(2) 索状ロボット(細径)

1)サマリー

索状ロボット(細径)は,災害時の倒壊建物やプラント点検など,従来のロボットでは進入困難な 入り組んだ狭隘空間を探査することを目的とし,駆動性能の飛躍的向上と情報収集能力の向上を実現 した.駆動性能に関して,従来の繊毛振動駆動方式に加え,空気噴射を用いたロボット先端の浮上技 術を開発し,段差踏破性能と操縦性能を飛躍的に向上させた.情報収集能力に関しては,視覚・聴 覚・触覚の感覚センシング機能を統合し,カメラ画像による瓦礫形状・先端位置の推定,音響情報と IMUによる姿勢推定,音声強調と画像認識を用いた要救助者の発見支援,および操縦を支援する接触 情報提示を実現し,福島ロボットテストフィールドで実証試験を行った.また,ロボット先端用の駆 動・センサモジュールや,細径配管内を高速に移動可能な柔軟推進機構などの要素技術や,耐久性, 携帯性と運用の容易さを考慮した浮上式能動スコープカメラの実用機の開発を行った.さらに,提案 する浮上手法を水噴射に応用した世界初の空飛ぶ消火ホースのプロトタイプを開発し,火元に突入す ることで直接消火が可能であることを実証した.



図 2-2-1 索状ロボット(細径)プラットホーム(2018.11 福島 RTF 実証試験)

- 2)技術的成果
- 2 -1) 索状ロボット(細径) プラットホーム(東北大・昆陽/田所G)
- 2-1-1)研究目的

大地震災害では,倒壊した建物内に取り残された被災者の発見と救助が大きな課題である.これまで東北大学 昆陽/田所 G では,崩れた瓦礫等の狭い閉鎖空間内の捜索を目的として,細径の索状ロボット「能動スコープカメラ(ASC)」を開発してきた.能動スコープカメラは,柔軟な索状体に傾斜のついた繊毛を巻きつけて振動させることで推進力を発生し,自走することが可能なロボットである. ImPACT TRC プログラム実施期間中も,熊本大地震倒壊建物調査(2016)や西日本豪雨災害(2018)に使用され,プラットフォームが福島第一原発1号機オペレーションフロアの瓦礫内調査(清水建設と共同,2016-2017)に使用されるなど,災害現場調査での実績を上げてきた.

この能動スコープカメラの数 cm の隙間にも進入し,入り組んだ瓦礫の奥深くまで探査可能という 他にロボットにない特長をもっている.しかし,大きな段差やギャップのある瓦礫を乗り越えること は困難であり,探査範囲は限られていた.また,従来の能動スコープカメラは先端のカメラ映像のみ を利用して,操縦および探査を行っており,ロボットの進入経路の特定や,操縦者の状況把握 (Situation Awareness)が大きな問題であった.そこで,ImPACT TRC では,新たな挑戦として,

- 飛躍的な運動性能の向上
- 情報収集能力の強化

の2点を解決することで,新しい防災・減災ソリューションを提供することを目指している.

運動性能に関しては,空気噴射によって能動スコープカメラの先端を浮上させることにより,瓦礫の段差・ギャップの乗り越え性能を大幅に向上させることを試みた.また,空気噴射の方向を制御することで,浮上しながら先端の向きを切り替え,進路の変更や,高い視点からの瓦礫の見渡しが可能

となった.このような空気噴射によって空中に飛び上がるヘビ型ロボットの実現は世界でも例がない 試みである.

また,災害現場での捜索活動に有効な情報収集を目的に,索状ロボット(細径)プラットホームとして,空気噴射を用いた駆動機構に加えて,複数のセンサ情報を統合した感覚機能統合型能動スコープカメラを開発し,各研究グループの成果を統合して実証試験をおこなった(図2-2-1).このプラットホームは,ロボット先端に視覚情報として高感度の高速カメラを搭載し,音響情報としてマイク・スピーカアレイ,触覚情報として振動センサ,慣性センサを多数搭載している.これらのセンサにより,被災者の音声強調,索状体の姿勢推定,先端カメラ映像による環境認識と自己位置推定,接触位置の推定等を行い,捜索活動を支援する統合インタフェースを開発した.このような長尺の柔軟索状ロボットにマルチモーダルなセンシング機能を実現した例は世界でも初めての例である.

2-1-2) 索状ロボット(細径) プラットホームの概要

感覚統合型索状ロボットプラットホームの概要について説明する.ロボットの基本構成は,繊毛駆動機構を巻き付けた挿入部と後方に繋がる制御用コントロールボックス,操作用 PC(図 2-2-2 左), および挿入部の挿入量と捻り操作を行う自動挿入機からなる.操縦者はゲーム用コントローラのジョ イスティックを用いて,空気噴射および挿入量,捻り角を遠隔で操作することが可能である(図 2-2-2 右).ロボットの挿入部は樹脂製のコルゲートチュープを用いており,全周に柔軟な繊毛を巻いてい る.挿入部の長さは7 m,直径 50 mm(長さ7 mmの繊毛を含む)である.挿入部チューブの内部に は,数 40 cm 毎に振動モータ及び,慣性センサ(IMU),振動センサ,スピーカ,マイクが内蔵されて いる.また,空気噴射用のエアチューブを挿入部に内蔵し,先端の空気噴射機構まで繋がっている. コントロールボックには,空気圧力の調整を行うためのレギュレータを内蔵しており,圧縮空気は外 部に接続するコンプレッサ(0.4MPa, 300 l/min 程度)を利用している.また,挿入部先端部には2 自由度の能動ノズル機構を搭載し,マイコンにより空気の噴射を自動制御すると共に,操縦者の指令 により噴射向きを変えることが可能である.



図 2-2-2 索状ロボットの外観 (左図), 挿入と操作の様子(右図)

慣性センサ,マイク,振動センサの情報は,専用のマイコンモジュールによって取得され,USBオ ーディオインタフェースとして認識される.先端カメラはUSB3.0の高速カメラを利用しており,光 変換により光ファイバを用いて制御用 PC まで送られる.操縦情報および,カメラ映像,センサ情報 はロボット用オペレーティングシステム ROS を用いて統合しており,操縦用 PC に加えて,複数の PC をネットワーク上に分散して処理を行い,情報の統合を行うことが可能である.

2 -1 -3)能動スコープカメラの駆動機構

能動スコープカメラは,索状体表面に傾斜のついた繊毛を巻きつけ,振動モータで繊毛を振動させることで推進力を発生する繊毛振動駆動機構を採用している.ImPACT-TRC で採用する繊毛振動駆動機

構は,中空のコルゲートチューブに傾斜した繊毛のテープをスパイラル状に巻き付けたもので,振動 モータおよび配線をすべてチューブに内蔵している.推進力は接触する素材にも依存するが,接触長 さ1mあたり数ニュートン程度の推進力を得ることができる.

ImPACT-TRC では, さらに飛躍的に踏破能力を向上させる手段として, 空気噴射により先端部を浮上させる方式を提案した. ASC 先端部に空気噴射ノズルを搭載し, 空気を噴射することにより, 排出した流量に応じて反力を噴射方向と反対向きに得ることで浮上する. ASC の根元から先端ノズルへはエアチューブを介してコンプレッサにより圧縮空気が送られており, 圧縮空気を 300 [1/min]程度入力した場合で, ノズル部で 3--4 [N]程度の浮上力を発生可能である. 空気浮上システムの詳細は 2-2)で述べる.

2 -1 -4)自動挿入機

また,柔軟で長尺のASC本体を瓦礫に挿入するためには,従来複数の補助員が必要であり,送り出 し量をコントロールするには,操縦者と補助員の連携が問題となっていた.本プロジェクトでは,こ の送り出し作業を自動化する挿入機の開発を行った.図2-2-3に挿入機の外観を示す.柔軟なワイヤ を用いた対向ローラによって,繊毛を有するASCでも安定して送り出し量と回転量を制御することが 可能となった.これらの制御量は,後述するASCの姿勢推定やVisual SLAMを補正する情報として有 効である.



図 2-2-3 能動スコープカメラの自動挿入機

2-1-5) 適用事例

A)福島第一原子力発電所1号機調查

能動スコープカメラのプロトタイプは清水建設との共同で,2016年4月および,2016年12月~ 2017年2月にかけて,福島原発1号機オペレーションフロアの瓦礫下の屋根構造の調査および,圧力 容器上部のウェルプラグの破損状況確認に使用された.使用された能動スコープカメラは,東北大学 で試作し,その後イクシスリサーチが製作したものである.図2-2-4に示すように,開発したシステ ムでは,クレーンでドラム型繰り出し装置を懸架し,倒壊した屋根部に穴(コア)を開けてガイドパ イプを挿入し,そのパイプから能動スコープを挿入した.この一連の調査により,カメラ映像によっ て瓦礫下のオペレーションフロア構造体及びウェルプラグ構造体の破壊状況が初めて明らかになっ た.また,線量計を内蔵し,オペレーションフロア内部の線量を確認することができた.



図 2-2-4: 懸架型垂直探査システム(左)と観察された瓦礫状況(右)((C)TEPCO)

B) 2016 年熊本地震倒壊家屋調查

2016年4月に発生した熊本地震の調査のために,旧型の振動駆動機構を搭載した能動スコープカメ ラを適用した.2016年4月23-24日に東北大学災害科学国際研究所と共同で,被害の大きかった益城町 の木造家屋の破損状況と倒壊原因の調査を行った.適用した3件の木造家屋では,屋根部の隙間や, 倒壊した1階部と2階部の隙間などから能動スコープを挿入し,内部の梁や柱の接合部の亀裂などを確 認することができた.また,能動スコープカメラの振動駆動機構の瓦礫内での有効性を確認するとと もに従来型能動スコープカメラの段差やギャップなどの乗り越え性能に限界があることも確認され た.



図 2-2-5:2016 年 4 月 熊本地震 倒壊家屋調査 (左:挿入の様子,右:確認された家屋倒壊原因の例(梁接合部の断裂))

C) 2018 年岡山市半田山土砂崩れ倒壊家屋の調査

2018 年 7 月の西日本豪雨災害によって岡山市半田山で発生した土砂崩れにより倒壊した木造家屋 の内部調査を 2018 年 7 月 25-26 日に ImPACT の索状ロボットの他のグループともに実施した.本調査 では,家主の依頼のもと,瓦礫内に取り残された貴重品の捜索を目的に行った.この災害調査では, 7m の空気噴射型能動スコープカメラのプロトタイプを適用した.図 2-2-6 に示すようにまずパイプを 用いて能動スコープカメラを挿入した.複数の試行の結果,家屋内に最大 5 m 程度進入し,従来不可 能だった大きな段差やギャップの乗り越えが可能であることが確認された.屋内の破損状況が激し く,貴重品の発見には至らなかったが,空気噴射の有効性を確認することができた.また,事故現場 では 2 次倒壊の可能性もあることから,状況によっては遠隔による操作が求められることが明らかに なった.さらに,コンプレッサの運搬も運用性を考えた場合に問題となることがわかった.



図 2-2-6: 2018 年 7 月豪雨災害: 岡山市半田山土砂崩れによる倒壊家屋内の調査 (左側:パイプを用いた挿入の様子,右側:踏破できた瓦礫の例)

以上の,熊本地震,半田山での倒壊家屋調査の経験を踏まえて,ImPACT TRC では,能動スコープ カメラ実用機の設計・開発を行った.

2-2)空気噴射を用いた浮上型能動スコープカメラ(東北大・昆陽/田所G)

2 -2 -1) 概要

- 倒壊家屋内の捜索や調査を目的として,空気噴射ノズルを先端に搭載した空気浮上型能動スコープカメラを開発.段差踏破性能と操縦性能を飛躍的に向上.
- > 安定に浮上するための噴射方向制御方法の開発
- > 噴射方向を制御可能なノズルの開発
- > 浮上により高い視点から見渡せるため,状況把握や要救助者発見がはるかに容易に.

2 -2 -2)研究背景

熊本地震や阪神淡路大震災に代表される大規模地震災害では,倒壊した建物内に取り残された人の 発見と救助が大きな課題である.これまで,狭い瓦礫内に進入して被災者を捜索することを目的と し,索状(ヘビ型)ロボット「能動スコープカメラ」を開発してきた.このロボットはこれまで,建 設現場倒壊事故,熊本大地震,福島第一原発1号機の瓦礫内調査(2017年3月30日東京電力発表) に使用されるなど,災害現場調査での実績を上げている.しかし,これまでの能動スコープカメラ は,高い障害物や瓦礫を乗り越えることが難しく,捜索範囲を拡大するための大きな課題となってい た.

そこで,今まで瓦礫の中を這うことしかできなかったヘビ型ロボットの先端から空気を噴射して浮 上する機能を搭載し,瓦礫を飛び越えたり,飛び上がって広く見渡すことを可能にする技術を開発し た(図 2-2-7).特に,単純に空気を噴射するだけでは,柔軟な索状ロボットを安定して浮上させることは困難だったが,浮上安定化のための噴射方向の制御技術と,噴射方向を制御できるノズル機構の 開発により課題を解決した.



図 2-2-7: 左:空気浮上型能動スコープカメラ,右:システムの概要.根本からコンプレッサで高圧 空気が送られ,ノズルから高速で噴射する.

2 -2 -3)安定浮上手法の開発

制御なしに先端ノズルから空気を噴射した場合,ロボット先端は後ろ向きに反り返って暴れてしまう.これを防ぐためには,空気の量をロボットの根本で制御して噴射力の大きさを変える手法がありうる.しかし,空気は非圧縮性流体であり,長尺なロボットでは応答に時間遅れが生じてしまい現実的ではない.

そこで,本プロジェクトでは空気の噴射方向を制御して,先端を安定に浮上させる方法を提案した.具体的には先端からの空気の噴射方向を重力に対して一定の向きにし続ける制御手法である.本 手法は非常にシンプルなため,機構などを用いて簡単に実装することが可能である.モデルを用いた 数理的な検証によって,本制御手法で安定浮上できることが示された.

2 -2 -4) 噴射方向可変ノズルの開発

本プロジェクトでは,上述した安定浮上制御を実現するために,二種類の噴射方向可変ノズルを開発した.軽量でシンプルに実現できる受動機構を用いたノズル(図2-2-8 左)と,状況に応じた制御を可能にするためにモータを用いて2自由度で方向可変の能動ノズル(図2-2-8 右)である.



図 2-2-8: 左:受動機構を用いた浮上.ワイヤによって先端の姿勢が拘束され,噴射方向を重力方向に対 して一定にできる.右:二自由度で方向可変の能動ノズルを用いた浮上.モータにより噴射方向を制御す る

2 自由度能動可変ノズルは,ノズル先端に柔軟なチューブを接続し,柔軟チューブを滑らかに変形 させることによって二軸方向への噴射方向制御を実現する(図2-2-9).一般に流路の方向を変えるに は1軸回転自由度を持つスイベルジョイントと呼ばれる機構が用いられてきたが,この機構は流路の 圧力損失が大きく,流量を多く流せない欠点があった.そのため,本プロジェクトでは柔軟チューブ を用いたメカニズムを新たに開発した.なお,チューブ径はコンプレッサの制約下で得られる噴射反 力をできるだけ大きくするように,数値計算のもとで決定した.

柔軟チューブの変形は,図2-2-10のように差動機構を用いて実現した.差動機構の幾何パラメターはできるだけ小さいのが望ましいが,一方でサイズが小さくなるとチューブが座屈する可能性があ

る.本プロジェクトでは柔軟チューブをモデル化することで座屈を防ぐ設計手法も開発した.これら をもとに実際に製作したノズルを図 2-2-11 に示す.外径は約 50mm であり,ノズルはロール方向に無 限回転可能である.基礎実験を行い,ノズルの角度を制御して噴射方向を制御できること,圧力一定 で噴射方向を変えた場合,噴射力は1割程度しか変わらない(流路の形状変化による圧力損失が少な い)ことを確認した.これらの結果はロボット分野有数の査読有り国際学会 IROS2018(IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems)にて発表した.



図 2-2-9: 柔軟チューブを用いた噴射方向の制御.ノズル出口に柔軟チューブを固定し,柔軟チューブ 先端を二軸回りに回転させることで噴射方向を変化させる.



図 2-2-10: 差動機構を用いた柔軟チューブの変形.左右の傘歯車を同方向に回転させることで柔軟チュ ーブがロール回転し(赤矢印),逆方向に回転させることでピッチ回転する(緑矢印).



図2-2-11: 製作した2自由度能動ノズル

2 - 2 - 5) 運動性能の向上

A)段差乗り越え機能

受動ノズルを搭載した能動スコープカメラを用いて,段差踏破の実験を行った.先端を浮上させる ことで段差に乗り上げ,乗り上がった後に後続部分を噴射で引っ張り上げることで段差踏破能力が向 上した.最大踏破可能高さは 200mm であり,従来のマッキベンアクチュエータなどで先端を屈曲させるスコープカメラでは 50mm の段差も上ることができなかった(図 2-2-12).



図2-2-12: 先端浮上による高さ200mmの段差踏破の様子

B)方向制御機能

空気の噴射の方向を左右に切り替えることで,横方向の力を先端に加えて先端の方向を大きく変化 させることが可能となった.マッキベンアクチュエータなどで先端を屈曲させる従来の方法と比べ, 素早く先端の方向を制御することが可能となった(図2-2-13).90度回転するのに従来型では26s程 度必要であったが,1.6sに改善された.

C)高い視点からの見渡し機能

先端が浮上して方向切り替えすることにより,先端のカメラであたりを見渡すこと可能となり,が れき内部の状況を把握しやすくなった.



図2-2-13: 噴射方向切り替えによる方向切り替え

これら3点の運動性能の改善により,図2-2-14のような最大高さ200mm程度の入り組んだ瓦礫環 境も踏破することが可能となった.これらの結果はロボティクスの有力雑誌への投稿準備中である



図2-2-14: 木片瓦礫環境を踏破する様子

2 -3) 視覚 SLAM (東北大・岡谷G)

2-3-1)概要

ASC を瓦礫等の閉空間に挿入し,その内部を探査するとき,先端部カメラから送られてくる映像だけでは,内部の3次元的な様子やASC 先端部がどのような経路をたどって進んだかを知ることは難しい.この問題を解決するため,先端部カメラからの動画像を主な入力に視覚 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)を行う方法を開発した.ASC の機構的な性質とその適用環境の制約から,視覚 SLAM の実行を難しくするいくつもの要因があった.特に,ASC が狭隘空間で利用されることから,カメラが常に対象に近く,そのために動画像でのフレーム間の画像変化が大きくなる傾向があることが最大の障害であり,また,ローリングシャッタ歪みやモーションブラーなどの問題もあった.これらを一つずつ解決する要素技術を開発することで,ASC の映像からこれを挿入した狭隘空間の内部の3次元地図とASC 先端部の移動軌跡を計算・可視化できるシステムを実現した.TRC のフィールド評価会において,現実の瓦礫や倒壊家屋を再現したテスト環境で繰り返し実験を行い,安定して動作することと,システムの有用性を確認できた.

