

ヘビ型ロボットの開発と評価試験

京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻

特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構

まつの ふみとし
松野 文俊

1. はじめに

本稿では、内閣府 ImPACT タフロボティクス・チャレンジ（TRC）において開発されたヘビ型ロボットについて報告する。本プロジェクトでは以下の目標を掲げて研究開発を推進している¹⁾。

【技術的目標】 脚型ロボットでは進入できない空間、かつファイバースコープでは到達できない場所へのアプローチを実現し、狭隘複雑環境への検査点検ソリューションを提供する。タフな①ヘビ型ロボット、②能動車輪ヘビ型ロボットを開発し、高い環境への適応性と耐故障性を持ち、タスク失敗の予防と復旧が可能なヘビ型ロボットのためのタフな制御システムを構築する。

【産業的目標】 タフなヘビ型ロボットや極限ヒューマンインタフェースを災害対応だけでなく、プラントの配管などのインフラ点検に適用するなど新しい応用を生み出し、産業化に貢献する。

【社会的目標】 これまでできなかったタスクを実現できるタフなヘビ型ロボットおよび極限制御システムを開発し、社会実装することにより安全・安心な社会の構築に貢献する。

本プロジェクトでは、図-1に示すような体制で要素技術を統合化し、プラットフォームロボットシステムの開発を行っている。平常時にインフラの保守点検に使っているロボットが、シームレスに緊急時にも適用できるようなシナリオを想定

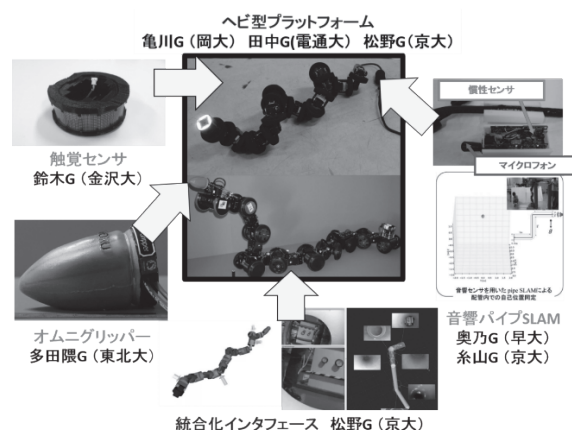


図-1 開発体制

して普及・実用化を目指している。本稿では、文献¹⁾の内容に手を加え、特に車輪を搭載していない①ヘビ型ロボットシステムの開発に関して報告する。

2. ヘビ型ロボットプラットフォーム

開発したヘビ型ロボットプラットを写真-1に示す¹⁾。

このヘビ型ロボットは、ピッチ軸とヨー軸を交互に連結して構成し3次元的な動作を生成できる。合計20個の関節数で全長約2.0m、質量約9.0kgである。関節部のサーボモータ2個につき1個のマイコンを搭載している。また、ロボットの先端付近に姿勢を計測する慣性センサが、各リンクには環境からの接触力を計測するための



写真-1 ヘビ型ロボットプラットフォーム

CoP（触覚）センサが搭載されている。ロボットの外周には、ロボットと環境との間の摩擦力を高めるために弾性変形する素材として、リング状のスポンジゴムなどが取り付けられている。ロボット全体を制御するPCや電源は外部に設置されており、これらの機器とロボットの間は有線ケーブルで接続されている。また、螺旋捻転運動時にケーブルの捩れを解消するために、ロボットの尾部にロータリコネクタを搭載している。ロボットの先頭には、カメラとLED照明を搭載しており、カメラ映像は無線通信により転送され、オペレータの手元にある端末に映し出される。

3. ユーザインタフェース

(1) 音響センサによる配管内 SLAM

配管内検査の自動化やオペレータの操縦支援のために、ヘビ型ロボットの3次元自己位置推定が不可欠である。ロボットは、本体を配管内壁に密着させるようにしながら捻転する螺旋捻転運動により、配管内壁との摩擦力を得て配管内を推進する。この際、ロボット本体が配管内面と擦れて配管内面の汚れを落とし、内面のテクスチャが大きく変化する。この結果、テクスチャに着目した光学情報に基づくVSLAM（Visual SLAM）はうまく機能しない。また、GPSや地磁気センサは、配管が電磁気に干渉するため使用できない。そこで、マイクロフォン（以下、「マイク」という）と慣性センサを搭載した音響センサモジュールをロボットの最後部に取り付け、3次元位置推定を行う。

音響センサモジュールを用いた配管内位置推定の入出力を以下に示す。

入力：1) 配管入り口のスピーカとロボット上のマイク間の配管内距離

2) ヘビ型ロボットの進行方向

出力：1) ロボットの3次元位置

2) 配管地図

入力となる配管内距離は、スピーカから再生された試験音の伝達時間（ToA）を計測し推定する。音のToA情報は、配管の形状や材質に依存しないので、頑健に入り口までの絶対距離を推定できる。

