると考えられる。本手法を実現する上で、2つの課題があげられる。1つめはケーブル全体が移動しているため、同一形状を有する部分がケーブル上では移動するという点であり、2つめは形状の変化がどこまで起こっているか不明である点である。これらに対し、計測した形状と前回の形状との重複部を調べることで同一形状を有する部分を特定し、またこれを実時間で行うことで、計測範囲をしばり、更新を高速化する。

蓄積方式

移動体内部にバッテリーや記録装置を搭載し、移動後、終端にて端子によりデータの読

み出し、充電を行う。

本方式では蓄電池および記録容量が許す限り、ほぼ無制限に長尺化が可能である。一方、終端に到達するまで形状が取得できない点や、移動体内の要素が多いため、細径化が課題である。

電磁誘導方式

チューブ外周をコイルで覆い内部を移動する移動体への給電と通信を行う。給電は外周コイルを低周波(数kHz)で発振させ、移動体内部のコイルへ電磁誘導により行う。また通信は、移動体内部の通信用コイルを高周波(数百kHz)で発振させチューブ外周コイルへ電磁誘導により伝える。

本方式では移動体を完全に密閉することが可能であるが、チューブ外周にコイルを配置するため、長尺化における損失や、通信速度、ノイズ等への対応が課題となる

4. 研究成果

基本機能を検証するための機能として、有線方式による計測装置を開発するとともに、蓄電型機構の実現に向けたデバイス選定および移動方式の検討を行った。電磁誘導方式について調査を進めるにあたり、近年小型の無線通信機能を搭載したマイコンが多数開発されたため、新たに無線通信方式による方式を検討した。小型の無線機能付きマイコンについて、入手可能なものについて設計を行い、試験を行った。幅1.2cmの移動体にバッテリー、センサ、マイコンを搭載し、直径1.5cmの外殻内を通過可能であることを検証し、無線機能搭載の超小型マイコンによる実装方式について試験を行った。図3に試験に用いたマイコンを示す。試験により双方とも通信距離については問題ないが、通信速度については状況により想定通信量を下回るため、センサ情報の内部での削減処理等が必要である。

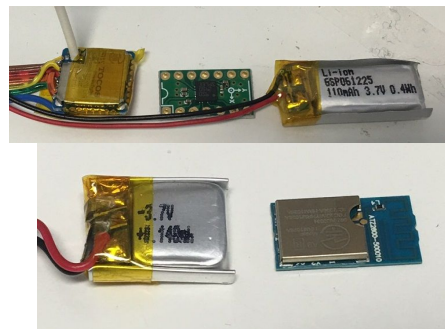


図3 試験に用いた無線通信機能付きマイコン

有線方式の実現にむけ、計測装置の挿抜試験を行った。15mのチューブを用い入線工具による挿抜試験および空気圧による推進実験等推進法について試験した。

図4に示す内径15mm長さ15mのコルゲートチューブに対し、グラスファイバー製のケーブルを用い挿入を試みたところ、侵入可能長

さは直線時 15m に、最大曲率（円形）時 5m であった。

またエアコンプレッサによる空気圧を付加し空気圧による移動を試みた。15m の移動が可能であったが、管の曲がり形状により隙間が生じ移動不可となることがあった。



図4 挿抜試験に用いた内径 15 mm長さ 15m のコルゲートチューブとケーブル挿入用グラスファイバ

長尺化に伴う形状の計測精度と更新速度を向上するため、常に最大角速度以下となるよう外殻ケーブルの曲率から、走行速度を自動的に調整する方式について研究を行った。姿勢計測に用いるジャイロスコープには、計測可能な角速度に制限があり、また角度算出における積分による累積誤差により、低速時に誤差が大きく累積する性質がある。このため管形状と走行速度、角速度の関係に着目し、直線部では高速に移動し、また大きな角速度が生じる湾曲部では減速するよう、全体にばね性を持たせ、先端部が接触するようにすることで、湾曲時に屈曲により摩擦力が増加し減速を促す仕組みを提案した。この機構では長さ等により性質が変わってくる。これに対し、シミュレーションによる有効性の検証と、曲率による速度自動調整機構の構成について試行を行った。またチューブ内走行におけるジャイロによる角度推定誤差を最小にするための、曲率による速度調整機構の提案とシミュレーション結果に基づき、実機的设计をすすめるとともに開発のための環境を整えた。実験により、シミュレーションでは安定した推力が空気圧により得られる前提をおいたが、実際のチューブでは形状変形に伴う摩擦と空気漏れにより推力が安定せず、湾曲部で減速し角速度を制限することが可能であったが、これによる負荷により移動が困難となる場合が多々見られた。このため、空気圧式の実現のためには低摩擦かつ隙間なく形状変化に対応可能な先端形状の設計が必要である。

本研究では、能動スコープカメラの位置推定

に対し、VisualSLAM による位置推定を検証し、その課題を研究動機としていた。しかしながら近年多くの VisualSLAM 実装が公開されており、そのロバスト性も年々向上しているため、その可能性について再度検証を行った。ORB-SLAM は高速に検出可能な ORB 特徴量を用いて VisualSLAM を実現する手法であり、オープンソースとして提供され現在移動体の位置推定を中心に広く利用されている。特徴として、ORB 特徴量を利用することにより過去撮影した類似画像検索が可能であり、これにより位置を見失った後であっても復帰が可能である。ロバスト性を検証する目的で、屋外環境での長距離実験を行った。実験により大部分では高精度な位置推定が可能であったが、照明条件等により失敗することが見られ、位置推定が可能であった範囲が最小で約 68% であった。これは能動スコープカメラでは照明条件や画像変化等から、より多くなると考えられる。一方、ORB-SLAM では復帰が可能であるため、同一部を通過することにより位置推定の継続が可能であった。また、複数の地図情報を用いることにより、位置推定可能範囲が 68% から 82% まで向上した(表 1)。

表 1 屋外環境における ORBSLAM による位置推定の誤差および推定可能範囲

Map	Errors (in m)			% Coverage
	Average	Std. Dev	Maximum	
Test Run 1				
Map 1	0.38	1.60	26.41	68.3
Map 2	0.19	0.53	5.62	70.1
Joint				95.1
Test Run 2				
Map 1	0.08	0.11	1.21	68.4
Map 2	0.06	0.09	1.67	80.9
Joint				82.4

< 引用文献 >

M. Ishikura, E. Takeuchi, M. Konyo, S. Tadokoro, "Shape Estimation of Flexible Cable", IEEE/RSJ 2012 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), 2012.

M. Ishikura, E. Takeuchi, M. Konyo, S. Tadokoro, "Vision-Based Localization Using Active Scope Camera- Accuracy Evaluation for Structure from Motion in Disaster Environment-", Proc. of 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, A1-5, 2010.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Adi Sujiwo, Tomohito Ando, Eijiro Takeuchi, Yoshiki Ninomiya, and Masato

Edahiro, Monocular Vision-Based Localization Using ORB-SLAM with LIDAR-Aided Mapping in Real-World Robot Challenge, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.28 No.4, pp. 479-490, 2016.
doi: 10.20965/jrm.2016.p0479

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 栄二郎 (Eijiro Takeuchi)
名古屋大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：00509680

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()