2-3-2)成果

A) ASC への視覚 SLAM の適用

能動スコープカメラ(以下 ASC)によって,閉じた狭隘な空間の内部を,外部から安全に探査できる.しかし撮影される動画像を見るだけで閉空間内部の大域的な3次元形状を把握することは,それ ほど簡単ではない.短時間で撮影された画像系列がカバーする空間の範囲はわずかであり,空間内部 の全体形状をイメージするには,挿入開始時から目を離すことなく動画像を観察し続ける必要がある 上,それが可能であったとしても,そのイメージを他者と共有することは難しい.この課題を解決す るため,閉空間内部の3次元構造を,視覚 SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)---カメ ラを移動させつつその空間を撮影した動画像を元に,同空間の3次元形状およびをカメラの運動を推 定する方法---によって解決することを考えた.ASC のペイロードを考慮すると,単一のカメラのみを 必要とする視覚 SLAM は,上述の課題を解決し得る数少ない現実的な解であると言える.

B)技術的課題

視覚 SLAM の技術自体は長い研究の歴史があり,いくつかの実用的なシステムが開発されている.しかしながら,ASC の実運用を考えた場合,それにそのまま適用可能な既存の視覚 SLAM の方法は存在しなかった.先端部のカメラが撮影する動画像において,連続する画像フレーム間での画像変化が大きく,速く変化しやすいことが理由である.より詳しく述べると,

- ASC は閉所の狭隘な空間を対象に利用されるため,広く開いた空間で利用する場合に比べ,カ メラから空間の物体表面までの距離が短くなり,画像の時間変化が大きくなる傾向がある.
- ASC 先端部は時折,急な動きを見せることがある.例えば ASC 先端部が平面上をすべりながら 移動した後,そこから滑り落ちる場合や,空気浮上により地上から離陸した後,壁や天井に衝 突する場合などである.

一般に速く大きい画像変化は,視覚 SLAM にとって障害となる.視覚 SLAM の処理のパイプラインの 最初のステップは,特徴(例えば点)を動画像の異なるフレーム間で対応づけることである.このス テップの成否が,視覚 SLAM 全体の成否を左右する.

この他にも視覚 SLAM を困難にする要因がいくつかある.モーションブラーとローリングシャッタが 誘発する画像の幾何学的な歪みがその筆頭に挙げられる.モーションブラーは,カメラの動きによっ て生じる映像のブレ,すなわち,カメラのシャッターが開いている時間内にカメラが動くことで,撮 影される映像に生じるボケのことである.ローリングシャッタ歪みは,ローリングシャッタを備えた カメラが画像フレーム 1 枚を撮影する間の速い動きをするときに生じる.ASC 搭載カメラの場合,特 に問題になりやすい.最近,性能のよいグローバルシャッタカメラが入手可能になってきたが,ロー リングシャッタカメラはその設計上の特性から,低照度環境での画質の面で有利である.ローリング シャッタカメラはこの点で依然として有用であり,その場合,ローリングシャッタ歪みを適切に処理 することは重要である.

C)技術的成果

適応的フレーム選択により実時間性と頑健性を両立した視覚 SLAM の開発

画像変化が急峻で大きい場合の単純な解決策は,フレームレートの高いカメラ(高速カメラ)を使用することである.高速カメラを利用すれば,フレーム間の画像変化はフレームレートの高さだけ小さなものとなり,上述の困難さから解放される.ただしその場合,視覚 SLAMの実行速度が新たなボトルネックになる.最近の視覚 SLAMのシステムは,高性能なデスクトップ PC を用いた場合,毎秒 10 から最大 50 フレーム程度の速度で実行可能である.この速さを超えるフレームレートで画像を取得しても,すべての画像を実時間で処理することはできない.

そこでわれわれは,実時間実行の厳密な制約を緩めることとした.ASC で視覚 SLAM を用い,空間の 構造やカメラの移動軌跡を計算し表示できるようにしたいのは,ASC を閉空間内でよりうまく操作で きるようにすることにある.ヒューマンインタフェースとしての有用性があればよく,一定の時間遅 れは許容される.このような制約と条件を考慮して,高フレームレートで撮影される画像列から,適 応的に必要な画像を選択し,視覚 SLAM を実行する方法を新たに開発した.基本的な考え方は,平常時 は,高フレームレートで撮影された画像すべてを使う必要はないが,カメラが一時的に,激しい動き をする「非常時」のみ,高フレームレートで撮影された画像を必要に応じて用いる,というものであ



図2-2-15: 適応的フレーム選択の概念図.



図2-2-16: フレーム選択の効果(赤:あり,青なし).

る(図 2-2-15). 具体的には,視覚 SLAM が正しく動作している限りは,n:1 の比率で画像フレームを 間引いて使用する.残りのフレームは使用しないが,PC 内部でリングバッファに記録される.もし視 覚 SLAM が失敗した場合,具体的にはランドマークの追跡に失敗した場合は,最後に成功したフレーム に戻るとともに,リングバッファに記録されている「その次の時刻」のフレームを使って,ランドマ ークの追跡を再試行する.この試行がうまくいった場合は,失敗した瞬間のフレームに戻り,再試行 する.この再試行が成功した場合には,n:1 の比率での間引きを行う通常のモードに戻り,以降の処 理を継続する.図2-2-16 はこの処理の効果を検証した実験結果である.この図は,ある空間内でカメ ラを移動させて得られた画像系列に対し視覚 SLAM を 100 回動作させたとき,この画像系列を時間方向 に10 等分した各箇所でそれぞれ,この 100 回の試行中,何回成功したかを数えたものである.フレー ム選択により,視覚 SLAM としての頑健性が向上していることが見て取れる.

ローリングシャッタ歪みに頑健な視覚 SLAM の開発

また,ローリングシャッタ歪みに対策を施した視覚 SLAM の新たな方法を開発した.この方法の技術 的な核は,ローリングシャッタ歪みを,カメラの光学系を基準とする座標系の各軸まわりの微小回転 角をパラメータによって表現し,さらにこれを仮想的なカメラとして近似的に表す定式化にある.こ の定式化により,従来不明だったローリングシャッタ歪みを考慮した視覚 SLAM の臨界運動(critical motion sequence)の理論的な導出に成功した.臨界運動とは,問題が縮退し,解が求まらないカメラ の特定の運動を言う.この検出と対策を考案したことで,ローリングシャッタ歪み下でも安定して高 精度に視覚 SLAM を実行できるようになった.詳細はサイバー救助犬の項目で記述する.

モーションブラーの除去

視覚 SLAM や画像認識など,その他の課題解決のため,画像からモーションブラーを除去する技術を 開発した.この手法は,深層ニューラルネットワークを用いるもので,各種ベンチマークテストで世 界最高水準の精度と計算量の小ささ(ネットワークの小ささ)を両立している.同一の手法の枠組み で,TRC が想定する利用環境・状態で問題になる様々な画像劣化の要因,画像のノイズ,雨筋,霧, (レンズ表面などに付着した)雨滴などを対象に,これらを除去する技術を開発した.こちらについ ても詳細は,サイバー救助犬の項目で記述する.

オフライン動作による ASC 撮影画像からの空間の 3 次元構造の復元

上では,ASC の撮影画像から ASC 特有の困難さを解決しつつ,視覚 SLAM を実時間で動作させる技術 を述べた.視覚 SLAM では,空間の3次元構造は疎なランドマークとして表現され,それだけで3次元 構造を把握するのは若干難しい.理論上は,ランドマーク(画像上の特徴点)を増やせばそれだけ, 形状の見易さが向上し,問題が改善されるが,それには計算時間の増加を伴うことから,実時間動作 が難しくなる.もし,オフラインでの計算を許容すれば,ずっと密な形状を復元できる.具体的には, 上述の方法で ASC の撮影動画から実時間で復元したカメラの運動と疎なランドマークをベースに,オ フラインで数分オーダの時間をかけて PC 上で,ランドマーク数を増加させる計算を行う.

処理時間は数分程度で済むので,現場での利用も十分可能である.例えば,倒壊家屋に ASC を挿入し,内部の詳細な状況を掴み,救助の計画を立案する場合や,屋根裏などに ASC を挿入し,そのメン テナンスに役立てるなどの利用方法が考えられる.結果の一例を図 2-2-17 に示す.図の左は ASC の動 作環境を外部のカメラで撮影したもので,建物の屋根裏部分に ASC が挿入されている様子である.こ の環境を移動した ASC の画像から,図の左(視点を変えてレンダリングした 3 枚の画像)にあるよう なある程度密な点群からなる 3 次元形状が復元できる.



図2-2-17: 左: ASCを実験した環境.右: ASCの映像からオフラインで得た空間の3次元形状.



図2-2-18: フィールドでのテストの様子.上段がASCの撮影画像の例.下段はその画像撮影時の 実時間復元結果.赤い線がASC先端部の移動軌跡を,点群が空間の構造を表す.

2 -3 -3)評価

TRC のプロジェクトにおいて毎年2回実施してきたフィールド評価会において,上記技術を何度も繰 り返しテストしてきた.上述の要素技術の開発と,その他の様々なノウハウや細かい技術等を積み重 ね,実際の瓦礫環境において安定動作するシステムを完成できた(図2-2-18).同フィールド評価会 で繰り返し実験し,公開の場でのデモンストレーションを含め,常に安定動作することとシステムの 有用性を実証できた.

2 -4) 聴覚(姿勢推定,音声強調)(早稲田大・奥乃/産総研・坂東G)

2 -4 -1) 概要

瓦礫中のロボットの姿勢を推定・可視化するため,GPSや地磁気センサの使えない瓦礫環境下で頑 健に動作する音響・慣性センサアレイを用いた姿勢推定を確立した.また,自身の駆動音で聞き取り づらくなる被災者の音声を強調するため,一部のマイクロフォンが障害物で遮蔽されても頑健に動作 するロバスト非負値テンソル分解に基づく音声強調を開発した.

2 -4 -2)技術的成果

極限音響グループでは,細索状ロボットの聴覚機能として以下の2つの技術を開発した:

- 1. 音響センシングに基づく姿勢(形状)推定: 瓦礫中の見えないロボットの姿勢を推定・可視化する ことで,ロボットの自動操縦化やオペレータの操縦効率化が期待できる.
- 2. 低ランク・スパース分解に基づく音声強調: 自身の駆動音で周囲の音が聞き取りづらくとも, 混 合音から音声のみを抽出することで, 効率的な被災者の捜索が期待できる.





図2-2-19: スピーカ,マイクロフォン,慣性セン サを複数搭載したプロトタイプ細索状ロボット (約3m).

図2-2-20:姿勢推定結果例(灰:正解,赤:推定結 果).

音響センシングに基づく姿勢推定は, 瓦礫環境でも頑健に動作するリアルタイムシステムを目指し研究・開発した. 瓦礫環境ではGPSや地磁気センサが使用できないため, これまで慣性センサ(加速度・ジャイロセンサ)に基づく推定法が開発されていたが, 突発的な姿勢変動やセンサノイズ等に起因する姿勢の推定誤差が蓄積する問題があった.本プロジェクトでは, ロボットにマイクロフォンとスピーカ, 慣性センサを複数搭載し(図2-2-19), これらを相補的に統合して瓦礫環境での頑健性を確保した.スピーカから発した試験音が各マイクロフォンへ到達する到達時間差を用いて, 姿勢の推定結果に含まれる誤差を抑圧する.本手法は, ロボットの姿勢とセンサの観測値の関係を記述する状態空間モデルを設計し, その事後分布を逐次推論することでオンライン動作を実現した.また, 瓦礫環境下でも頑健に音の到達時間差を計測するため, 本プロジェクト以前から開発していた, 残響・反射に強い一般化相互相関関数の一種であるGCC-PHAT, 高い信号対雑音比を得やすいtime stretched pulse(TSP)を用いる推定法を採用した. 瓦礫によって音が迂回して伝搬することで到達時間差に誤差が生じることがあるが, 外れ値除去により障害物存在下での頑健性を得た. 音の到達時間差情報に加速度センサから得られる傾き情報を統合することで, 障害物存在下でも頑健な姿勢推定を実現した(図2-2-20).本研究は, 査読付き国際会議で1件発表しているほか, 日本機械学会若手優秀講演フェロー賞, IEEE SSRR 2015 People's Choice Demo Awardを受賞している.

さらに本姿勢推定は、ジャイロセンサと統合し、音響センサで生じる鏡対称な姿勢の曖昧性を解消 しつつ、慣性センサだけでは徐々に増加する姿勢の推定誤差を一定以下に抑圧する拡張を行った、慣 性センサの推定誤差と姿勢を潜在変数として持つ状態空間モデルを設計し、音響センサと慣性センサ の観測から2つの潜在変数を同時推定することで、慣性センサの累積誤差を補正するマルチモーダル 姿勢推定を実現した、ジャイロセンサと加速度センサの値は、低計算量かつ高性能な相補フィルタの 一種であるMadgwickフィルタを用いて事前に統合することで、姿勢モデルのモデル誤差の影響を最小 限にしている、音響・慣性センサの観測とロボットの姿勢との関係は非線形であるが、Unscented Kalman filter (UKF)を用いたオンライン事後分布推定を行うことで、リアルタイムな姿勢推定を実 現した.

また,インサーター装置を用いた効率的な姿勢推定法も確立した.田所・昆陽グループが開発した ロボットを自動挿入するインサーター装置と統合し,インサーター装置から得られる「ロボットの挿 入量」から,現在挿入されている部分を推定する方式を開発した.挿入口がつねに同方向に向いてい ることを利用して,挿入口の直前の慣性センサ方位を初期化することで,インサーター装置から見た ロボット先端の相対位置が推定可能になった.さらに,この慣性センサ初期化法を用い,ロボット挿 入時から姿勢推定を開始することで,姿勢の初期形状を与えなくとも現在の姿勢・ロボット先端位置 を推定できるようになった.

姿勢推定システムは高い移植性を持つように設計・実装した.ロボット上のセンサの数や順番・間 隔といった設計パラメータとは独立に姿勢モデルを構築した.例えば,図2-2-19のプロトタイプロボ ットと感覚統合型ロボットでは各センサの個数やロボット長が異なるが,これら設計パラメータを設 定ファイルに記述するだけでシームレスに動作する姿勢推定システムを実現した.また,姿勢推定ア ルゴリズムはrobot operating system (ROS)のノード群として実装し,高い移植性を確保した.特 に,観測モデルや姿勢モデル,UKFによる推論アルゴリズムはそれぞれ独立したC++ライブラリとして 記述し,これらをPythonを用いて組み合わせる方式を採用した.中核プログラムをC++で実装するこ とにより,i7 8550U (1.8GHz,4コア)といった一般的なノートパソコン上でリアルタイムに動作す る.ROSとPythonを用いて容易に修正・拡張できるソフトウェアパッケージとして整備したため,姿 勢推定システムは田所・昆陽グループの自動操縦システムへの応用や, 昆陽グループの姿勢・触覚可 視化システムの実装などに, ソースコードのコア部分を殆ど修正せず拡張されている.このように, 姿勢推定の専門的知識がなくとも, 様々なタイプのロボットで姿勢推定が可能となった.

低ランク・スパース分解に基づく音声強調では、少ない事前情報で頑健に動作するシステムを目指 し研究・開発した.細索状ロボットの録音信号に含まれる走行雑音は、主に振動モータの駆動音と地 面との接地音が含まれるため、使用環境により走行雑音が大きく異なる.本プロジェクトでは、事前 に雑音信号の学習データを収集せずとも雑音と音声を分離・抽出できるブラインド音声強調法を開発 した.雑音スペクトログラムの低ランク性と、音声スペクトログラムのスパース性に着目し、低ラン ク・スパース分解法によるブラインド音声強調法を開発した.低ランク・スパース分解法の一種であ るオンライン・ロバスト主成分分析法 (ORPCA)を各チャネルに適用し、これらの結果からMedian処理 で共通成分を抽出することで、突発性雑音に強い音声強調法を開発した (図2-2-21).特に、本手法 は振幅スペクトログラム領域で動作するため、ロボットの駆動に伴ってマイクロフォンの配置が変化 しても、頑健に音声を強調できる.本研究は、査読付き国際論文誌に1報掲載されたほか、査読付き 国際会議で1件発表し、情報処理学会 第77回全国大会 学生奨励賞・大会奨励賞およびIEEE SSRR 2015 Most Innovative Paper Awardを受賞している.



図2-2-21: ORPCAによるオンライン・多チャネル音声強調の概要.

さらに,一部のマイクロフォンが遮蔽されても頑健に動作するロバスト非負値テンソル分解(RNTF) に基づく音声強調を開発した.ORPCAに基づく方法では,すべてのチャネルをMedian処理により同等 に扱って統合するため,一部のマイクロフォンが遮蔽されると大きく性能が低下する問題があった. そこで,各マイクロフォンの音声音量を同時推定する強調法を確立し,半分程度のマイクロフォンが 遮蔽されても頑健性を維持できるようになった.ORPCAは低ランク成分とスパース成分に負値を許す ため,多チャネル信号を統合して音声音量を推定することが困難だったが,各成分に非負性を導入し たロバスト非負値行列因子分解(RNMF)モデルを定式化し,これを多チャネル観測に拡張することによ って,低ランク・スパース分解と音声音量を同時推定できるようになった(図2-2-22).また,図2-2-23に示すように,推定された音声音量を用いることで,前方・後方といった粒度で音声(被災者)を定 位できることが示唆された.本手法は,査読付き国際論文誌に1報,査読付き国際会議で1件発表し た.

RNTFに基づく音声強調はミニバッチ型の時系列モデルに拡張し、レイテンシ3.4秒程度のリアルタ イム動作を実現した.全てのチャネルを一挙に扱うため計算量が増加するが、組込GPGPUボードの一 つであるNVIDIA Jetson TX1 (図2-2-24)上で並列処理することで、計算時間を短縮した.ミニバッチ サイズを2秒程度確保すれば、オフライン法と同程度の性能が得られた.また、本システムはROSノー ドとして実装され、センサ・インターフェースであるRASP-ZXを姿勢推定や触覚システムと共有して 動作する.本手法は評価会を通してリアルタイム音声強調法としてその性能を実証した.



