

氏名	あんどう ひさと 安藤 久人
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院情報科学研究科 (博士課程) 応用情報科学専攻
学位論文題目	水噴射により浮上移動する索状消火ロボットに関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 田所 諭      東北大学教授 山本 悟 東北大学教授 小菅 一弘      東北大学准教授 昆陽 雅司

## 論文内容要約

### 第1章 序論

災害時の被害者の探索, 救助, それらに携わるレスキュー隊員の救助・救援活動の支援やリスクの低減にロボティクス技術は実用化されている. 多くの災害の中でも, 火災は人命, 財産を奪う非常に過酷な災害の一つである. 火災統計によると住宅, 建物火災の出火件数は, 2009 年 28,372 件から 2018 年 20,703 件と減少しているものの, 犠牲者の数は 2009 年 1,023 人から 2018 年 926 人とほぼ横ばいである. 火災では一般の人々だけではなく, 消火活動に従事する消防隊員の受傷や殉職が問題となっている. 公務により負傷した消防隊員は年間 1,000 名以上に上り, その内 34%が火災出動時や救急出動時に負傷している.

このような状況の中で, 様々な消火ロボットが開発されてきた. その多くが重機型やクローラ型の陸上を走行するタイプのものである. これら消火ロボットの実用化の課題は, 火元へのアクセス性である. この課題を解決するために, 水を噴射してその反力を制御し, 消防ホース自身を浮上, 移動させることで, 瓦礫等の障害物を飛び越えて火点近くに到達する消火ロボットという全く新しいコンセプトを提案する. 本研究は, そのコンセプトの実現と社会実装を目的としたものである.

その目的の実現のために, 水の噴射反力による索状体の安定浮上技術について第2章で述べた. また, 実用化のために噴射ノズルを連結することによる索状体の浮上長の延長技術の開発について第3章で述べた. さらに, ロボットの社会実装のための消火能力の定量的な検証について第4章で述べた. そして, 第5章で提案ロボットの利点と限界および展望について述べ実用化に向けた課題や消防戦術について議論した. 最後に, 第6章に結論を記し, 本研究を総括した.

### 第2章 索状ロボットの水噴射による能動化の提案と実証

本章では, 提案した空飛ぶ索状型消火ホースロボットの実現可能性を検証するため, 長さ 2 m のミニモデルを製作しその安定浮上の実現のために取り組んだ内容について述べた. 具体的な目標として, 長さ 2 m, ホース先端にノズル 1 個を有する索状体の安定浮上を目指した.

目標実現のため、初めに索状型ロボットの数理モデルを構築した。各関節がばねとダンパー要素で連結された3次元の多関節剛体リンクモデルにより索状型ロボットを近似し、運動方程式を求めた。また、剛体リンクの重心に水噴射により作用する保存力と、剛体リンクの重心速度に応じたフィードバック制御を適応した。そして、安定浮上実現のためのパラメータの平衡点の存在をシミュレーションにより確認した。提案した制御手法を実現するための噴射方向可変ノズルモジュールを開発して、実験により噴射方向を変えることでノズルモジュールに作用する力の大きさと方向が可変であることを実証した。そして、ノズル重量が1.24 kgf、全長2 mのミニモデルを開発した。40 cm 間隔で配置した慣性（IMU）センサーにより姿勢を検出し、検出した姿勢に応じて水の噴射方向を制御することで、ミニモデルの安定浮上を実現した。更に、力の方角を変えて先端ノズルから噴射する水の方向をスイッチすることで、先端位置の左右旋回を実現し、浮上高さを変化させることに成功した。

実験結果から、“ノズルモジュール”、“制御方法”、“機体の長尺化”、“重量の低減”、“消火・冷却機能の定量的評価”、“流体力の考慮”といった6つの要素を整理し、今後の課題を提示した。

### 第3章 水噴射型索状消火ロボットの長尺化手法の提案と検証

本章では、実用化のために索状ロボットの浮上長の更なる延長手法の提案と、実現のための課題やその対策のために取り組んだ内容について述べた。機体浮上長の延長のために、 $n$  個のノズルモジュールを1本の流路（ホース）に分散配置した場合の各ノズルモジュールに作用する噴射反力を導出する流体モデルの一般化に取り組んだ。延長の第一ステップとして、先端に1個、中間位に1個、合計2個のノズルモジュールを有する長さ約4 mの水噴射型索状消火ロボット（Dragon Firefighter：以下、DFF）を開発することを目的とした。

先端ノズル、中間ノズルに作用する力が同等になる条件で浮上に十分な反力が得られる噴射孔の断面積を設計した。また、既存の消火ポンプ設備で浮上できるホースの浮上長さを見積もった。また、機体の延長に伴い問題となる軸周りの“ねじれ”を低減するため、ノズル軸周りのトルクを制御できる4自由度ノズルモジュールを開発し、ノズルに作用する力と軸周りのトルクが可変であることを実験により実証した。実際に長さ3.6 mのDFFを製作し、先端ノズルのねじれ角に対してPD制御を入れることで、高さ1.5 mの壁を乗り越え障壁の先にある2つの火点（表面積 合計 3.27  $\text{m}^2$ ）の消火を実現した。実験結果より、トルク制御を適応した先端ノズルのロール角の傾きを $20^\circ$ 以内に収めることができた。一方、トルク制御を適応しなかった中間ノズルは $10^\circ$ の振幅で振動した。今後の実用化のため“更なる長尺化”と“消火能力・耐環境性の定量的評価”の2つに課題を整理した。