配管内のToAは、騒音、残響や反射、配管の内容物の影響を受ける。ここでは単一の気体が充满し、温度と気圧が一定であり、音速が既知であると仮定し、TSP（time stretched pulse）と呼ばれる時間解像度と高い信号対雑音比が得られる試験音を用いてToAを推定した。また、ロボットの進行方向は、慣性センサから得られる角速度と直線加速度とから相補フィルタを用いて推定した。

配管内での音の伝搬経路長であるToA情報を用いてロボット位置を推定するには、配管内をどのように音が伝搬したかを推定するための配管地図が不可欠である。現在のロボット位置が配管の中であることを利用し、自己位置推定と配管地図更新を交互に行う枠組み（図-2）を開発した¹⁾。

ロボットの現在位置と移動速度を潜在変数にもつ状態空間モデルを設計し、現在の配管地図と観測されたToAおよび慣性センサ情報から自己位置を推定した。配管地図は配管内を表す領域として定義し、ToAは配管入り口とロボットまでの配管地図内での最短距離として定式化した。設計した状態空間モデルは拡張カルマンフィルタを用いて推論した。また、推定されたロボット位置の近傍は配管内であるとみなし、その領域を配管地図に追加して地図更新を行った。本手法により、配管地図が未知の環境でも配管地図と自己位置を同時に推定でき、未知配管内の探索が可能となった。

(2) ユーザインタフェース

これまでに説明したヘビ型ロボットシステムを配管内検査に適用するために、ロボット本体の姿勢や関節角度、カメラ映像、触覚センサ情報、音響システムによるSLAM結果を統合して、オペレータに視覚的に提示するユーザインタフェース

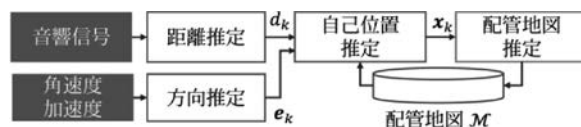


図-2 音響 SLAM

を開発した¹⁾。

開発したユーザインタフェースの全体図を図-3に示す。構成要素は以下のとおりである。

- A ヘビ型ロボットの目標形状提示画面
- B ヘビ型ロボットの現在形状提示、および接触力提示画面
- C ヘビ型ロボットの目標形状と現在形状のずれの視覚的提示画面
- D ヘビ型ロボットの先頭カメラ映像
- E 姿勢安定化後の先頭カメラ映像（常に重力方向を下側に補正）
- F 配管地図提示画面

ヘビ型ロボットが配管内を移動した軌跡をもとに配管地図が表示されている。不透明水色の部分はSLAMによって確定された配管地図であり、半透明水色の部分は確定されていない配管地図である。また、オペレータのジョイスティック入力によりスナップショット撮影が可能であり、撮影された写真は配管地図上の撮影位置に順次表示される。これにより、配管上のどこで撮影された写真なのか直感的に分かりやすくなっている。

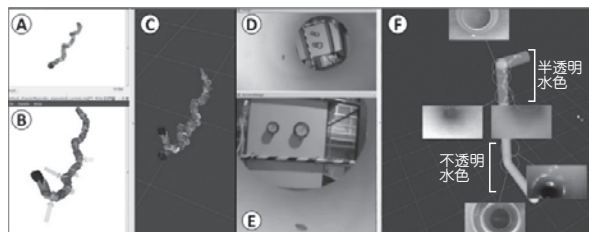


図-3 ユーザインタフェースの全体図

4. 評価実験

2018年6月15日にImPACTタフロボティクス・チャレンジの評価会が福島県浜通り地区に設置された福島ロボットテストフィールドで開催された。図-4に評価会で用いた模擬プラントの外観図と垂直配管内を移動しているヘビ型ロボットの様子を示す。配管は内径200mm、全長約15mである。経路の途中にはゲートバルブが存在しているが、これは本実験においては全開になっている。

また、2018年7月25、26日には西日本の豪雨による岡山県半田山における山崩れ現場で、全壊

した建物の調査に開発したヘビ型ロボットを投入して瓦礫内の調査を実施した。



図-4 評価実験

5. おわりに

本稿では、内閣府ImPACTタフロボティクス・チャレンジにおいて開発されたヘビ型ロボットについて報告した。現状では、ヘビ型ロボットの移動は遠隔操作により操作されている。したがって、タスクの成否がオペレータの技量に依存しており、オペレータへの負担が少なくない。今後、オペレータの負担を軽減化できる直観的で柔軟なユーザインタフェースおよび半自律制御システムの開発が必須である。また、故障診断機能と故障時やタスク失敗時の超冗長性を活かしたリカバリー機能を開発する必要がある。さらに、防塵防水機能を備えるとともに、実プラントを用いた実証実験を加速して、実運用に耐えうるシステムとしていく必要がある。

【参考文献】

- 1) 松野、亀川、竹森、田中、多田隈、鈴木、坂東、糸山、奥乃、藤原、ImPACT TRC太索状ロボットの研究開発の現状と展望、日本ロボット学会誌、Vol. 35, No. 10, pp. 720-726, 2017