図2-2-22: ロバスト非負値テンソル分解モデルの概要.

0.0

図2-2-23: 遮蔽なし(上)と、後方4 本が遮蔽された場合(下)の推定音



図2-2-24: 組込GPGボード (右下)に 実装した音声強調システム.

図2-2-25: 飛行雑音とTSPを含んだ混合音(左上)および、 RNTF(左下),SB-RNTF(右上),SB-CRNTF(右下)による強調結 果.

また,空気浮上する感覚統合型ロボットへ対応するため,半教師あり・畳込み型強調法の開発を行 った.本ロボットは空気ジェットの強い飛行雑音を発する上,姿勢推定の試験音(TSP)を常に再生し ている.低ランク成分(雑音)の事前分布を事前に収録した飛行雑音から構成する半教師あり強調(SB-RNTF)へ拡張した.事前分布として与えることで,観測に対し適応的に雑音を推定できる.一方,TSP 信号は時間方向に大きく変動し,低ランク性が低くスパース性が高いため,低ランク・スパース分解 での除去が困難であった.この問題を解決するため,時変な雑音信号を扱える畳み込み型非負値行列 分解モデルを導入したSB-CRNTFを開発し,低ランク性の低い不要音も除去できるようになった(図2-2-25).

2 -5)音声強調(東大・猿渡G)

2 -5 -1)目的

品質に重点を置いた音源分離・強調システムを開発し, 被災者とのテレコミュニケーションを実現 する.そのために,索状ロボット上の位置不定マイク群を用いてブラインド音源分離によるロバスト な目的音・妨害音分離を実現する.また,ブラインド音源分離と連結された統計的音声推定器(ポス トフィルタ)によって被災者音声明瞭化する.さらに,発話区間自動推定・空間情報復元を行い,極 限状況テレコミュニケーションおよび遠隔オペレーションの支援システムを実現する.

2 -5 -2)提案する音源分離システム

A) ブラインド音源分離ブロックの開発

空間モデルを線形時不変フィルタ,音源モデルをNMFモデルで表す「独立低ランク行列分析(ILRMA)」 を独自に提案し、その性能向上について検証をおこなった.特に、分離精度を向上させるため、高次 統計量制御ポストフィルタによって高精度に強調された音声の周波数別時系列スパース度合を再度 ILRMAへ反映させる「音源モデル適応処理」を数理的に整理し , それを二段階最適化問題としてとら えて効率的かつ安定に解を求める手法を開発した(図2-2-26).

B)統計的音声強調ブロックの開発

まず,第一に,ILRMAにおいて解決不可能な空間の時変性を補償するため,二次統計量に基づくノイ

ズキャンセラを適用して残留雑音を低減する手法を開発した.第二に,高次統計量とキュムラント変換を用い,雑音下においても目的音声の事前分布を高精度にempirical推定するアルゴリズムを開発した.また,そこで求められた事前分布に基づき,目的音声を一般化最小二乗誤差振幅推定器によって抽出するポストフィルタを完成させた.

C) 極限状況テレコミュニケーション・遠隔オペレーションブロックの開発

上記で開発されたポストフィルタに関し,遠隔オペレーション時の品質を向上させるため,雑音カー トシスをなるべく変動させないパラメータを探索し,それを導入した.また,その品質向上度合いを 評価するため,主観評価実験を実施した.さらに,索状ロボットに隣接配置された2マイク別に上記 信号処理を行い,その空間情報復元の評価を行った.

D)カートシス比不動点聴覚品質制御の実装

独立低ランク行列分析(ILRMA)及び空間時変性補償(ノイズキャンセラ)ブロックを基盤システム とし,一般化MMSE-STSA推定器に基づく統計的ポストフィルタを継続接続するシステムを実装した. 本手法では目的音声の事前分布としてカイ分布を導入しているが,その形状パラメータ及び事前SN比 のバイアスパラメータに関し,ミュージカルノイズ発生の少ないパラメータの探索及び決定した.

E)発話区間検出・空間情報復元処理の実装

上記のポストフィルタ出力に基づき発話区間を検出する処理ブロックを実装した.更に,上記ポスト フィルタ出力を多チャネルへ拡張し,それを両耳共通ゲイン化することにより,空間情報を復元可能 な処理ブロックを実装した.



図2-2-26: 音声強調の全体システム概観

図2-2-27: ポストフィルタ方向定位実験結果

2 -5 -3)システムの評価

提案する音源分離システムの聴覚品質を評価するため,細径索状ロボットにて収録されたインパル ス応答及び実エゴノイズを用いたシミュレーション実験を行った.本索状ロボットは東大・筑波大・ NIIグループ独自に試作した8マイクアレーシステムである.ここでの比較対照法は,(a)補助関数型 IVA,(b)単独のILRMA,(c)ILRMAに空間時変性補償(ノイズキャンセラ)を付与したもの,(d)前記(c) に統計的ポストフィルタ(空間情報復元付き)を継続接続したものである.分離抽出された音声の品質 評価尺度として,主観評価値(実際に複数人に聞いてもらって好みの音を選ぶ2対評価テスト)を用い た.本主観評価は,大きいほど良い音質であることを表す.本実験結果において,単独のIVA(a)及び ILRMA(b)は約50%,ILRMAにノイズキャンセラを繋いだもの(c)は60%,前記(c)に統計的ポストフィル タを継続接続したもの(d)は90%のpreferencescoreを達成した.これにより,従来法に比べ,提案ア ルゴリズムの音質が聴感的にも改善されていることが示された.

更に,空間情報復元品質に関しても評価を行った.このベイズ型音声振幅スペクトル推定器を ILRMAの両耳定位保持ポストフィルタとして実装し,実機によって性能評価を行った.図2-2-27に実 験結果の一例を示す.本実験では,適当に配置された8個の位置不定マイクによって音源分離を行 い,その内の2個に空間情報を付与して受聴者へフィードバックし,受聴者による主観評価によって 左・中央・右側にある分離音声音源の方位を解答させた.一般に,統計的ポストフィルタの付与によ ってSN比は向上するものの位相情報の破壊に伴い両耳定位感は損なわれるが,本提案ポストフィルタ では定位感まで回復されていることが分かる.

最終的に,上記全ての信号処理ブロックを細径索状ロボットに実装し,処理時間約30秒程度のバッジ処理で救助オペレータへ分離音声・分離音時間区間・方向感を提示するシステムを完成させた.また,方向定位のデモも併せ,フィールド評価会にて公開した.

2 -6) 画像認識システム(信州大・山崎G)

2 -6 -1) 画像認識システムの目的

本研究の目的は,被災現場における活動を補助するための画像認識システムの構築である.遠隔移 動体にカメラを搭載し,そこから得られる画像に対して認識処理をおこない,その結果を操作者等に 提示する.捜索対象をあらかじめ画像認識システムに与えておくと,該当するものがカメラ映像に映 るたびにアラートを鳴らしたり,記録を取ることができる.

索状ロボットと連帯した使用例として次のようなシナリオが考えられる.地震の影響で,プラントの一部が倒壊し,作業員が下敷きになった可能性があるため,索状ロボットを用いた捜索対象が行われる.そこで作業員の作業着や携行品を捜索対象に登録すると,ロボットのカメラ映像から,該当しそうなものを自動的に検出し,その結果を位置情報と組み合わせて表示・記録することで,捜索活動を支援する.

近年,画像認識の技術が非常に速いペースで進歩しているが,災害対応への応用は未だ難しい.以下,そのいくつかの理由を取り上げる.

- 災害対応ロボットに搭載したカメラから送られてくる映像は、画像認識の研究において普段想定される映像とは特性が異なる、特有の視点、狭い視野、ロボットの動きによるブレ、厳しい光条件等が挙げられる、索状ロボットは特に狭いスペースで活動するため、視点が非常にものに近いシーンや、ものが部分的にしか映らない場面が多く見られる。
- 主流の画像認識手法では、認識器を構築するには、事前にデータの収集と、数時間から数日間かかる学習処理が必要であり、手間と時間がかかる.しかし、災害対応においては、その場で決まる対象に対して短時間で識別できるようにすることが求められる.
- 捜索活動の最中に捜索対象が追加されると、その対象に該当するものがそこまでの捜索の 中で撮影されていたかを迅速に判断する機能が望ましいが、こういったシナリオは主流の 画像認識手法では考慮されない。

2 -6 -2)災害対応のニーズを考慮した画像認識技術

以下,本研究で開発された技術について説明する(図2-2-28).認識の過程を二つのプロセスに 分けた構成を提案した:1)画像から識別に有用な「特徴量」(画像領域の特性をコンパクトに表す数 字列)を抽出する処理と2)特徴量をベースに画像に映り込んだ物体を識別する処理.前者の処理には 認識対象の情報は原則として不要であるため,対象を知らず事前に用意できる.汎用な特徴量抽出器 を用意することにより,対象が分かってからの準備時間と,対象の定義に必要なデータ量を最低限に 減らすことを目指した構成である.以下はそれぞれの処理について説明する.



図2-2-28:画像認識システムとプラットホームとのやり取りの大まかな構図

A)特徵量抽出器

画像認識にニューラルネットワークが広く利用されるようになるまでは,多くて特徴量抽出法が提 案されてきた.しかし,当時の手法は画像のブレ・変形・圧縮ダメージ等に対するロバスト性が低い ため、災害ロボティクスにおける画像認識には向かないと思われる。ここでは特徴量抽出の処理には 畳み込み自己符号化器(Convolutional Auto-Encoder, CAE)を採用した.CAE はニューラルネットワー クの一種であり,荒い映像に対してより高いロバスト性が期待できる.ニューラルネットワークであ りながらも,現在画像認識に広く使用されているニューラルネットワーク(CNN)とは仕方が大きく異 なる.CAE は画像の圧縮と展開を目標にする.画像を圧縮するたびに CAE の内部に生じる圧縮表現 は,入力画像の特性をコンパクトに記述する特徴量として利用することができる.CAEの学習過程は 画像の分類とは無関係であるため、事前に認識対象のカテゴリを定義する必要がなく、画像のカテゴ リ所属情報が付与された訓練データも不要である.充分に多様な画像データを用いて学習した CAE は,汎用性の高い特徴量抽出器として利用できる.しかし,CAEを用いた特徴量抽出器を本研究で目 指す画像認識へ応用するにはいくつかの工夫が必要となる.先ずは画像の空間的構造を考慮する必要 がある.既存の CAE で得られる特徴量は入力画像全体に対応するものであり,画像内における局所的 な物体認識には向かない.ここでは,画像全体ではなく,その一つ一つの領域に対応する特徴量を, 多数の領域に対して効率よく同時に抽出する手法を開発した.これに加えて, CAE 内の圧縮過程の多 段階から特徴量を抽出する工夫を取り入れた.認識対象の定義に利用される画像と,カメラ映像に出 現する対象物体に関して、その類似性が対象の特性によって違う圧縮段階に出てくるため、圧縮過程 の多段階から特徴量を利用することによってより高い認識性能が得られると思われる.

B)識別器

CAE を用いて抽出された特徴量をベースに,認識処理の次の段階で認識対象の識別を行う.以上述 べたように,識別処理に大きく分けて二つのアプローチを提案した.以下はその中で一番実用に近い アプローチについて説明する.

ユーザから与えられる認識対象の画像データから抽出された特徴量と,ロボットのカメラで撮影さ れる映像から抽出された特徴量の間の「距離」を計算することにより,その類似性を判断する手法で ある.この識別器に学習が不要である.処理の概要は次のとおりである.ユーザにより対象が定義さ れた時点で,その画像データから特徴量の抽出を行う.次に,得られた特徴量に関してクラスタリン グを行い,対象の構成を簡単に分析する.対象が複数のパーツから構成されている場合はクラスタリ ングによりその構成が分かる.この分析の結果を保存する.そして,カメラ映像にその対象が映って いる可能性を判断するには次の処理を行う.映像の特徴量を認識対象の分析結果に照らし合わせ,二 つのスコアを計算する.一つのスコアはパーツ毎に,そのパーツと映像の内容の類似性を測る.もう ーつのスコアは,映像内に対象のパーツがどれ程揃っているかを測る.最後に,二つのスコアを統合 し,対象が映像のフレームに映っている可能性を定量的に判断する.対象をパーツに分割することに より,単純で計算が軽い比較処理でも,特徴量とカテゴリの関係がやや複雑な場合でも認識が可能に なった.尚,フレーム全体に渡ってパーツの情報を統合することにより,パーツーつ一つの訓練デー タとの類似性が低めに出る場合(例えば光条件により色合いが違う場合)に関してもシステムのロバ スト性が向上した.

C) 遡り認識

この識別手法の利点の一つは処理の軽さにある.この軽さを利用し,捜索対象が捜索の最中に分かったシナリオへの対応を行った.捜索の最中に新しい捜索対象が登録される場合は,その対象に関して,そこからの認識だけでなく,そこまでの認識も行うことが望ましい.つまり,そこまで記録された映像の中に,新しい対象に該当しそうなものが存在した場合,それを短時間で見つけ出す機能が必要となる.オペレータがサイバー救助犬のカメラ映像を継続的に観察する場合でも,映像の詳細な記録は人の記憶に残らないため,この機能は人間による認識では実現しがたいと思われる.

この機能を次のように実現した.映像のフレームを処理した際に,その特徴量を記録する.そして 新しい対象が定義された時点で,この記録に対して識別の処理を実行する.識別処理を GPU 上で実行 可能な並列処理として実装することにより,GPU が搭載されたノートパソコンでは一秒に 300 フレー ム分の識別処理を行うことが可能になった.例えば毎秒 10 フレームの記録を残した場合,一分間分 の記録に対する認識処理の所有時間がおよそ2秒にまで圧縮される.この過去に対する認識処理を 「遡り認識」と呼ぶ.

上記の,識別器に関するアプローチについて,現状では一番実用性が高いのは識別器#2を用いた 手法であると判断し,ロボットプラットホームとの統合においては識別器#2を採用した.しかし,識 別器#1の方は表現力が高いと思われるため,識別器#1の安定性と実用性を向上させる方法を引き続 き検討している.



図2-2-29: 認識システムの構成

2 -6 -3) ユーザ向け UI

ユーザ向け UI を開発した.この UI の主な機能は,認識処理の開始・終了と,捜索対象の登録と, システム設定の調整である.捜索対象に関しては,手間少なく,簡単な手順で対象が登録できること が実用上重要であると思われる.登録手順を次のように単純化した.画像を読み込むボタンを押し, 対象の定義に利用する画像を選択する.そして画像が UI 上に表示される.次に,マウスのカーソル を認識対象に指定したいものに置き,マウスのスクロール機能(若しくはキーワードのキー)で,選択 領域を調整する.その際,特徴量の類似性を利用し,選択領域が自動的に画像内の輪郭になじむよう に調整する.選択が完了すると,ボタンを押し対象に名前を付与し,対象の保存や認識の開始を行 う.ここにも特徴量を生かすことで,登録作業の手間を削減した.

2-6-4) 索状ロボットとの統合

上記のシステムをサイバー救助犬と索状ロボット(細径)の二つのプラットホームとの統合を行った.以下は索状ロボット(細径)との統合について説明する.

・ ROS 経由での映像・認識結果の送受信.

上記のシステムを索状ロボット(細径)とサイバー救助犬の二つのプラットホームとの統合を行った.以下は索状ロボットとの統合について説明する.

- ROS 経由での映像・認識結果の送受信.

索状ロボットは ROS(Robot Operating System)で情報を送信するため, ROS 経由でのカメラ映像の 受信と認識結果の送信を実装した.認識結果にメタデータとして,認識があったフレームが撮影され た時点のタイムスタンプ,結果の信頼性や,結果画像のサムネイルを付与する.メイン UI 側にて, ロボットの軌道の記録からそのタイムスタンプに対応する位置が読み込まれ,認識結果が捜索空間内 に位置付けられて表示される.

- UI のモジュール化

画像認識は計算が重いため,計算能力が高い計算機で行うことが望ましい.一方,現場での利用を考えると,小型で持ち運びやすい端末から操作ができることが望ましい.その両立には,認識システムのUIと認識処理をモジュール化し,それぞれを違う端末上で実行可能にする必要があった.モジュール化により,認識システムのUIとプラットホームのメインUIを同一端末上での操作も可能になり,実用性を向上させた.しかし,この機能の実証実験と,メインUIと認識システムのUIの統合にはまだ至っていない.





図 2-2-30: 左: ユーザ向け UI(捜索対象登録中の画面). 右: 認識結果の一例.

2 -7) 触覚情報処理(東北大・昆陽G)

2 -7 -1) 概要

能動スコープカメラの操縦において,接触状態の把握は瓦礫への挿入を迅速に行う上で重要である.例えば,先端部がカメラの視野外で接触した場合,操縦者は接触対象が見えないまま,先端カメラの映像の動きから周辺の状況を推定する必要がある.また.索状ロボットは柔軟で長細いという特徴から,中間部の引っかかりや弛みが,ロボット全体の運動に影響する.さらに,繊毛振動駆動機構は接触面積が十分にないと駆動力を発生できない.このような接触情報を把握しながら操縦することが求められており,触覚情報処理では,接触情報の推定手法とユーザへの提示法について研究開発を行った.

能動スコープカメラでは,小型の振動センサを分布的に用いて接触状態を推定する手法を提案した.開発した内容は大きく分けて以下の2つである.

- 先端部の接触方向の推定と振動提示を組み合わせた視触覚提示システム
- 胴体中間部の接触有無の判定と姿勢情報との重畳表示システム

これらのシステムによって,はじめて能動スコープカメラで触覚情報を操縦者が利用できることに なった.これらの情報提示は,接触イベントへの反応時間や環境把握に要する時間の短縮や,より複 雑な環境での操縦の確実性の向上に貢献すると期待される.