### 第4章 水噴射型索状消火ロボットによる放水実験と実用化に向けた提案

本章では、社会実装のための課題である、提案ロボットの消火能力の定量的評価について取り組んだ内容について述べた。

従来の消火の主な研究は、燃焼現象の解析を基礎とした、燃焼物体（固体、液体、気体）に放水した場合に得られる現象を予測、実証する基礎的研究、例えばクリブ火災のように、火源の材料、大きさ、重量等を規定して発生した火災に対し、消防ホースからの放水方法や消防器具の違いによって、どの程度の消火効果があるかを評価した現場レベルの研究、更にウォーターミストの消火機構の検証やその消火機構を応用したスプリンクラー等の消火設備の開発や能力評価が一般的なものであった。消火を目的としたロボットの性能評価に関する研究について、放水のための第一段階として炎や煙を検出する要素技術の研究、画像データから炎までの距離を計算して放水ノズルの噴射角度を制御する研究など、既存の消火方法の高度化に主眼が置かれている。

一方、我々の開発した DFF は既存の放水方法とは異なり、窓等の狭隘部から侵入し火災領域の近傍に到達して至近距離から放水が可能な画期的な消火手法である。消火器等の性能評価試験を参考に、木材を井桁に組んだクリブを火源として、その至近距離（350 mm）からのミストスプレー放水実験、棒状放水とミストスプレーという 2 つの放水方法の違いによる至近距離からの放水実験、棒状放水とミストスプレーノズルの 2 種類の放水が可能な DFF ノズルによる至近距離からの放水実験の 3 つの実験を実施し、その消火性能を定量的に評価した。

その結果、一定の火災条件の下で、ミストスプレー放水直後、炎は瞬時に消失するがクリブ内部ではその温度が 500° 以上であり、消火までに 2 分間の放水を要すること。至近距離からの棒状放水の方が、ミストスプレー放水よりも運動量が大きく、クリブ中心まで水が到達し消火に要する時間が短いこと。DFF ノズルにより総発熱量 52 MJ の火災を 2 分 16 秒で消火し、ノズル自身の温度は 25°C 以下であることが確認できた。

## 第 5 章 提案ロボットの利点と限界および展望

本章では、先の 2, 3, 4 章で実現した提案ロボットの利点と実用化のための課題を整理し、消防戦術について議論した。

実用化の課題として、“長尺化”、“消火能力”、“オペレーション”の 3 つに分類し整理した。“長尺化”について、その課題を克服するため、ねじれ対策、制御、制振、流体力、軽量化の 5 つの項目を挙げた。各々の対応策について“多自由度ノズル・360° 回転ジョイント”、“モデル予測制御”、“受動ダンピング要素の適応”、“流体力を考慮した 3D モデル構築とシミュレーション”、“チタン合金、ノズルのコンパクト化”の必要性について述べた。

“消火能力”について、“棒状放水とミストスプレーの放水バランスの最適化”と“水損の高精度な評価”の必要性について述べた。

“オペレーション”について、“熱画像カメラ等による火点検出”、“消防士の操縦・操作を支援する GUI の開発”、“既存ハードを組み合わせた巻き取り・展開機構”、“DFF を用いた消防戦術の策定”の必要性、および全長 8 m（浮上長 5 m、剛体部 3 m）の実用モデルについて述べた。

2016 年 12 月に発生した新潟県糸魚川市の糸魚川大規模火災を参考に、DFF 実用モデルの消防戦術について提案

した．糸魚川大規模火災は強風にあおられ火源の火が木造密集地域である商店街に延焼し，被害が拡大したと報告されている．

火勢が弱い場合には，DFF を迅速に展開し，窓から火元に突入して先端に取り付けたカメラで遠隔操縦を行い，内部の状況を確認し，高熱源に対してピンポイントに放水を行う．火勢が強い場合，複数の DFF を展開し，火災現場の上空，および隣接した家屋の境界付近に DFF を展開し放水する．風向きと火災現場の位置関係から DFF を風上側に展開して，人工降雨により延焼を阻止する．飛び火等を抑制し，広域火災予防のための延焼防止措置としての DFF 実用機での消防戦術の一例について述べた．

## 第6章 結論

本研究は，消防ホースからジェット噴射する水の噴射方向を制御して，ホースを安定浮上させ，火源に近づき至近距離からの放水を実現するという，これまでになかった全く新しいコンセプトの水噴射型索状消火ロボットの検証と実用化の具体的な手法の提案とその検証について取り組んだものである．

本論文の学術的なコントリビューションは，1) 空飛ぶ消火ホースロボットの力学モデルの構築と制御手法の妥当性の検証，2) 流路モデルの一般化と自重補償に十分な噴射反力を得るための設計指針と浮上長の見積もり，3) 噴射方向可変および長軸周りの“ねじれ”を考慮した4自由度ノズルモジュールの設計と評価，4) 空飛ぶ消火ホースロボットのミニモデルおよびDFFの試作と安定浮上の実現，障壁乗り越えと消火実験，5) 至近距離からの放水による火災抑制効果の定量的評価である．

また，社会的なコントリビューションは，1) 新しい空飛ぶ消火ロボットのコンセプトの提案，2) 提案コンセプトの実験による検証，3) 既存システムおよび消火ロボットの消火能力の議論，4) 実用化に向けた提案コンセプトの実用化に向けた展望と課題の議論，5) 実用モデルと広域火災の延焼防止を考慮した消防戦術の提案である．

つまり，本論文は学術的にも社会的にも新しい価値を提示し，その提案コンセプトの実用化に向けて，理論および実験の両面から検証を行い，得られた結果からその展望と課題を整理した内容である．