2 -7 -2)技術的成果

A)先端部の接触方向の推定と視触覚提示システム

能動スコープカメラは細径で細長いロボットであり,従来の多数の触覚センサをアレイ状に並べる ことは困難である.そこで,本研究課題では,図2-2-31に示すように,接触箇所を直接センシング するのでなく,接触時にロボット筐体を伝播する振動情報を計測することにより,間接的に接触状態 を推定する手法を提案した.また,情報提示に関しては,図2-2-32に示すように1自由度のバイブ レータを操縦者がもつコントローラに取付け,推定された接触の方向を先端カメラの映像の周辺に色 情報として表示する視触覚融合提示を行った.このシステムでは,空間把握能力の高い視覚情報と, 時間分解能の高い触覚提示を組み合わせることで,素早く接触の回避行動を行わせることが可能とな る.



図2-2-31:振動センサによる先端 部筐体の振動伝播計測と接触方向 推定

図2-2-32:1自由度バイブレータと周辺視によ る色情報を用いた視触覚提示インタフェース

まず振動の計測には,小型で感度の高いピエゾ素子型振動センサを先端部筐体の後方4箇所に取付け,波形の振幅の大きさを特徴として,推定関数あるいは機械学習によって方向を推定することを可能とした.この際,ロボットには繊毛振動駆動によるノイズを除去した上で,信号処理を行っている.SVMを用いた学習の結果,8方位の接触方向を90%以上の精度で検出できることが確認された.

また,触覚提示,および視触覚融合提示の有効性を確認するために,ユーザを用いた実験を行った.まず,ユーザがASCが先端を首振りした際に,先端の衝突に気がつくまでの反応時間を,映像のみと振動フィードバックを加えた際で比較した.実験の結果より,衝突の強さが弱いときほど,触覚提示が有意に反応時間を向上させることを確認した.これは,触覚提示により,僅かな衝突でもユーザが気がつきやすくなることを示している.また,図2-2-33(左)に示すように,ぶら下がったASC 先端の首を振りながら,木のブロックで囲まれた狭隘路をくぐり抜けるタスクでは,被験者にできるだけ衝突を減らすように操縦させ,操作時間中の衝突頻度を視触覚提示の有無で比較した.実験の結果,図2-2-33(右)のグラフに示すように,2人の被験者いずれの場合も,提案する視触覚提示がある場合のほうが,衝突頻度が有意に減少することが確認された.これは,操縦者は衝突の有無だけでなく,衝突の方向を把握することで,適切な方向に先端部を回避させることができたことを示している.本成果は,ロボットの有力国際会議 IROS2016 で発表を行った.



図2-2-33:(左)狭隘部での衝突回避タスク(右)視触覚提示なし/あり時の衝突頻度の比較結果

B)胴体中間部の接触判定と姿勢情報との重畳表示システム

細長い索状ロボットである能動スコープカメラは,自分の胴体をカメラで観察することができないため,胴体の状況を把握することが困難であった.2-4)で述べた IMU と音響センサを用いた姿勢 推定の技術を用いることで,ロボットの姿勢を確認することができるようになったが,環境との引っ かかりや胴体の浮きなどの接触情報は得ることができない.能動スコープカメラの推進力は繊毛振動 駆動によって得ており,特に胴体の浮きに関しては,推進力を低下する要因になるが,姿勢情報から は,ロボットが環境に引っかかっているのか浮き上がっているのかを判断することは困難である.

本研究課題では,繊毛駆動で用いている振動モータを加振源として,筐体に伝播する振動を前述の 振動センサを用いて長手方向に分布的に計測し,環境との接触によっておこる振動の特徴量の変化か ら接触の有無を推定する手法を提案した.具体的には,筐体が環境と接触すると,浮き上がっている ときに比べて周波数スペクトルが分散する傾向があることを利用して,機械学習により,接触時と非 接触時の振動を判別する.ただし,振動センサは長手方向に対して,約40cm間隔で1つずつ取り付 けるため,接触面により振動特徴の違いが生じる.そこで,ロボットを45度ずつ捻りながら,8方向 の接触時の学習データを用意し,SVMで弁別を行った.ロボットの姿勢と接触条件も平坦な状態か ら,下り方向にぶら下がる姿勢,部分接触する条件など,複数の条件で計測を行った.構築した推定 モデルの交差検証の結果では,80%以上の正解率を有するモデルを構築することができた.



図2-2-34: 姿勢情報への接触情報の重畳表示のコンセプトと福島ロボットテストフィールでの評価.

実環境で本手法が適用できるかを確認するために,福島ロボットテストフィールドのプラント瓦礫において,屋根裏構造と瓦礫を模した環境で接触情報の推定と,IMU センサの積分から得られた姿勢 情報に重畳表示することを試みた.図 2-2-34 に提案手法のコンセプトと推定結果の例を示す.図中 の姿勢に重畳して表示されている赤い点の部分が接触と判定された部位を表す.ある程度,現実的な 構造物,および瓦礫上でも接触推定が可能であることが確認された.今後,運動情報と接触情報を合 わせて,接触面積が不足して動かないのか,引っかかって動かないのかを表示するユーザインタフェ ースを作成し,操縦者への提示を試みる予定である.

2-8)感覚統合型索状ロボットのインタフェース(東北大・昆陽G)

2-8-1)概要

ImPACT TRC 索状ロボット(細径)プラットホームでは,機動性能を飛躍的に高める空気噴射を用いた浮上機能に加えて,視覚・聴覚・触覚のセンシング機能を統合した感覚統合型能動スコープカメラを開発した.これらのマルチモーダルな情報を統合して,オペレータに提示する統合インタフェースを開発し,2017年11月,2018年6月,および11月のフィールド評価会で,被災者探査のデモンストレーションを行ってきた.本節ではこのインタフェースについて述べる.

2-8-2)統合インタフェースの概要

情報収集能力の向上をめざして,複数のセンサ情報を統合した感覚機能統合型能動スコープカメラ を開発した.具体的には,音響情報としてマイク・スピーカアレイ,触覚情報として振動センサ,慣 性センサを多数搭載し,ロボット先端には,視覚情報として高感度の高速カメラを搭載している.こ れらのセンサにより,被災者の音声強調,索状体の姿勢推定,先端カメラ映像による環境認識と自己 位置推定,接触位置の推定等を行い,捜索活動を支援する技術を開発した.すべての感覚情報は統合 して操縦者に提示される.また,複数の作業者が同時に情報処理を行い,容易に情報を再統合できる ように,ロボット用オペレーションシステム ROS によって,管理されており,ユーザインタフェース も ROS の機能を利用して統合を行った.

図 2-2-35 に統合インタフェースの例を示す. 左側は先端カメラの映像,右側上は視覚 SLAM による ロボット先端の軌跡と3次元環境復元の結果,右側下は,IMU と音響センサによるロボットの姿勢推 定の結果に接触情報を重畳している.また,左側下には,画像認識により,あらかじめ登録しておい たテンプレート画像に類似する画像の上位4件が自動で表示されており,音声が自動認識された際 も,アイコンが表示されるようになっている.



発見した対象画像(上位4件)

図 2-2-35: 感覚統合型能動スコープカメラの統合情報提示インタフェース

- 2-9)能動セグメントとマルチモーダル探索センサユニット (ASTEM・鄭G)
- 2 -9 -1) プロジェクト/課題の計画

本研究課題では,タフ・ロボティクス・チャレンジで解決すべき課題のうち,「極限環境アクセシ ビリティの課題解決」,「極限環境センシング・状況理解・推定の課題解決)に着目し,瓦礫の狭い隙 間へ進入し内部調査や要救助者発見を行なう既存細径索状ロボットの移動・探索課題解決・能力拡大 を目的とする.ロボットプラットホームへ追加する技術コンポーネントであり「索状移動ロボット (能動セグメント)」,「マルチモーダル探索センサユニット」,および関連ソフトウェアとから構成さ れる「先端能動機構」の研究開発およびそのロボットプラットホームとの統合を行ない,課題解決へ のソリューション提供を実施する.

2-9-2)課題の成果:

A) 主なハードウェア技術コンポーネント 先端能動機構 (LAM) (小型移動ロボットとしても独立に機能)

- H1) 索状移動ロボット「能動セグメント」 (ASG) (図 2-2-36)
 - 5cm 径,半頂角 45°円錐動作範囲の2自由度関節屈曲
 - 関節屈曲の可制御・可検出性による測位・FB 操舵制御
 - 分布型クローラベルト/駆動輪による無停止移動推進

現プロトタイプの性能として,登坂30°,段差乗上げ10cm, 溝乗越え30cm,走行速度 12.4(平地)-9.1(30°)cm/s,質量1.2kgを有し,第1試作の目標性能をすべて達成.



図 2-2-36: 索状移動ロボット「能動セグメント」

- H2) 前方マルチモーダル探索センサユニット (MMSS) (図 2-2-37)
 - 4.4cm 径, 5.9cm 長と小型でコンパクト
 - プロセッサによるセンサデータの集約・LAN 伝送
 - コア/アプリケーションモジュール構成・タスク別機能

現プロトタイプの性能として,映像ストリーミング,双方向対話,3D 姿勢計測,環境(温度,酸素濃度)検知,LED コントロール,省配線伝送を有し,第1 試作の目標性能をすべて達成.



図2-2-37: マルチモーダル探索センサユニット

- H3) 側面近接覚環境検知モジュール (LPSM/LEDM) (図 2-2-38)
 - LAM 機体側面カバーに小型赤外レーザ素子の組込み
 - 前方 MMSS 映像による環境情報への補完

現プロトタイプの性能として,ロボット全周6側面24点にて,表面より~10cm(カタログ値) ないし~20cm(実績値)範囲内の距離計測能力を有する.本モジュールは,研究の進行につれ, 当初設定<u>目標以上</u>に高い環境センシング・操作支援実現のために,先端能動機構に対し<u>開発を追</u> 加<u>実施</u>したもの.



図2-2-38: 側面近接覚環境検知モジュール (LPSM/LEDM)

B) 主なソフトウェア技術コンポーネント

S1) 映像・操作スタビライザ(IMS) (操作支援機能)(図 2-2-39)

- ロボット構造/動作に因る横転がり(ローリング)時におけるリアルタイム映像表示傾き補 正・関節操作主軸変換
- 常に上向きの操作映像・見かけ上不変な関節ピッチ/ヨー軸方向の実現
- 走行/投下/旋回等全フェーズでシームレスに機能

この機能の実現により,ロボットの転がり姿勢によらない映像理解・移動操作,作業時間の (32%~48%などの)短縮,非熟練者にも容易な移動・探索操縦が実現.本機能は,研究の進行につれ,当初設定<u>目標以上</u>に高いモビリティ/環境アクセシビリティ・操作支援実現のために<u>開発を</u> 追加実施したもの.



ロボット姿勢 関節動作主軸 図2-2-39:映像・操作スタビライザ (IMS)

- S2) 側面近接覚環境検知 (LPS/LED) (図 2-2-40)
 - ロボット全周6側面24ポイントの距離情報検知
 - 補間後環境距離・姿勢のグラフィック表示
 - ロボットの転がり姿勢によらない定視点表示

この機能の実現により,未知環境構築/障害物自律回避/操作支援,および前方映像情報への補完の 一手法を提供.本機能は,研究の進行につれ,当初設定<u>目標以上</u>に高い環境センシング・操作支援実 現のために開発を追加実施したもの.



図2-2-40 側面近接覚環境検知 (LPS/LED)

- S3) 単一汎用 PC 操作インタフェース (P²IF)・マルチモーダルセンシング (MMS) (図 2-2-41)
 - 開発技術コンポーネントとプラットホームとの統合機の1セットの汎用 PC・制御パッドによる操作インタフェース
 - 映像/音声会話/温度/ガス等マルチモーダルな探索情報,前述 S1),S2)機能に必要な情報,お よびシステム動作状態の監視・保護・記録に必要な情報の検出・集約・省配線伝送・操作イ ンタフェース上表示

この機能の実現により,操縦装置の低価格化・小型化,ならびに主な移動操縦・探索情報処理 がオペレーター1 名で可能なことを実現.本機能は,<u>目標以上</u>の性能を達成.

- C)開発した技術コンポーネントとロボットプラットホームとの統合(図 2-2-42)および遠隔操作インタフェース(図 2-2-41)
 - 技術コンポーネント・プラットホーム間機能整理/統合・性能整合
 - 5cm 径, 10.5m 長の細索状ロボットを構成
 - 前述 S3)の単一汎用 PC・制御パッドによる情報表示・動作制御統合 I/F・保護機能

現統合ロボットの性能として,登坂20°,段差乗上げ7cm,溝乗越え25cm,走行速度13.3 (平地)~9.6 (20°)cm/sを有し,従来の細索状ロボットでは不可能だった水平・登り方向の瓦礫 内の安定走行・移動操縦・探索が可能になるという<u>非連続イノベーション</u>,また災害/事故現場 で多く見られる作業で必要とされる鉛直投下・高所見回し調査・進路選択・不整地面上着地と走 行と進路変更・要救助者安否と周囲安全状況のマルチモーダルな見回し確認・全行程における側 面環境検知を実現し,<u>目標以上</u>の性能を達成.また,遠隔操作インタフェースは,前述S3)に示 す通り,目標以上の性能を達成.



図2-2-41:単一汎用PC操作インタフェース (P²IF)・ マルチモーダルセンシング (MMS)



図2-2-42:開発技術コンポーネントと プラットホームとの統合

- 2 -9 -3)実証テスト
 - プロジェクトフィールド評価会:第2回(2016.6)~第7回(2018.11)の屋内外模擬フィールド において,開発したハードウェア技術コンポーネント単体,統合ロボット,および実装したソ フトウェア技術コンポーネントを順次試験・性能評価を行ない(図2-2-43),目標をすべて達 成.



(b) 第6回屋外模擬フィールドにて

(c) 第7回屋外模擬フィールドにて

図 2-2-43: 実証テスト(屋内外模擬フィールドにて)

実フィールド実証:兵庫県広域防災センターガレキ救助訓練用実フィールド(2017.9)において、傾斜コンクリート小屋などの瓦礫に対し屋根上破断開口部よりの鉛直投下、岩床面上着地と走行、接続ヒューム管内への進入と見回し調査、および引揚の一連の調査作業を遂行し(図2-2-44)、目標以上の性能達成が得られ、本研究開発で得られ技術コンポーネントH1)~H3)およびS1)~S3)から構成された、先端能動機構を用いた細索状ロボットシステムの有用性を実証.



図2-2-44:実証テスト(実フィールドにて)

- 2 -1 0)実用機(東北大・昆陽G)
- 2-10-1) 概要
- 倒壊家屋内の捜索や調査を目的として,金属の空気噴射ノズルを先端に搭載した空気浮上型能動 スコープカメラを開発.
- 携帯性と運用の容易さを考慮し、2人で持ち運び可能、かつ短時間でセットアップできるシステムを設計。
- 2-10-2)研究背景

倒壊家屋や設備などの内部探査を目的として,空気浮上型能動スコープカメラを開発してきた.本 ロボットは先端から空気を噴射して浮上する機能を搭載し,瓦礫を飛び越えたり,飛び上がって広く 見渡すことが可能である.また,視覚・触覚・聴覚の感覚機能を搭載することで,自己位置を推定す るなどより高度な探索活動が可能となった.一方で,システムの複雑化によるセットアップ時間の増 大,ロボットの重量化に伴う圧縮機の大型化などが課題となった.地震などで被害を受けた環境では 既存のインフラはあてにできず,倒壊家屋内の迅速な探査のためには状況に応じてロボットを使い分 ける必要があると考えられる.

本プロジェクトでは,感覚統合型能動スコープカメラとは別に,携帯性と運用の容易さを考慮した 空気浮上型能動スコープカメラを開発することを目的とした.

2 -1 0 -3) 開発した空気浮上型能動スコープカメラ

図 2-2-45 に開発したロボットシステムの写真を示す.全長約 9m,外径約 50 mmであり,先端には Mg 合金製の空気噴射ノズルがついている.先端付近にはマイクとスピーカがついており,コントロー ルパッドを通して遠隔で要救助者と会話することができる.携帯性を確保するためにロボットの胴体 は従来より 10mm 程度細径化し,消防で用いる空気ボンベを圧縮空気の供給源として選定した.全シ ステムは2人で持ち運び可能である.また,運用を容易にするため,制御ボックスは背負って使用可 能とし,ロボットと最小限のコネクタで接続できる.ロボットの起動は PC 画面を経由せず,いくつ かの電源スイッチを ON にするだけで実現できるよう設計した.耐久性を上げるため,先端ノズルは Mg 合金を用いて強度を上げ,胴体は防水構造になるよう設計した.



図2-2-45: 開発した空気浮上型能動スコープカメラシステム.二人でロボットを持ち運ぶことが可能

本ロボットで高さ 20 cmの安定浮上が可能であることを確認した.また,2018 年 6 月に行われた評価 会にて,2 人で持ち運ぶことが可能であることを確認し,空気ボンベを用いて先端の浮上が可能であ ることを確認した(図 2-2-46).



図2-2-46: 2018年11月評価会における安定浮上の様子

2-11)配管内高速移動ロボット(東北大・田所G)

2-11-1)柔軟空気圧アクチュエータによる配管内推進機構の提案

従来困難であった小径配管を高速で走行し検査可能なロボットを実現するために,柔軟な骨格を持った空圧により駆動するロボットを提案した.このロボットは柔軟なチューブと,そのチューブ上を動くスライダによって構成される柔軟な空気圧アクチュエータ(図2-2-47)によって構成される.このアクチュエータは空気圧によりスライダの高速な直動運動が生成でき,またスライダに搭載したゴ

ムベルトの展開により配管内での保持力の発生が可能である(図2-2-48).また印加する空気の圧力 差を利用して動作をコントロールすることが可能である.

このアクチュエータを用いて配管内推進を実現するためにスライド・インチワーム運動による配管 内推進方法を提案した.アクチュエータを2つ直列に連結し,それぞれのアクチュエータを使って尺 取り虫様の動きを生成することで,配管内での推進を可能にした.また,高速性または安定性という 異なった特徴を持つ2つの推進パターンを提案するとともに,さまざまな特性評価実験を通して機構 の最適化を行った.



図 2-2-48: スライダ部の保持力発生の切り替え

図 2-2-49: 水平直管内の高速推進の様子

開発したアクチュエータを用いて水平配管,垂直配管,曲管での推進実験を行い,内径50 mmの細 径水平配管内を従来ロボットの10倍の速度で推進できることを確認した(図2-2-49).提案手法によ り飛躍的な高速化を達成し,さらに垂直管やベンド管の走行も実現した.

2-11-2)アクチュエータの曲管内・悪環境配管内での走行安定性の向上

曲管の通過性を向上させるとともに,汚れの付着した環境内で安定性を向上させることを目的として,セルフロック現象を用いて保持力を生成する機構を提案した(図2-2-50).この機構は従来の柔軟アクチュエータの星力発生手法を発展させたものであり,配管内で収納可能な金属ピンをスライダ部の伸縮で展開できる機構を搭載することで,従来比5.2倍の大保持力の発生と凹凸の少ないスムーズな表面形状を両立させた.

種々の実験や力学モデル構築を通して機構の特性が明らかになった.発生保持力は従来比5.2倍に 向上しており,また,従来よりも低圧力かつ簡単な制御で駆動可能であることを明らかにした.

実際の配管を模擬した50A(内径53 mm)の垂直管・ベンド管・水平管を組み合わせたモックアップ 内で走行実験を実施し,従来走行が不可能であった様々な配管要素が組み合わされた配管内でもスム ーズな走行が可能であることを確認した(図2-2-51).さらに,水で満たされた配管や錆の付着した 配管,油分の付着した配管内でも安定して走行できることを確認した.



図2-2-50:提案した柔軟空気圧アクチュエータ



図 2-2-51:50A 配管のモックアップ内の走行

2 -1 1 -3) スライダ位置推定手法の提案

不可視状態でのロボット走行を実現するとともに,より複雑な運動制御の実現のために,アクチュ エータの直動部の位置を印加空気の圧力と流量から推定する手法を提案した.この手法は動的なアク チュエータの運動をシンプルな静的モデルを用いて推定を試みるものである.空気の圧縮性の存在 や,長いエアチューブ内の存在,誤差を多分に含むアクチュエータ構造等の困難な条件下において も,ロボット推進に利用できる精度での推定を実現した.

実際のアクチュエータを用いた位置推定実験より,空気や約10%程度の誤差でリアルタイム推定可 能であることを確認した.この推定精度はロボットの運動生成に十分利用可能な範囲であり,実際に 本提案手法をロボット制御に組み込むことにより,直管内における推進動作の自動生成を実現した. また,本手法をロボットのカメラ映像から得られる情報や推進距離の情報と組み合わせることで,曲 管通過動作の自動生成や配管内環境に合わせた推進動作の生成など,より高度な動作生成を実現可能 になると期待される.

本手法を用いるとアクチュエータ上にセンサを搭載することなく,印加空気を監視することで位置 推定を実現できるため,コンパクト性が求められるアクチュエータや可燃雰囲気などセンサの搭載が 躊躇われる環境,高度な推定精度が必要とされない環境において特に有効である.また,本手法は工 場などの空圧シリンダを用いた製造ライン等においても,簡便にその動作を検知する手段になり得る 可能性を秘めている.

2-11-4)配管内ロボットのオープンスペース走行への拡張

ロボットの適用範囲を拡大し,より大口径な配管や配管外の開けた空間(オープンスペース)を含む設備の点検を実現するために,配管内とオープンスペースを同一機構で推進可能にする新しいコン セプトに基づいた索状ロボットを提案した(図2-2-52).このロボットは推進力発生部と操舵力発生 部を分離させることで,小径性を保ちつつもオープンスペースでの走行を可能にしている.

このロボットコンセプトを実現するために,新たに回転運動を生成する空圧アクチュエータを提案 した.このアクチュエータは中空な構造を特徴とし,小径ながらも大きなトルクを発生させることが できる.柔軟チューブの膨張を回転運動に変換することから空圧のみで回転方向や回転速度の制御が できるため,可燃性雰囲気下での使用にも有利である.

提案したロボットに対して,種々の路面においてアクチュエータの推進力・操舵力の測定実験が 行われた.その結果,プラントや工場を構成するコンクリートやグレーチング上にて大きな推進力と 操舵力を発生することができることが確認された.また,配管内とオープンスペースにおける走行実 験も実施され,配管の中を推進したロボットは地面へ降り立った後,オープンスペース上を任意の方向へ推進できることが確認された(図2-2-53).



図 2-2-52: 提案ロボットの推進力発生部と回転 操舵部



図 2-2-53: 配管内およびオープンスペース走

- 2-12)水噴射浮上を利用した消火ホースロボット(東北大・昆陽G)
- 2 -1 2 -1) 概要
- 消火活動の安全迅速化を目的として,水を噴射して空中に浮上し建物内に突入できる空飛ぶロボット消火ホースを開発
- > 噴射ノズルの制御技術開発により,浮上の安定化と飛行進入方向の選択を実現
- > 建物内の火元に直接放水できるため,最小の水量で迅速な消火が期待される
- > 遠隔制御により,消火活動に伴う安全リスクの低下が期待される

2-12-2)研究背景

火災現場での消火は迅速に行うことが重要であるが,環境が過酷であり,作業に従事する消防士に とっても生命のリスクが大きい.特に大規模な火災の場合,消防士が建物内で消火活動を行うことは 困難であり,遠方から大量の水を放水して延焼を防ぐしか手段がないのが現状である.

本プロジェクトでは,ロボットを用いて火元に直接水を運ぶことができれば,消火作業を安全に迅速化できると考えた.これまでの地上から水を放水して消火を行う方式に対して,水の噴射による推力を用いてホースを浮上させ,空を飛んで火元に直接到達して消火するというアイディアを考案し, そのプロトタイプを実現した(図2-2-54).水は空気に比べて密度が高いため噴射反力が大きい.そのため噴射によりホースが大きく暴れる課題があったが,本プロジェクトで開発してきた空気噴射ノズルと安定浮上技術を応用することで,課題を解決した.



図2-2-54: 空飛ぶ消火ホースのコンセプトと実現したプロトタイプ.水噴射の反力で浮上し,火元に 直接到達することを目指している



図2-2-55:制振機構の構造.胴体の形状変化に応じて根本のプーリーが回転する.プーリーの速度に応じた回転抵抗によって,胴体の形状変形を伴う振動を抑制できる.

2 -1 2 -3) 安定浮上技術の開発

消火ホースを安定に浮上させて方向を制御するためには,ホースの姿勢に応じて噴射方向と噴射力 の制御を行う必要がある.空気浮上型スコープカメラで開発した技術を基に,安定浮上のために力の 方向を重力方向に対して一定にする制御方法を考案し,数理モデルで妥当性を検証した.この一定の 力の方向を左右に変化させることで,ホースは左右に先端を動かすことが可能である.併せて,ホー スの形状変化に応じて力の大きさを変えることで,ホースの振動を抑制する効果を向上させた.

さらに振動の抑制効果を向上させるために,消火ホースの胴体に沿ってワイヤを這わせた(図2-2-55).このワイヤはホースの根本でプーリーを介して折り返され,ワイヤの両端は先端で固定され る.ホースの胴体が形状変化するとともにプーリーが回転する.プーリーは回転する際に速度に応じ た抵抗を発生するため,ホースの振動を抑制できる.

2 -1 2 -4) 噴射方向可変ノズルの開発

ロボットを安定浮上させるために,十分な噴射反力を得ると同時に,力の大きさと方向が制御できるノズルモジュールを開発する必要がある.しかし,噴射量を調整する電磁弁は重量が大きく,ノズ

ルに搭載するのは現実的ではなかった.そこで,ノズルの噴射方向を小さな流路抵抗で変化させられ る軽量な柔軟なノズルを新たに開発した.この噴射方向可変のノズルを複数組み合わせることで,ノ ズルモジュールで得られる合力の大きさと方向が制御可能となる(図2-2-56).なお,ノズルの出口 径の広さは噴射反力を多く得られるように数値的な計算のもとで設計した.本ノズルモジュールは胴 体内部のホースから分岐して水を確保できるため,ノズルモジュールを増やすために水ホースを増や



図 2-2-56: 複数の噴射方向を制御可能なノズルモジュール、

す必要がなく,長尺化が容易である.



図2-2-57: プロトタイプによる消火実験の様子.安定に浮上し,根本の台車を押すことで火元に近づく.水の噴射方向を制御することで,水をドラム内の火元に噴射して消火する.

2 -1 2 -5)模擬火災現場での消火

上述したコンセプトをもとに,飛行型消火ホースのプロトタイプを開発し,安定浮上と方向の制御 を世界で初めて実現した(図2-2-54).開発したロボットは全長約3m,2つのノズルモジュールを 搭載した.先端には状況を確認するためのカメラと熱カメラも搭載した.水噴射による制御の原理検 証を行った結果,根本を固定した場合に,およそ根本の高さと同じ高さまで浮上し,先端を左右に 1.5m 程度動かして火元にターゲットを定めることが可能である.

本ロボットを用いて燃焼物を用いた環境で実験を行った(図2-2-57).図2-2-57 に示される壁は建物の壁を模擬しており,上部に窓が開いている.開発したロボットは根元の固定部を台車に搭載し,

前後に移動することが可能である.実験により,方向を切り替えながら窓を通って建物内に侵入し, ドラム管内部の炎を1分程度で消火できた.

なお,これらの技術はロボティクスの有力な論文雑誌である IEEE Robotics and Automation Letters に採択された.また,結果は国際的に著名な IEEE Spectrum のニュース記事としても紹介さ れた("Firefighting Robot Snake Flies on Jets of Water", 2018/6/4)

3)成果の活用

2 -1)に述べたように,下記の災害にて,研究成果,および,プラットフォームが活用された.

- ・プラットフォームを福島第一原発1号機へ適用(清水建設共同,2016年4月,12月-2017年2月)
- ・能動スコープカメラによる熊本地震倒壊建物調査(東北大災害科学国際研究所共同,2016年4月)
- ・能動スコープカメラによる岡山市半田山土砂崩れ倒壊家屋内調査(2018年7月)

その他,下記のような成果の活用,波及効果があった.

- ・モリタホールディングスがドラゴンファイヤーファイターの本格開発を検討.
- ・某社より高速道路料金所の設備定期メンテに使用したいとの相談があり,成果の適用を検討した
- ・某社よりビルメンテナンスのための検査に ASC と視覚 SLAM の技術を使用したいとの相談があり, 今後検討の可能性がある.
- ・某社より福島第一原発廃炉のために使用したいとの相談があり,試験検討を行った.
- ・ORPCA に基づく音声強調法は,オープンソースロボット聴覚ソフトウェア HARK の周辺パッケージ として実装・公開した.
- ・RNTFに基づく音声強調法は汎用性が高く、レスキューロボットの音声強調だけでなく、タブレット 端末の音声認識のフロントエンドといった他用途への応用も行った。

社会実装を進めるために,下記のようなマイルストーンを策定した.

ImFACT総了

オリンパス・モリタHD・東北大・IRS

□ 消防·IRS等

MPAC 索状ロボット・社会実装へのマイルストーン ★ 目的・ニーズ 倒壊家屋奥深くの人命捜索(阪神淡路以降,大震災が世界中で発生、人命・人材の損失區大) 建物内の火元へのアクセス・消火(大規模火災に打つ手がない、火元に直接放水する必要) ★ そのために必要なこと 素状体が空中に浮上してターゲットにアクセス(素状ロボ浮上の実現例はない、制御が困難) ・ 瓦礫内部の調査・マッピング(実現を妨げる困難な条件:遠近撮影・急激な姿勢変化・照明が 移動・直期日光と暗闇が共存・超小型・リアルタイム) → オペレータが見ながら、聞きながら、触りながら遠隔操作(実現を妨げる困難な条件:騒音。) 音響反射・超小型・軽量、瓦礫内耐久性・全体ボディ制御) ★ ImPACT終了 (H30年度末) 時点での成果イメージ > 浮上索状体に視覚・聴覚・触覚を統合し、移動能力と遠隔操作能力を飛躍的に向上 ▶ 倒壊瓦礫人命捜索:瓦礫内の実用性能を確保(限界性能試験で改良) ← 資金配分変更が必要 建物内消火:窓から建物内に進入し、火元消火できることを実証 + 資金配分変更が必要 ★ H30年度以降に必要な取り組み ステークホルダー H29 H30 H31 H32 H33 H34 H35 7-1f: 人倒試験用統合機製造 消防,原子力, 製品化・検定(オリンパス型ビデオ 育坊 原子 国際緊急援助隊 スコープの飛行ロボット(化) 力試驗 **捜瓦** 索碟 限界性能試験 企業: ユーザの導入計画 モリタHD, オ リンパス(何れ 消建
「消火システム開発 製品化・検定(モリタ 実用化開発(耐火,耐久。使いやすさ) も幕界トップ。 死の谷を短期に 製 ほしご草・) 御方車 内 消防の火災適用試験

■ モリタHD·東北大+IRS

ImPACT

のオブション

超えられる)

(3) 索状ロボット(太径)

1)サマリー

- 1-1)防塵防水無線化ヘビ型ロボット
- 防塵防水無線化ヘビ型ロボットの開発: 3次元運動可能なヘビ型ロボットをサーボモータで構築した.各ユニットにはバッテリならびにマイクロコントローラや全周圧力センサを装備しており,先頭節や後尾節には無線化カメラ,音響センサ,IMU(慣性計測装置)などの各種センサやロボット制御用の小型 PC を組み込んである.これを独立気泡のスポンジゴムチューブの内部に収めることで,防塵防水仕様にしている.
- ヘビ型ロボットが配管あるいはダクト環境を移動するためのアルゴリズムの開発: ヘビ型ロボットが複雑な配管やダクトの内部ならびに配管の外周に沿って移動するためのアルゴリズムを開発した.ヘビ型ロボットは螺旋捻転運動を基本として移動するが,移動環境に応じたモーションを付加したりサーボの剛性を調整したりすることで,さまざまな環境での移動が可能となった.
- ・ヘビ型ロボットへの各種機能のシステムインテグレーション: ヘビ型ロボットが配管内を移動 して点検作業などを行うために,カメラ画像やロボット形状をオペレータに提示してロボットを 遠隔操作するためのユーザインタフェースをシステム統合した.さらに,ロボットの配管内での 位置を推定するための音響センサシステムや圧力センサによるオドメトリシステム,ロボットの 滑落を検出するためのシステムなど,各種システムを統合化ロボットシステムへと実装し,ロボ ット評価会にてデモンストレーションを行った.
- ヘビ型ロボット全身用触覚センサの開発: 直列に多関節を有する機構によって構成されるヘビ 型ロボットの全リンク部に実装可能な触覚センサを開発.外界との接触面である円柱形状の外殻 表面に被覆実装可能.360度全方位に感圧部を有し,接触圧力の重心位置と総荷重を推定可能.外 殻との固定方法の工夫により測定レンジを超える荷重が作用しても破損しにくい頑丈さを有す る.
- ・ 音響センサシステムの開発: GPS や地磁気の使えない配管内部に進入したロボットの位置と配管の形状を音響・慣性センサを用いて推定する技術を開発した.最初に有線接続のロボットで上記を実現する技術を開発し,次にその技術を応用することで無線接続のロボットでも利用可能な技術を開発した。
- ・ 触覚センサを用いたオドメトリ法の開発: 全身用触覚センサによる接触点位置情報と関節角度 情報を統合し,ロボットの3次元的な移動量を推定する手法を開発した.また,移動量に基づい て接触した点を提示することで,配管内部を移動する際に配管の姿を提示する手法を開発した.
- ・ 垂直配管昇降時の滑落判定方法の提案: 機械学習の手法を用いて,高速かつ的確に滑落を検出 するシステムを構築した.
- 配管内点検用遠隔操作インタフェースの開発: 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、および上述した触覚センサ情報、音響センサシステムによる自己位置推定結果を統合して、オペレータに視覚的に提示するユーザインタフェースを開発した。

1-2)スムースタイプヘビ型ロボット

- 滑らかな表面形状を持つヘビ型ロボットの開発: 櫛状のリンク形状により,なめらかな表面形状と広い関節可動域を両立するヘビ型ロボットを開発した.表面形状な滑らかなことで環境の凹凸に引っかかりにくいため,複雑な環境での利用に適している.また,全身をスポンジゴムカバーで覆うことにより,防水防塵化が可能である.本ロボットを使用し,瓦礫フィールドの移動とはしご昇降を実現した.
- 単純形状の連結による目標設計手法の構築: 単純な形状を連結することでヘビ型ロボットの複 雑な目標形状を直感的に設計可能な手法を提案した.この手法を用いて不整地を高速移動する移 動形態,配管上のフランジを乗り越える移動形態,はしごを昇降する移動形態を設計し,ヘビ型 ロボットによる実証実験に成功した.これにより,ヘビ型ロボットを適用可能な環境を大幅に拡 大した.

1-3)能動車輪ヘビ型ロボット

- タフな索状用コントローラの設計: 平地だけでなく段差,斜面,階段,不整地,管内外,梯子 を移動可能な制御方法を提案し,環境適応性を向上.故障診断や故障時の制御方法を提案し,耐 故障性を向上.作業前の初期姿勢調整制御,スタックへの対応方法,管内移動時の滑落検知と回 避方法,を提案し,作業失敗の予防とリカバリ方法を確立.作業用の制御を提案し,移動だけで なくバルブ開閉といった作業を実現.
- タフな車輪型索状ロボットの開発: 上記コントローラおよび環境認識センサを搭載した試験機
 を開発し,各種制御方法の有効性を確認.家屋内狭所に対応する専用機,実証用試験機,WRS2018
 用機体を開発.
- ・ 索状用操作インタフェースの開発: 上記の動作や作業を遠隔操縦によって実現するためのイン タフェースを開発.
- ・ 索状用グリッパ機構の開発: 指がない袋状のシンプルな構造ながらも,精密な位置決め動作なしに多種多様な形状の対象物を把持することを目的として開発.三層構造の膜の中間層にのみ粉体を封入させることにより,従来内部に粉体を満充填させた方式のものに比べ,著しい大変形・極低押付力での把持対象物へのなじみ変形把持が可能な柔剛切替グリッパ機構を実現.これにより,災害現場での多種形状のバルブの開閉や不定形物体の回収が可能となった.また作動させるためのポンプユニットを索状プラットホームに搭載可能なサイズ・重さで実現した.
- ・ 耐切創性(膜型,1次元ジャミング型)および耐火性ロボットハンドの開発: 防弾チョッキにも 用いられる耐切創性の布を上記の柔剛切替グリッパ機構に用いることで,刃物を刃部からをも把 持できる,つまり瓦礫内での割れたガラスや有刺鉄線を把持可能な耐切創性グリッパ機構を実現 した.また,破れるという現象自体が起こらないグリッパ機構として,数珠状の1次元線状ジャ ミング機構なるものを新たに考案・具現化してトーラス状の構造を有するグリッパ機構を構成し た.この構成により,鋭利・棒状の対象物は勿論,ビーズ部品を耐熱性の高い素材で構成するこ とが可能となるため,耐火性を有するグリッパ機構を実現するに至った.
- ・ 能動車輪ヘビ型ロボット用近接覚センサの開発: リンクの両側面部に車輪を有する能動車輪ヘビ型ロボットの底面に実装可能な近接覚センサを開発.近赤外光の反射を利用した検出原理を採用し,距離数十ミリメートル程度に存在する対象物までの距離と姿勢誤差を推定可能.機体底面の車輪間の限られた空間(約20mm四方)に収まる構造を設計.アンプ回路,ON/OFF 切替回路を内蔵.

2)技術的成果

2-1)防塵防水無線化ヘビ型ロボット

2 -1 -1)防塵防水無線化ヘビ型ロボットの開発

図 2-3-1 に,本プロジェクトで新たに開発した防塵防水無線化ヘビ型ロボットと,その内部構造を 示す.ロボットは全長約 1.5m,質量約 10kg である.ロボットを独立気泡のスポンジゴムチューブに 収めることで防塵防水仕様となる.

ロボットには制御用の PC やバッテリなどを内蔵して無線化している.ロボット制御用 PC とオペレ ータの操作用 PC とは無線 LAN で接続される構成となっている.ロボットの先頭には,配管内をモニタ するためのカメラとして GoPro 社製 HERO4 Session を搭載している.また LED の照明として, SheIngKa 社製 LED Light を搭載している.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モニ タ(Apple 社製 iPad Air2)あるいは操作用 PC のユーザインタフェースに映し出される.ヘビ型ロボ ットは,ピッチ軸とヨー軸とが交互になるように屈曲する関節を直列に配置して構成されている.関 節を駆動するサーボモータには ROBOTIS 社製 Dynamixel MX-106 を採用している.隣り合うサーボモー 夕間を物理的に接続するために,新たに SUS304-CP の材質の1枚もののフレームを特注で設計製作し ている.サーボモータ2個につき1個のマイコン(MCU)と1つのバッテリを搭載している.マイコンに は THK 社製 SEED MS1A を使用している.また,IMU(慣性計測装置)を搭載したマイコンがロボットの 先頭と尾部に配置されている.すべてのマイコンは共通の CAN バスに接続されて通信が行われている. バッテリには,Hyperion 社製の G5 50Cmax 3S 850mAh 4.2V-Max LiPo を採用している.ロボット制御 用 PC には,Raspberry Pi 3 Model Bを採用しており,SK Pang electronics 社製の PICAN2 のインタ フェースを介してマイコンと CAN 通信を行っている.

また,ロボットには本プロジェクトで開発された,全周圧力センサや音響センサが搭載されている. 全周圧力センサのデータは,マイコンによって処理され,オペレータPCへ送られる.音響センサはそ れ自身が無線化されており,バッテリを接続することで動作する.

オペレータ操作用の PC では,ロボットの運動計画を行ったりデータの記録を行ったりする.この PC には家庭用ゲーム機のコントローラが接続され,オペレータはこれを用いてロボットを操作する. オペレータ PC には Ubuntu14.04 がインストールされており,これらのプログラムは ROS indigo を利 用して開発されている.

防塵防水仕様のヘビ型ロボットの設計開発と掃除作業の実現が本プロジェクトの目標の1つであった.上で述べたロボットの構成により,防塵防水無線化仕様のヘビ型ロボットを新たに実現することができた.内部が錆で覆われた配管の内部をヘビ型ロボットが移動することで,ロボットが錆だらけになったことから,ある程度の清掃作業も実施できたと考える.錆だらけになったロボットを水洗いしたあとの様子が図2-3-1の左の写真である.以上により,当初の目標が達成された.



図 2-3-1 防塵防水無線化ヘビ型ロボットと内部構造

2 -1 -2) ヘビ型ロボットが配管あるいはダクト環境を移動するためのアルゴリズムの開発

図 2-3-2 に,本プロジェクトで新たに開発したヘビ型ロボットのモーションの例を示す. ヘビ型ロボットが配管の内部や外部を移動する,あるいはダクトの内部を移動する際に,ロボット の形状を螺旋形状にして,内部で突っ張ったり,外部で巻き付いたりすることで移動をする,螺旋捻 転運動を活用している.螺旋捻転運動は,移動環境が単純な直線形状であればそのまま利用できる が、実際にロボットが移動すべき環境は、曲管や分岐などを含む複雑な形状であり、螺旋捻転運動を 拡張する必要があった.そこで本研究プロジェクトでは,曲管部分の形状に合わせて螺旋形状を全体 的に曲がった形にする曲螺旋形状ならびに捻転推進時に曲螺旋形状を補正するアルゴリズムを提案 し、ヘビ型ロボットに実装して曲管部の走破を可能にした、一方で、曲管部分の形状とロボットの形 状をぴったりと一致させることがむずかしく、ロボットの形状にある程度のやわらかさを導入しなけ ればロボットに大きな負荷がかかることが分かった.そこで,ロボット関節のサーボ剛性と適切に調 整することで,ロボットの形状を保ちながら外力に対して適度に変形する方針をとりいれた.これに より、曲管を含む配管内部や、ダクトの内部で、ヘビ型ロボットがつっぱりながら螺旋捻転運動で移 動することを実現した.さらに,配管の外部を螺旋捻転運動で移動する際には,分岐点をすり抜ける ことができなければ、分岐点より先にロボットが進むことできないという問題に対し、螺旋縦波運動 を提案してこの問題を解決した.螺旋縦波運動は,捻転動作だけでは実現できなかったロボット形状 の接線方向にロボットを移動させるものであり、これにより分岐部分をすり抜けることができる.ロ ボットの接線方向にロボットを移動させるために、ロボット尾部から頭部に向けて双曲線関数で設計 される小さな波を伝播させるのであるが,初めにロボットの尾部に波形状を発生させる際に,重力の 影響を受けてロボットが下部にずり落ちてしまう問題に対しても,重力の影響を補正する目標形状を ロボットに与えることで効率のよい移動を実現している.

実環境を想定したロボットの運動生成が本プロジェクトの目標の1つであった.以上で述べたよう に,曲管を含む配管の内部や,ダクトの内部,分岐部分を含む配管外部の移動など,単純な螺旋縦波 運動では走破することのできない環境に対してアルゴリズムを提案し,さまざまな環境をヘビ型ロボ ットで移動することができることを示すことにより,目標を達成した.



図2-3-2 螺旋形状のヘビ型ロボット(左),曲螺旋の設計(中),螺旋縦波運動による配管分岐のすり抜け(右)

2 -1 -3) ヘビ型ロボットへの各種機能のシステムインテグレーション

図 2-3-3 に,福島ロボットテストフィールドの模擬配管の内部を移動するヘビ型ロボットの様子 と,この際の統合ヘビ型ロボットシステムの概要を示す.福島ロボットテストフィールドに設定され ている全長15m,内径200mmの配管(複数の曲管部分を含む)の内部を,ヘビ型ロボットは螺 旋捻転運動をして走破することができることを実証した.ヘビ型ロボットが配管内を移動する様子 は, ImPACT TRC の第6回評価会,ならびに第7回評価会のデモンストレーションにて一般公開され た.特に第7回評価会においては,我々の研究開発グループで開発された様々な技術がヘビ型ロボッ トシステムに統合されており、ロボットを遠隔操作して点検作業をするためにカメラ画像やロボット 形状を表示するユーザインタフェースや、IMU(慣性計測装置)を使った滑落検出機能,全周圧力セ ンサの情報から配管内の位置をオドメトリで推定する機能,無線化音響センサにより配管内のロボッ トの位置を推定する機能など,各種機能が統合されていた.本プロジェクトで研究開発された要素技 術を統合して,ヘビ型ロボットシステムを用いた配管点検が実施可能であることを示した.なお,第 5回評価会においては,複雑に曲がっているダクト(断面寸法 250mm × 250mm, 全長約4m)の内部を ヘビ型ロボットが螺旋捻転運動により走破可能であることを実証しており,配管の内部のみならず, ダクトの内部の点検・調査においても,ヘビ型ロボットを活用することができる可能性を示してい る.さらに,それ以前の評価会においては,ヘビ型ロボットが100A配管の外周に巻き付いて移動す るデモンストレーションも実施しており,以上によりヘビ型ロボットを様々な環境に適用できること を本プロジェクトにより実証した.

高い走破性をもつタフな索状ロボットの構築が本プロジェクトの目標の1つであった.福島ロボットテストフィールドに設置されている模擬配管環境は、これまでのヘビ型ロボットでは走破できないような複雑かつ大規模な構造体であり、これを我々の開発したヘビ型ロボットが自己位置を推定したり滑落を検知したりしながら走破できたことで、目標を達成できたと考える.



図2-3-3 福島ロボットテストフィールドの模擬配管の内部を移動するヘビ型ロボットと統合シス テム

2-1-4)ヘビ型ロボット全身用触覚センサの開発

曲面に被覆実装可能な触覚センサの設計,取得情報の簡略化,接線方向力を推定可能なセンサ構造の提案,ヘビ型ロボットのための検出回路構成,防水防塵性・耐久性の向上を行った.

曲面に被覆実装可能な触覚センサの設計については,各関節を結ぶリンク部において外界と接する 円柱形状の外殻表面の全体を覆うため,フレキシブル基板と薄い感圧導電性ゴムからなる柔軟なシー ト状触覚センサを設計した.関節の可動範囲を制限せず,かつ,衝撃による破損リスクを低減するた めに,外殻表面にはセンサ基板の感圧部のみを配置して,検出回路や配線はセンサ基板を折り曲げて 外殻内部に収納する構造とした.

取得情報の簡略化については,圧力分布重心位置(Center of Pressure, CoP)検出回路を採用す ることで,多数の検出エレメントから得られる情報から制御に有用な情報のみをあらかじめ抽出可能 にした.一般的に,触覚センサを表面全体に被覆実装する際には検出エレメントを隙間なく配置する 必要があるため,分解能を高くするには多数の小さな検出エレメントに分割する必要がある.このと き,全ての応答量を取得するには多数の配線と多大な処理手順が必要となる.そのため内部空間に限 りがあるヘビ型ロボットに実装することは困難である.これに対して,CoP検出回路を採用すること で,検出エレメントの個数に寄らず4か所の応答量の計測のみで面内の圧力分布の重心位置と総荷重 が取得できるようにした.一つのリンクが複数の環境と同時に接触することは稀であり,環境との接 触状態を把握する上では,圧力分布の重心と総量が取得できれば制御に十分利用可能であることを示 した.

接線方向力を推定可能なセンサ構造の提案については,同一特性のシート状触覚センサを複数の層 状に配置して応答の差を検出する手法を提案した.接触力の検出には一般に構造変形に伴う何らかの 物理量の変化を利用するが,薄型構造では接線方向力による構造変形が小さいためこの力の検出が困 難である.そこで,それぞれ法線方向力を検出可能な2枚のシート状触覚センサを層状に並べ,その 間を弾性材料で埋めることによって,接線方向力により生じる法線方向力の作用位置の差を検出する ことで接線方向力を推定する新たな手法を提案した.全体の厚さは4mm以内である.また,本センサ 構造を採用することにより,法線方向力の推定においても2層のセンサからの推定値を複合的に利用 できるため,測定精度の向上および測定レンジの拡大が可能である可能性が確認された.

ヘビ型ロボットのための検出回路構成については,搭載マイコンの機能と配置に合わせた情報出力 形式の選択が要点となる.多連結構造の各関節にサーボモータを配して交互にピッチ・ヨー方向の回 転を可能としているため,ヘビ型ロボットは2リンクごとのモジュール構造が採用されている.触覚 センサ情報の処理に利用するマイコンも2リンクごとに搭載されており,これに合わせた情報出力形 式もモジュール化することが望ましい.そのため I2C シリアル通信方式を採用し,I2C アドレスごと に ID を持たせ,一つのマイコンで計4部位の触覚センサ情報を取得可能とした.マイコンから外部 の操作 PC に情報を送信する際には,モジュール ID とセンサ ID の組み合わせからロボットの各部位 の情報を統合することができる.

防水防塵性・耐久性の向上については,感圧部を被覆するシリコーンゴムの形状の工夫による性能 向上を行った.感圧部の構成材料であるフレキシブル基板と感圧導電性ゴムはいずれも柔軟であるた め圧縮による破損は起きにくいが,突起等に押し付けられた際に生じる引き裂きには弱い.こうした 破損を防ぎ,防水防塵性も付与するためにはゴム材料による被覆が有効である.ここでは柔軟かつ容 易に成型可能な付加型シリコーンゴムを採用し,触覚センサとの密着性を確保することで感度低下を 抑制しつつ,センサの破損につながる引き裂き方向の荷重を外殻で支持するための固定方法を採用す ることで,センサの機能を維持したまま防水防塵性と耐久性の向上を行った.



図2-3-4 ヘビ型ロボット用触覚センサの構造模式図(左),全リンクに触覚センサを搭載したヘビ型ロボットの外観(右)



図2-3-5 ヘビ型ロボット用触覚センサの情報取得とオペレータ表示画面例

2 -1 -5)音響センサシステムの開発

太索状ロボットの聴覚機能として以下の2つを実現した.

音響センサに基づく配管内進入距離推定:配管内に進入したロボットの進入距離を推定することで、ロボットのオペレーションと配管検査の支援が期待される.

 音響センサと慣性センサを組み合わせた配管形状推定:配管形状とロボット位置を推定することで,特に図面が入手できない配管におけるロボットのオペレーションと配管検査の支援が期待される.

音響センサに基づく配管内進入距離推定は,複数の屈曲部をもつ金属製配管内部においても利用可 能な距離推定技術の実現を目指した.金属製配管の内部では従来の大局的位置情報は使用できない. 例えば,GPS や地磁気などの電磁波は配管内部に到達できず.レーザー距離センサは屈曲部を超えら れない.一方で局所的位置情報,例えば慣性センサやオドメトリでは長時間の運用で誤差が累積す る,という問題がある.本プロジェクトでは,ロボットにスピーカを装着,配管入り口にマイクロホ ンを配置(もしくはその逆)し,スピーカとマイクロホンの間の音の到達時間から距離を推定する技 術(図2-3-6)を開発した.スピーカから発せられた試験音は配管の形状に沿って伝播するため,ロ ボットの進入経路に沿った距離を推定できる.また,頑健に音の到達時間差を計測するため,高い信 号対雑音比を得やすい time stretched pulse (TSP)を用いる推定法を採用した.有線接続ロボット (図2-3-7)においては,スピーカとマイクロホンをオーディオケーブルでも接続することで,配管 内の空気を伝播する音響信号とオーディオケーブルを通じて伝わる音響信号を比較することで音の到 達時間を測定した.





図 2-3-7 末尾にマイクロホンと慣 性センサを装着したロボット

無線接続ロボットにおいては,有線接続で行っていたような到達時間測定手法は適用できない.ス ピーカ側から一定間隔(例えば2秒間隔)でスピーカから試験音を発することにしておき,その試験 音をマイクロホンで録音すると,スピーカとマイクロホンの間の距離が増大するとマイクロホン側の 試験音受信間隔は2秒よりも大きくなり,距離が減少すると間隔は2秒よりも小さくなる.この手法 では,一般的なオーディオデバイスに搭載されているクロックジェネレータである水晶発振器は10-5 程度の精度であるため,毎秒数センチメートル程度の誤差が累積してしまうという問題がある.本プ ロジェクトではこの問題を解決するため,オーディオデバイス RASP-ZX に恒温槽付水晶発振器 (OCX0)を搭載できるように改造した(図2-3-8).OCX0 は恒温槽(オーブン)で水晶発振器の温度を 一定に保つことで,精度は10-9 程度にまで向上する.これにより1時間連続動作させても距離推定 誤差を1cm 未満に抑えることができ,ロボット本体のバッテリー駆動時間を考慮すると実用上十分な 精度を達成できる.



図 2-3-8 無線化のための恒温槽付水晶発振器とそれらのロボットへの装着の様子

音響センサと慣性センサを組み合わせた配管形状推定では,配管形状とロボット位置を表現する状態空間モデルを設計し,音響センサから得られるロボットの配管内進入距離と,慣性センサから得られるロボットの姿勢から状態空間モデル(図2-3-10)の潜在変数を推定することで配管形状推定を実現した.配管形状を配管と同じ半径をもつ球の集合として定義し,ロボット位置をその領域内の一点とする(図2-3-9).(1)音が伝播する経路を配管形状に基づいて計算し,(2)ロボットの進入距離,ロボットの姿勢(進行方向),音の伝播経路からロボットの位置を更新し,(3)ロボットの位置を中心とした球をこれまでの配管形状に追加することで配管形状を更新する,といった3ステップを反復することで配管形状を逐次的に推定する.ロボット位置の推定には拡張カルマンフィルタを用いる.



2 -1 -6) 触覚センサ情報を用いたオドメトリ法

非車輪型索状ロボットに搭載されている全身用触覚センサによって接触点の位置情報が得られるこ とを活用し,ロボットの関節角の情報と統合することにより,ロボットが移動した三次元的な軌跡を 推定する手法として開発したものである.瓦礫内部や配管内部等の狭隘空間に進入したロボットは操 作者が直接目視にて操作できないため,適切に位置姿勢を提示する必要があるが,そのためには第三 者視点によりロボットの様子を提示するシステムが有用であり,三次元的な位置姿勢を求める必要が ある.

非車輪型索状ロボットは, Crawler-gait や螺旋捻転運動のように, 接触点における滑りが少ない運動により推進することができる.これは車輪が転がる際に接触点において滑りがほとんど発生していない状況に対応している.そこで車輪の回転量から移動量を求めるオドメトリ法に着想を得て, 接地しているリンクが環境に対して滑らないものと仮定し, 接地していない部分の変形を関節角度情報および IMU による先頭部の三次元姿勢変化を追跡することにより移動量を求める方法を新たに開発した.これにより, 初期位置姿勢を基準として, 現在までの各時刻における位置姿勢をリアルタイムに求めることができるようになった.図2-3-11 は物理シミュレータにおいて Crawler-gait に適用した場合のオドメトリ結果, 図2-3-12 は螺旋捻転運動によりパイプを移動した際のオドメトリ結果を示している.





図 2-3-11 平面上を Crawler-gait により移動する非車輪型素状ロボットのオドメトリ結果
 (左)と物理シミュレータ画面(右)

図 2-3-12 パイプ内を螺旋捻転する索状ロボットの物理シミュレータ画面(左)と各時刻のオ ドメトリ結果(右)グレー表示は初期姿勢を示

また,移動した軌跡に過去に接触した接触位置情報を重畳表示することにより,接触した箇所の履歴を提示することで,移動環境をモニタリングする手段を提供することが可能である.とくに配管内における螺旋捻転運動においては,多くの点においてロボットが配管壁面に接触しているため,累積された点群位置情報により配管マップを得ることができる.図2-3-13に第6回評価会の際にデモンストレーションした際に得られたオドメトリの結果と配管マップを示す.



図 2-3-13 字状配管内(左)を移動するロボットの各時刻における位置表示とそれまでの接触点位 置を重畳表示することにより生成した配管マップ(右)

2 -1 -7) 垂直配管昇降時の滑落判定方法の提案

太径索状ロボットには慣性センサが搭載されており,加速度から滑落を検出できる.しかし,ロボ ット動作の特性上,測定値には非常に大きなノイズが存在する.通常のローパスフィルタでは遅れが 生じ,迅速な滑落検出に支障をきたすため,線形動的システムモデルを機械学習の手法により構築 し,カルマンフィルタによる真値推定を行った.また,推定値に基づく滑落判定基準を考案した.

検出アルゴリズムには,ロボット個体や環境ごとの学習が不要であることが望まれる.図2-3-14 左 側に加速度の予測値・滑落検出時刻・実際の滑落開始時刻をプロットする.左上の図は,ミドルパワ ー型(京都大学)の配管外周巻付時のデータで訓練された学習器で,防塵防水型(岡山大学)の配管 内巻付時の滑落推定を行ったものである.左下の図は,防塵防水型の配管内巻付時のデータで訓練し 直したモデルを使用した場合の判定結果を表す.縦に引かれた点線の時刻において滑落と判定されて いる.いずれの場合も,実際の滑落は正しく判定されている.一方で,下の図では滑落判定が一回減 少しているが,上の図の対応する滑落判定は誤報である.このように,当然ながら特定のロボット・ 環境で学習することで精度向上が見込めるが,全く異なるシステム・環境で学習した結果をそのまま 適用しても十分に機能する.



図2-3-14 左:加速度測定値(緑),推定値(青),滑落判定時刻(縦点線).右:インタフェ ース.左上:別ロボット・別環境データによる学習結果を適用した場合.左下:ロボット・環境に 合わせて学習した結果を適用した場合.

2 -1 -8)配管内点検用遠隔操作インタフェースの開発

Prof. Robin Murphy からの指摘を受けて改善する前のものと,改善した後のものをそれぞれ図 2-3-15,図 2-3-16 に示す.構成要素は以下のとおりである(改善前と改善後で重複あり).

- 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
- F) 配管地図提示画面
- G) 配管内部の展開図提示画面
- H) 遠隔操作に特化した情報提示画面(改善後のみ)

構成要素の概要を以下に示す.



図2-3-15 配管内点検用遠隔操作インタフェース(改善前)



図2-3-16 配管内点検用遠隔操作インタフェース(改善後).上がメイン画面,必要に応じてオペレータが画面を切り替える

まず A,B に関して,ヘビ型ロボットが螺旋捻転運動や Crawler-Gait で移動する場合,あるリンク を基準とした座標系を設定すると形状全体が動作に合わせて回転するなど,オペレータにとってロボ ットの体勢の把握が視覚的に難しくなる場合がある.そこで,ヘビ型ロボットの形状を提示する際 に,ロボットが移動方式に応じて様々な形状をとる場合でもオペレータから見やすい視点を提示でき るようにヘビ型ロボットの基準となる座標系を定めている.

また,Cにおいては,現在形状が目標形状からどれほど逸脱しているかを認識しやすくするため に,目標形状と現在形状を対応するリンク間距離を最小化するように各ロボットモデル(目標形状: 半透明,現在形状:不透明)を重ね合わせて提示している.ここでロボットモデル表示の際には,違いが分かるように目標形状のロボットモデルを半透明,現在形状のロボットモデルを不透明で表示している.この手法により,ロボットモデルがほぼ重なっている状態だと違いが分からず,したがって 形状のずれはないと判断でき,目で見て分かるほどロボットモデルのずれが大きい場合は,形状もそれだけずれていると判断できることが期待される.なお,A,B,Cにおいて,改善前のインタフェースではCのみに2次元平面(xy平面)のグリッドを表示していたが,Prof. Robin Murphy からの指摘により,表示するグリッドは3次元(xy平面,yz平面,xz平面)がよく,またグリッドの間隔はロボットの長さを把握できる程度がよい,とのことから,改善後のインタフェースではその点を考慮した表示としている.

また関節角度の目標値と現在値との差に応じて色付けしたマーカ球を提示することで,現在形状が 目標形状からどれだけ逸脱しているかを認識しやすくしている.ここでは目標関節角度と現在関節角 度の差が15度以上になると赤色,0-15度までは緑 赤のグラデーションにしている.なお,Prof. Robin Murphy からの指摘により,「マーカ球の提示」は「形状の重ね合わせ」と意味する情報(形状 の差)が重複しているとのことから,改善後のインタフェースではマーカ球を表示しないこととし た.

またBにおいては、1リンクおきに搭載された触覚センサの情報を用いて、ヘビ型ロボットが配管 から受ける力を矢印の長さと色で提示している.この機能により適切な力で配管内に突っ張っている かどうかや、曲管に差し掛かったかどうか、大きすぎる力を環境から受けたり、反対に環境に与えた りしていないかどうかを認識しやすくなる.なお、Prof. Robin Murphyからの指摘により、接触位置 に平面パッチを提示すれば接触面の情報をオペレータが認識しやすくなるとのことから、改善後のイ ンタフェースのHの画面においては、触覚センサの情報を用いて接触平面を表示することとした.

E については, IMU から得られる重力方向を基準として, D のカメラ映像の姿勢を補正した映像である.これにより,螺旋捻転運動に伴いカメラ映像も回転してしまう問題を解決している.

Fでは、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.軌跡は音響 システムを用いて推定された自己位置である.ここで、不透明水色の部分は音響システム用いて推定 された配管地図であり、半透明水色の部分はヘビ型ロボットの先頭に搭載された IMU と現在の形状を 用いて計算された配管地図であることを示している.また、ヘビ型ロボットの CG モデルも配管地図 上の現在の推定位置に表示されている.さらに、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.写真を画面 上に貼り付ける際には、複数の写真同士が重複して表示されないよう、干渉を回避して配置する.こ れにより、配管上のどこで撮影された写真なのかが直感的に分かりやすくなっている.

Gは、ヘビ型ロボットのカメラで撮影した画像を用いて作成された配管内部の展開図である.展開 図を左右にスクロール表示することで、実際にはつながっているはずの部分が左右に分断される問題 を解決している.さらに、スクロール時に、Fにおける三次元の配管地図との対応が分かるように、 赤い線分をインジケータとして展開図上の中心に、また三次元の配管周りを回転するように表示して いる.なお、図においては例として垂直な配管の展開図のみが提示されているが、他の2つの水平管 部分の展開図も同様に作成・提示可能である.なお、Prof. Robin Murphy からの指摘により、展開図 を用いても遠隔操作が容易になるわけではなく、また内部のリアルタイムな状態はカメラ映像で確認 できることから、改善後のインタフェースでは提示しないこととした.

Hは,改善後に新たに開発した画面である.Prof. Robin Murphy からの指摘により,改善前のイン タフェースは,観衆向けの説明型のインタフェースとなっているとのことから,改善後のインタフェ ースでは,遠隔操作に必要な情報に特化した画面をメインに構成することとした.ここでは現在の姿 勢を反映したヘビ型ロボットの現在形状が表示され,先頭カメラ映像が先頭リンクから表示されてい る.重力方向は紫色の矢印で提示されている.これにより,現在のヘビ型ロボットの向きやこれから 進入する環境を把握しやすくしている.また,目標形状も把握したいとのオペレータの希望から,目 標形状の半透明 CG モデルを現在形状の CG モデルと重ね合わせて表示している.さらに,触覚センサ 情報を用いて接触平面を提示することで,現在ヘビ型ロボットのいる環境の状態を把握しやすくして いる.接触リンク数を右下に提示することで,垂直管を登っている際にどれほどのリンクが突っ張っ ているのかを把握しやすくしている.また,滑落検知も同時に確認できるようにしている.

なお,改善後のインタフェースでは,D,E,Hをメインの画面とし,その他の情報が必要な際は画面 を切り替える形となっている.すべての情報を逐一オペレータに与えても効果的とは限らないため, オペレータの意思で選択できるようにしている.これらの改善により,洗練されたタフなインタフェ ースを開発することができた.

2-2) スムースタイプヘビ型ロボット

2-2-1)単純形状の連結による目標設計手法の構築

連続曲線を用いた目標形状設計手法を応用した.単純形状を連結して目標形状を設計する手法の提 案により,直感的に多彩な移動形態の設計が可能となり,これを用いることで不整地の高速移動,配 管上のフランジ乗り越え,はしご昇降を実現した.不整地を高速移動可能なCrawler-gaitでは,全 身を大きなクローラーベルトのように機能させることで,未知の不整地であっても体形をなじませな がら高速で移動することができる.配管上のフランジ乗り越えでは,配管径が不連続に変化するフラ ンジを,体を局所的に浮かせて跨ぐことで乗り越えることが可能である.はしご昇降では,はしご数 段にかけてぶら下がるような体形を作ることで安定してはしご上に乗ることができ,ケーブルが絡ま ないような動作で昇降することが可能である.さらに,異なる移動形態間を遷移する動作を提案し, これにより床を移動した状態から移動形態を遷移してはしごに取り付いて移動できる動作を実現し た.これらの成果は3件の査読付き国際会議で発表し,1件の査読付き学術論文(海外)に掲載され た.

2-2-2)滑らかな表面形状を持つヘビ型ロボットの開発

前身となる汎用的な構成を持つ「ImPACT Snake Middle Power Type」を開発した.このロボットは 各モジュールにマイコンが搭載されており,センサなどの追加搭載が容易なプラットホームとなって いる.また,櫛状のリンク形状を用いることで関節可動域の広さと表面形状の滑らかさを両立したへ ビ型ロボット「ImPACT Snake Smooth Type」を開発した.このロボットは滑らかな表面形状により環 境の凹凸に引っかかることなく移動することができ,はしご昇降を実現した.また,スポンジゴム製 のカバーを装着することで防水・防塵機能を付加することができる.



図2-3-17 非車輪型ヘビ型ロボット ImPACT Snake Middle Power Type[Takemori 2018]による配管 上のフランジ乗り越え(左図)と不整地の移動(右図)



図2-3-18 非車輪型ヘビ型ロボット ImPACT Snake Smooth Type[Takemori 2018](左図)とはしご昇 降(右図)

2 -3)能動車輪ヘビ型ロボット

2-3-1)タフな索状用コントローラの設計

環境適応性の向上,耐故障性の向上,作業失敗の予防とリカバリ方法の確立,作業用の制御方法の 確立,を目指して研究を行った.環境適応性の向上については,平面だけでなく段差,斜面,階段, 不整地,管内外,梯子を移動可能な制御方法を提案した.管外と梯子については非車輪型,それ以外 は車輪型の索状ロボット用の制御方法である.コントローラ設計を通じて明らかになった仕様に基づ き,タフな車輪型索状ロボット「T2 Snake-3」を開発し,前述のコントローラを実装することで制御 方法の有効性を実証した.搭載ロボットには近接覚センサ(金沢大学鈴木)が搭載されている.耐故 障性の向上については,故障検知を可能とするシステムを構築するとともに部分的電源喪失時にも動 作を継続する制御方法,1関節がフリー状態となった場合の制御方法について提案した.作業失敗の 予防とリカバリ方法の確立については,スタックからの復旧方法,管内移動時の滑落検知方法と回避 方法,について提案した.また,移動だけでなく「作業」を行うためのコントローラについても提案 し,Omni-Gripper(東北大学多田隈)を開発ロボットに統合することで配電盤開け,スイッチあけ, 小型ドア開け,小物体拾い,バルブ開閉,を実現した.これらの成果は合計9編の査読付き学術論文 (海外)に掲載された.

2-3-2)タフな車輪型索状ロボットの開発

前述の「T2 Snake-3」(図 2-3-19)を開発した.全長 1.7m に対して高さ 1m の段差越えを実現すると ともに,胴体のセンサ情報を利用した半自律階段昇降,先頭の 0mni-Gripper を利用した各種作業を 実現した.さらに,家屋内狭所に対応する専用機,実証用試験機,WRS2018 プラント災害予防チャレ ンジ用機体を開発し多数の実証実験を行った.特に図 2-3-20 に示すWRS2018 用機体はプラント災害 予防チャレンジ参加のために改良が施され,1.5m の高さにセンサ面がアクセスできるほか,1m の高 さで 0mni-Gripper を用いた作業を行うことができる.



図2-3-19 車輪型索状ロボット T2 Snake-3 [Tanaka 2018](右図)と バルブ開閉(左図, https://www.youtube.com/watch?v=3u17YB3zY4o&t=334s)



図2-3-20 WRS2018用の車輪型索状ロボット(左図)と 50Aボールバルブ開閉の様子(右図,https://www.youtube.com/watch?v=AzRZnBgJ7ho)

2-3-3) 索状用操作インタフェースの開発

開発したインタフェースを図 2-3-21 に示す.インタフェースにはロボットに搭載されたカメラ映像とともに,ロボットの現在姿勢やセンサ情報,エラー情報などが表示されている.操縦者はこれらの情報を見ながらゲームパッドを用いてロボット先頭の動作の指示,動作モードの変更などを行う. インタフェースの開発にあたって Prof. Robin Murphy から指摘された下記4点の改善を行った.

- ・ 配色の変更: 一般的に緑は"良い/安全",赤は"悪い/安全でない"ことを意味するため,赤と緑 を使用しないことを前提に,配色を変更した.
- ・ 近接覚センサの描画の変更: 面の傾きが直感的に理解できるようになった.
- ・ 余分な文字列の削除:動作モードを大きく表示し余分な文字列を削除することで視認性が向上.
- サーボエラー情報の提示方法の変更: エラー時には赤色を強調して表示するようにし,直感的にエラー情報を理解できるようになった.

さらに,スタック時の局所的な体形変化を行うことが可能なインタフェースについても開発した.





図2-3-21 操縦インタフェース(左:改善前,右:改善後)

2 -3 -4) 索状用グリッパ機構の開発

下記のように極低押付力・大変形なじみ把持を実現する柔剛切替グリッパ機構を統一機能として,膜型および新型の複数の数珠状グリッパによる耐切創性・耐火性まで実現した極限環境用グリッ パ機構を開発した.

・ 極低押付力,大変形なじみ把持

ジャミング膜グリッパ機構とは,二層のゴム膜間のみに粉体を封入した三層構造のことである (図2-3-22).粉体層を真空にすることで固化するジャミング転移と呼ばれる物理現象を活用して 物体把持を行う.従来の袋状ジャミンググリッパは袋内が粉体で満たされているため,対象形状 に馴染ませる際に過大な押付力を必要とした.しかし,袋を膜構造にすることで袋内部が中空と なるため,把持対象物を包み込む際に粉体が抵抗とならず,極低押付力での物体把持を可能とす る.一つのグリッパ装置で異型物体把持,ボタン押しや配電盤開けを可能とするグリッパ機構の 原理考案,および具現化を実現した.

<u>耐切創性(膜型,1次元ジャミング型)および耐火性ロボットハンドの開発</u>

防弾チョッキにも用いられる耐切創性の布を上記の柔剛切替グリッパ機構の用いることで,刃物を刃部からをも把持できる,つまり瓦礫内での割れたガラスや有刺鉄線を把持可能な耐切創性 グリッパ機構を実現した(図2-3-23).また,破れるという現象自体が起こらないグリッパ機構と して,数珠状の1次元線状ジャミング機構なるものを新たに考案・具現化してトーラス状の構造 を有するグリッパ機構を構成した(図2-3-24).この構成により,鋭利・棒状の対象物は勿論,ビ ーズ部品を耐熱性の高い素材で構成することが可能となるため,耐火性を有するグリッパ機構を 実現するに至った(図2-3-25).



図 2-3-22 柔剛切替式ジャミング膜グリッパ機構の原理(左図)と ジャミング膜グリッパ機構の実機外観(右図)



図2-3-23 耐切創性式グリッパ機構による鋭利対象物の把持.大型ハサミ(左図)と ニッパ(右 図)の鋭利刃部からの接触把持



図2-3-24 1次元ジャミンググリッパ機構:松野Gに提供したロボットハンド機構(左図)と 索状 プラットホームとの統合機(右図) (索状プラットホーム:電通大田中G)





図2-3-25 耐火性グリッパ機構(索状プラットホームはじめ各種プラットホームに搭載可能なように構成)

2-3-5)能動車輪ヘビ型ロボット用近接覚センサの開発

省スペース性と実用性を考慮したセンサ回路を提案した.能動車輪ヘビ型ロボットはモジュールごとに両側に配置された車輪に駆動力を伝達して効率的に推進するタイプであり,非平坦路面において

も多連結機構を利用して必要な車輪の環境との接地状態を維持することが重要である.これをセンシングによって達成するために,両輪の中央底部において路面との距離と姿勢誤差を推定可能な近接覚センサを開発した.2×2のマトリクス状に赤外フォトリフレクタを配置し,路面からの反射光により生じる光電流分布の総量と偏りから距離と姿勢誤差を推定可能とした.必要な計測レンジと分解能を得るため,フォトリフレクタの指向性の選定および配置する姿勢の光学シミュレーションに基づく最適化を行った.また,センサを20mm四方のスペースに収めるためにアンプ回路の小型化を行うとともに,搭載マイコンでの処理を容易にするために直流単電源3.3Vおよび9Vで駆動可能な回路構成とした.なお,赤外光を照射し続けることは電力消費が大きいため,ON/OFF切替回路を追加して制御上必要なときのみ発光可能とした.



図2-3-26 能動車輪ヘビ型ロボット用近接覚センサの実装外観(左), センサ単体の外観(カバーあり,カバーなし)(右)

3)成果の活用

- 3 -1)防塵防水無線化ヘビ型ロボット
- ・ ××社の協力により,配管内の点検にヘビ型ロボットを利用する実証実験を実施した.
- ・ 住友重機械工業(株)との共同研究により,密集配管環境でヘビ型ロボットを活用する共同研究 を実施した.
- 社の協力により、ダクト内の点検作業にヘビ型ロボットを利用するための実証実験を実施した。
- ・ 西日本豪雨災害に伴う半田山土砂崩れ現場にて、ヘビ型ロボットにより全倒壊家屋内ならびに半 倒壊家屋内を探索する実証実験を実施した。
- ・ World Robot Summit 2018 のインフラ・災害対応カテゴリ内の災害対応標準性能評価チャレンジに 参加し,標準化されたロボットテストフィールドにて実証実験を行った.
- ・ ヘビ型ロボット用の触覚センサを 2016 年 10 月以降プラットホームに統合開始.オペレータへの ロボット 環境間の接触状態の可視化を実現.
- 0CX0 を搭載したオーディオデバイスは,独立に動作する複数のオーディオデバイスを高度に同期 することができるため,距離測定のみならず様々なマイクロホンアレイ・スピーカアレイ信号処 理技術に応用できる.
- 配管形状推定技術は、配管内部以外の GPS や画像が使用できないロボットや環境においてもロボットの移動経路や地図を推定する、simultaneous localization and mapping (SLAM)の代用技術として応用できる。
- 3-2)スムースタイプヘビ型ロボット
- ・ 社より,配管点検に使用したいというという要請があり,実証実験を行った.

- ・ 2018 年 7 月の西日本豪雨災害に伴う半田山土砂崩れ現場の倒壊家屋内の探索を行った.
- 3-3)能動車輪ヘビ型ロボット
- ・ ××社, 社, 社, オフィス天井裏,ダクト内,家屋の床下および天井裏の点検に使用したいとの要請があり,実証実験を行った.
- ・ 西日本豪雨災害に伴う半田山土砂崩れ現場の倒壊家屋内の探索実験を行った.
- World Robot Summit 2018のプラント災害予防チャレンジに参加し,実証実験を行った.狭所進入や1.5mの高さの計器類確認,バルブ開閉,異常温度の検知,C02 濃度の測定,異音検知などを実現した.決勝に進むことはできなかったが,プラント点検への索状ロボットの適用可能性を示した.
- ・ 能動車輪ヘビ型ロボット用の近接覚センサを 2016 年 5 月以降プラットホームに統合開始. 階段走 破における半自律制御や遠隔操作時の地形認識に利用.
- 3-4)柔軟グリッパ機構
- ・ 多数の企業より活用に関する問い合わせを受けている.
- ベンチャー企業設立に向けて、官民ファンド東北大学ベンチャーパートナーズのBPI投資に採択された。

(4)脚ロボット

1)サマリー

脚ロボットの開発目標は,災害現場に見られる瓦礫路面だけでなくプラントに設置されている垂直 はしごも移動可能な高い移動能力と,固いバルブの開閉やコンクリート壁への穿孔などが可能な力強 い作業能力を実現することである.この目標のもと4 肢共通構造の脚ロボット WAREC-1 を開発し,安 全囲い付きの垂直はしご昇降や瓦礫路面での腹ばい移動を実現した.要素技術としては,50kgの物体 を無通電把持できる全長 300mm 程度のロボットハンドを開発し,ハンマードリルを利用することでコ ンクリート板を穿孔可能なことを確認した.環境認識技術としては,自己位置推定と周囲環境の3次 元地図作成,はしご検出,音源検出に関する技術を開発し,WAREC-1 に統合した.さらに,ロボット の遠隔操作のために移動と作業のユーザインタフェースを開発し,遠隔操作にて開口トルクが約 100Nm という固いバルブの開閉を実現し,開発した技術の有効性を実証した.

2) 技術的成果

2 - 1) 脚口ボットのプラットホーム

災害対応を目的とした脚ロボットとして,4 肢ロボット WAREC-1(図 2-4-1)を開発した.2 肢立ち 時の全高が約1,700mm で,体重は約150kg である.多くのヒューマノイドロボットとは異なり,脚と 腕の区別がないロボットである.4 脚歩行や2 脚歩行だけでなく,はしご昇降や胴体部を積極的に環 境に接触させての移動が可能である.作業については,腕に相当する肢も脚と同じような力強さがあ るため,固いバルブの開閉などの力強い作業も可能である.



(a) 外観 (b) 自由度構成図 図 2-4-1 4 肢ロボット WAREC-1

WAREC-1 のサイズについては,JIS(Japanese Industrial Standards)や MIL(Military Specification Standards)などで規格化されている階段や安全囲い付き垂直はしごなどの寸法を参考 にして決定した.各肢の自由度は,手先・足先の位置と姿勢を制御するためには最低6自由度が必要 であるが,冗長性を持たせるために1肢7自由度とした.また,各移動方式の遷移や腹ばい移動時に は大きな可動範囲が各関節に求められるため,大きな可動角を可能な限り取れるように設計した.

胴体部を環境に接触させて移動する腹ばい移動時などに,ロボットの配線が環境に接触することを防ぐため,中空構造のアクチュエータユニットを新規に開発し,配線を各肢内部に収納することとした.WAREC-1の各関節の要求仕様から,3つの出力(大出力,中出力,小出力)の中空構造を持つアクチュエータユニットを開発した(表 2-4-1).

	高出力	中出力		小出力
外形 mm	153 x 132	126 x 131		121 x 114
中空径 mm	22		22	17
質量 kg	5.8	3.4		2.4
減速費	100	160	100	160
定格トルク Nm	317	222	127	95
定格回転数 rpm	11.2	9.7	15.5	11.7

表2-4-1 中空構造のアクチュエータユニットの仕様

図 2-4-2 と図 2-4-3 に大出力のアクチュエータユニットの断面図と分解図をそれぞれ示す.モータ にはフレームレスモータ(TQ-systems 社)を採用した.減速機には波動歯車(株式会社ハーモニッ ク・ドライブ・システムズ)を採用し,モータのトルクは出力軸のモータシャフト(13)を介して波 動歯車のウェーブジェネレータ(09)に入力される.その後,波動歯車にて減速され,トルクは出力 フランジ(04)に伝達される.ロータ(14)の回転角度検出には中空軸タイプの磁気式インクリメン タル形エンコーダ(分解能:14,400 cpr,レニショー株式会社)(21,24)を搭載し,減速後の出力軸 の回転角度を検出するために,磁気式アブソリュート形エンコーダ(分解能:19 bits,レニショー株 式会社)(25,27)を搭載している.外部から粉塵が混入することを防ぐために,オイルシール(16) と0リング(06,17,20)を使用し,さらにシール付きの深溝玉軸受(12)を選択した.



図 2-4-2 高出力のアクチュエータユニットの断面図



図 2-4-3 高出力のアクチュエータユニットの分解図

胴体表面には,図 2-4-1(a)のように突き出し長さが固定であるスパイクを多数設け,胴体部を環境 に接触させてロボットが移動する際に,環境と引っ掛かりを生むようにしている.この機構により, 腹ばい移動時などに,ロボットが路面に対して滑動する量を低減することができる.さらに,大きな 段差をよじ登る際にも,胴体部を段差に接触させて引っ掛けることで踏破できることが期待される. エンドエフェクタについては,プロジェクト開始時にはまず移動能力に注目し,フック形状を持つ ものを開発した(図 2-4-4).WAREC-1 は4肢共通構造のロボットというコンセプトであるため,エン ドエフェクタについても同じものを各肢に搭載する.はしご昇降時には脚側のエンドエフェクタの

や の溝をはしごの桟に引っ掛け,腕側のエンドエフェクタについては のフックを桟や支柱に掛け ることで,はしご昇降が可能である.



図 2-4-4 フック形状を持つエンドエフェクタ

WAREC-1 の電装・制御システムには,分散制御システムと小型分散モータドライバを採用した.全身の運動制御を行うためのコンピュータシステムには,Intel® Core™ i7 2.1GHz のシングルボードコンピュータを選定した.この上位のコンピュータ内では,ロボットの動作生成や各種センサデータを用いた安定化制御が実行される.分散制御システムには,当初は CAN を使用していたが,通信速度を改善するため EtherCAT に変更した.小型分散モータドライバには,超小型モータドライバ Gold Twitter (Elmo Motion Control 社)を使用している.モータのロータの回転角度をインクリメンタル 形エンコーダで,減速後の出力軸の回転角度をアブソリュート形エンコーダで検出しているが,両エンコーダ値をモータドライバにて受信後,回転角度を計算し,その結果を上位の CPU ボードに EtherCAT 通信にて送信する.それと同時に,CPU ボードから送信されてくる目標回転角に追従するように位置のサーボ制御を小型分散モータドライバ内でも実行している.

ロボットの安定化制御などに用いるセンサとして,IMU(Inertial Measurement Unit)を胴体内部 に搭載し,各肢のエンドエフェクタ部の手首・足首に相当する箇所に 6 軸力覚センサを搭載している. どちらのセンサも CPU ボードに USB 接続し,データを取得している.WAREC-1 の電装システムの全体 像を図 2-4-5 に示す.

ロボットのミドルウェアには ROS (Robot Operating System)を採用した.ROS を利用することで,脚ロボット分科会内の他研究者の要素技術を効率よく統合できるようにしている.



図 2-4-5 WAREC-1 の電装システム

設計したアクチュエータユニットが要求仕様を満たしているかどうかを確認するために,パウダブレーキやトルク回転メータを持つ性能評価試験機を製作した(図 2-4-6).アクチュエータユニットの 出力回転数が約 10deg/s から 70deg/s の間で 5 段階に変化するように速度指令値を与え,アクチュエ ータユニットを等速回転させた.パウダブレーキへの供給電流を増やし,各出力回転数において,ア クチュエータユニットの出力トルクを増加させる実験を行った.各試行においてトルク回転メータに てアクチュエータユニットの回転数と負荷トルクを測定した.実験結果より,大出力のアクチュエー タユニットの定格回転数 11.2 rpm (= 67.2 deg/s)にて定格トルク 317 Nm のトルクが発揮できてい ることが確認できた.



図 2-4-6 アクチュエータユニット単体の性能評価試験機

WAREC-1 の運動性能を評価するために,様々な環境において評価実験を行った.脚ロボットにとっ て踏破が難しいとされている安全囲い付き垂直はしご(桟の間隔:225mm,支柱の間隔:600mm)の昇 降を実現した(図2-4-7).また,WAREC-1は4脚歩行での階段昇降も可能である(図2-4-8).WAREC-1の特長は胴体部を積極的に路面に接触させて移動することであるが,瓦礫材をランダムに敷き詰め た崩壊の危険性のある路面において腹ばい移動も実現した(図2-4-9).脚接地面が変形するような路 面の移動は,特に2脚ロボットでは難しいが,WAREC-1は胴体部を接地する超安定姿勢を取ることで 移動可能である.さらに,従来の脚ロボットは脚長よりも高い段差を乗り越えることが難しいが,胴 体部を積極的に接地させることで,WAREC-1の脚長よりも高い約900mmの段差も踏破した(図2-4-10).



図 2-4-7 安全囲い付き垂直はしご昇降



図 2-4-8 瓦礫材をランダムに敷き詰めた崩壊の危険性のある路面での腹ばい移動



図 2-4-9 階段昇降



図 2-4-10 脚長よりも高い約 900mm の段差昇降

脚ロボット分科会で開発された要素技術の統合例を図2-4-11に示す.この例では,高出力ロボット ハンドを WAREC-1の1肢に搭載し, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)用の測域センサ アレイと過去画像履歴を用いた俯瞰映像提示システム用のカメラを搭載している.さらに,WAREC-1 を移動ユーザインタフェースと作業インタフェースで遠隔操作することにより,3肢での腹ばい移動 と,開口トルクが約 100Nm という固いバルブの開閉という力強い作業を実現した(図 2-4-12).各要 素技術について,次節以降で詳細に説明する.



図 2-4-11 各要素技術の WAREC-1 への統合例



図 2-4-12 遠隔操作によるバルブ開閉

2-2) 高出力ロボットハンド

中村一也(並木精密宝石)・毛利哲也(岐阜大学)は,脚ロボット用ハンドとして試作3号機まで 研究開発をした.その研究開発方針は,

- (a) 物体の把持操作のため,4指以上.
- (b) 各指は3関節3自由度以上.
- (c) 拇指対向性を確保.
- (d) 災害対応ロボットの自重把持.
- (e) 無通電で物体の把持を継続可能.
- (f) 重量 2.0kg 以下.
- (g) ロボットアームへの接続可能.
- (h) 制御回路を掌に内蔵.
- とした.

災害現場ではロボットは長時間の屋外作業が想定される.このようなロボットは高出力な指先力を 実現できるが,物体把持を継続するためには電力の供給継続が必要になる.そこで,災害対応ロボッ トの自重を保持するため,1指あたり100Nの指先力を目標とし,バックドライバビリティのない無通 電ロック機構を採用した.無通電ロック機構は,くさび効果により機構的に入力側のトルクを出力側 のトルクヘー方向へ伝達する.また,無通電時に指先力を維持するために,指腹部や掌部には弾性部 材を配置した.2次試作機として設計した指機構を図2-4-13に示す.ボールネジ機構と無通電ロック 機構を内蔵しており,高精度な位置決めと高出力な指先力が無通電で維持可能な4関節3自由度のロ ボット指を実現する.第1関節は内転・外転.第2,3関節は屈曲・伸展する.指機構は,関節単位で のモジュール化,指単位でのユニット化した.

汎用工具やバルブの開閉動作のため,指機構を図2-4-14のように4指を配置してロボットハンドを 構成した.4指はモジュール化,ユニット化された指機構を使用した.各関節の可動範囲は,第1関 節から順に-45~45deg,0~90deg,0~90degである.小物体から重量物の把持を実現する ため,4指は対向性を有した.これまでに試作した1~3号機までの仕様を表2-4-2に示す.また,制 御装置の小型・軽量化のため FPGAを用いた省配線制御システムを導入し,そのFPGA基板(モータド ライバ,PWM出力,アップ・ダウンカウンタ,電流検出機能)を掌部に内蔵した(図2-4-15参照).



図 2-4-13 ロボットハンド試作 2 号機の指機構

	First generation	Second generation	Third generation
Appearance	The second second	Notice of Contraction	Star
Total length [mm]	328	304	308
Weight [kg]	1.992	2.341	2.447
Joint number	12	16	16
DOF	12	12	12
Fingertip force [N]	125	150	150
Torque sensor		4	12

- 衣 2-4-2 1/1元用光 しに脚口小 ツト 用ハノト	表 2-4-2	研究開発した脚ロボット用ハンド
--------------------------------	---------	-----------------



図 2-4-14 ロボットハンド試作 2 号機の指先可動範囲



図 2-4-15 モータドライバ基板

ハンドの機能を評価するために,ロボットハンド単体にてハンマードリルを把持し,コンクリート 板を穿孔する試験を行った.図2-4-16に示すようにハンマードリルのサイドグリップは治具を介し てフレームに固定し,ロボットハンドの3指によるグリップの把持と1指によるトリガ操作を行っ た.コンクリート板は油圧ジャッキでハンマードリルの穿孔に必要となる予圧を事前に与えた.3指 によるハンマードリルのグリップの把持は,関節速度制御による握り込みと無通電による保持により 行った.また,ハンマードリルのトリガはゲーム用コントローラを用いて遠隔操作した.さらに,ト リガ操作で生じる反力は,ハンド指機構に内蔵した小型トルクセンサにより計測して,操作者にコン トローラの振動によりに提示した.実験では,ロボットハンドによる把持・操作したハンマードリル を用いてコンクリート板の穿孔完了に15分を要した.穿孔中は高周波数でロボットハンドがハンマ ードリルと共に振動していたが,穿孔完遂後もロボットハンドの正常動作を確認した.

また,脚ロボットの単腕部を用いてコンクリート板の穿孔作業を行った.従来の脚ロボットは位置 制御をベースとしており,コンクリート板の穿孔時に発生する反力を制御できなかった.そこで,外 力検出用に手首部へ装着された6軸力覚センサのデータを基に目標位置を補正するコンプライアンス 制御を実現した(図2-4-17参照).



図 2-4-16 ハンド単体によるコンクリート板の穿孔



図 2-4-17 単腕 WAREC によるコンクリート板の穿孔

2-3) 非干渉連動機構を用いた劣駆動ロボットハンド

脚ロボットが現場に行って様々な作業を行うことを想定した時,がれきの撤去や簡単な作業を確実 に遂行する能力が必要となる.そのような作業遂行の鍵となる要素の一つがロボットハンドである. このようなロボットハンドは様々な物体を把持できる適応性と大きな把持力を発揮できる能力が必要 なる.このような能力を持たせるために,図2-4-18のようなロボットハンドを開発した.このロボ ットハンドは,様々な把持時における指の動きや力特性から,指ごとに違う特性を持たせた設計が採 用されている.特に拇指は3関節全てが独立に駆動でき,母指球には大きな把持力を出し,他の指と 対向できるような特殊な構造を持つ.人差し指は精密把持時に物体を操れる自由度を持たせてある. 他方,残りの2指は主に握力把持に用いられるため,大出力モータと特殊な弾性歯車列機構により物 体形状への適応性が高い構造を用いられている.これらの特性を利用することで,図2-4-19,図2-4-20のような,複雑な形状をした重たいブローブバルブ(2.5kg)を様々な角度で持つことができ る.また,母指球を用いてバルブハンドルを把持することで,固く締められたハンドバルブを開閉す る際に必要なトルク(平均約5Nm程度)を大きく上回る約15Nmの許容モーメントがある. このロボットハンドには安定に把持を実現するための複数の把持制御系を実装してあり,この安定 把持制御系を様々なインタフェースにより呼び出すことができる監督型制御系が実装されている.図 2-4-22 は,汎用型の手形状のインタフェースである Leap Motion により手の基本動作形状を認識し, その指令通りにハンドが動く様子を示している.

これらのロボット応答は操作者の指示により動くため,実際の把持物との相対関係を操作者が把握 するのに時間がかかり,操作が遅れることがある.そこで,図2-4-23に示すようなロボットハンド の掌に外力と重心位置を推定できるような触覚センサを搭載した.この触覚センサにより把持物との 接触などを感知し,反射的に握ることのできる把持制御系を構築した.



図 2-4-18 ロボットハンドの外観





図 2-4-20 側面からのグローブバルブの把持



図 2-4-21 バルブハンドルの把持



図 2-4-22 Leap Motion による監督型把持制御



図 2-4-23 ハンドの掌に搭載された触覚センサ