

消防ホースの能動化に向けた複数水噴射による索状体の安定浮上 —2連噴射ノズルによる安定浮上動作の実現—

Activation of Hose by Multiple Water-Jet Injection Nozzles for Fire Fighting
-Evaluation of Stable Floating by Two Injection Nozzle Modules-

○正 安藤久人 (東北大) 正 安部祐一 (東北大)
学 山口智香 (東北大) 正 昆陽雅司 (東北大)
正 多田隈建二郎 (東北大) 正 円山重直 (八戸高専)
正 田所諭 (東北大)

Hisato ANDO, Tohoku University, ando.hisato@rm.is.tohoku.ac.jp

Yuichi AMBE, Tohoku University

Tomoka YAMAGUCHI, Tohoku University

Masashi KONYO, Tohoku University

Kenjiro TADAKUMA, Tohoku University

Shigenao MARUYAMA, National Institute of Technology, Hachinohe College

Satoshi TADOKORO, Tohoku University

Disaster response, especially fire-fighting and rescue, is highly risky for firefighters engaged in action. As a result, many robots intended for fire-fighting have been proposed. However, it is difficult for them to directly access fire sources because their mobility is limited. Specifically, existing robots are large and heavy. Therefore, we proposed a novel hose type robot, which can fly directly into the fire source via a water-jet. In this study, we report that 3 m length body can fly stably in the air and its head direction also be controlled.

Key Words: Field Robot, Water-jet, Fire-Fighting, Soft Robotics

1 緒言

災害対応の中でも、火災現場での消火や人命救助は苛酷な環境だけでなく、作業に従事する消防士にとってもリスクが大きい現場である。消火活動においては、放水などにより遠隔から火元を直接消火することが望ましいが、火元にアクセスすることは困難である。特に、大規模火災においては、消防士が延焼した建物で消火活動を行うことは困難であり、このような場合には建物の外から放水して延焼を防ぐ他ない。本研究では、消防ホースが自ら建物内へ進入し、火元を直接消火することができる新しいロボットシステムの実現を目指す。消火を目的とした様々なロボットシステムが提案されている [1][2]。その多くが、消火用のホースを搭載した地上移動型のロボットや捜索用のロボットであり、平地での移動を前提としているため延焼した建物内に直接アクセスすることは困難である。森林火災など、複数の飛行ロボットが編隊飛行により火元を特定して、消火を行うという構想等がいくつか提案されている。K. A. Ghamry らは UAV の最適な飛行編隊のアルゴリズムについて研究した [3]。Y. Yamada らはドローンを消防ホースの先端にとりつけ、遠隔で消火を行う構想を提示している [4]。しかし、これらの研究は消火タスクの実現など実用化にはいたっていない。水噴射を応用したロボット研究として、P. Liljebäck らはトンネル火災等での無人消火を想定した SnakeFighter という消火ホースをロボット胴体の基本構造としたヘビ型ロボットを開発した [5]。さらに、空中に浮上する技術として、J. A. Silva Rico らは、複数の高圧洗浄ポンプを組み合わせて、根元で流路の開閉を PWM 制御することで、供給する水の流量を調整、かつ噴射を行う先端ノズルを選択し、方向切り替えを行うアクチュエータを開発した [6]。用途は、福島第一原子力発電所廃炉のため、原子炉内部調査用のアクセスポイントである細管を通過し、炉心に達するため、できる限り長く細いアーム状のロボットへの応用である。

我々はあくまで、長細い消防ホースから水を噴射することで動

力と消火という 2 つの機能を有効に活用しようと考えた。水の噴射反力により浮上するため、地面上の障害物の影響なども少ない。索状体を浮かせるためには、長細いホースの反り返りやねじれ等を防ぐように姿勢制御し、安定に浮上させる技術が必要となり、その実現に取り組んでいる [7]-[13]。我々は、ノズル先端で水の噴射する流路の方向を変えることで、噴射反力の向きを制御する手法を提案した。この新しいコンセプトの可能性を検証するため、索状体の長さ 1.6 m、ノズルを含む全長 2 m の機体先端から水を噴射し、その安定浮上と索状体先端部の旋回動作を実現した [14]。実用化の課題として、更にホースの浮上長を伸ばす必要があった。そこで、ホースの中間位にノズルを適応し、ノズル数を 2 つにすることで、従来の約 2 倍となる 3 m の機体の安定浮上動作、及び先端部の旋回動作を実現したので報告する。

2 流路設計

2.1 課題と取り組み

我々は、ホースの先端部に 2 方向に回転可能な 2 軸能動ノズル [8] を実装して全長約 2 m の索状体の安定浮上と先端の旋回動作を実現した [13]。そして、高層ビル等の、現状、消火が困難な環境下において、消防士が遠隔操作によりホースを能動化させて火元に直接突入して消火作業を行うコンセプトを提示するとともに、その実現可能性を示した [14]。しかし、この火元の直接消火を実現するためには、ホースの浮上長を伸ばし、かつ浮上長が伸びた状況下でのシステムの更なる安定化が必須である。

本稿では、ホース先端部だけでなく索状体の本体であるホースの中間位にノズルを取り付けることで、ホースの浮上長を伸ばし実際に浮上するかどうかを検証した。この時の、システムの概要を図 1 に示す。ポンプにホースを繋ぎ、その先端に先端ノズル、ホース間に中間ノズルを配置する。ポンプは、貯水タンクに繋がれている。ポンプを起動し、バルブを手動で開くことで水が流れ、ノズルから水が噴出する。ノズルの出口は大気解放である。上流

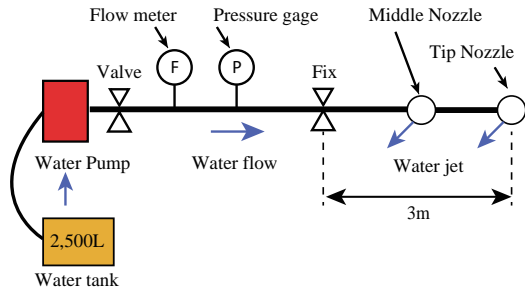


Fig.1 Overview of The System

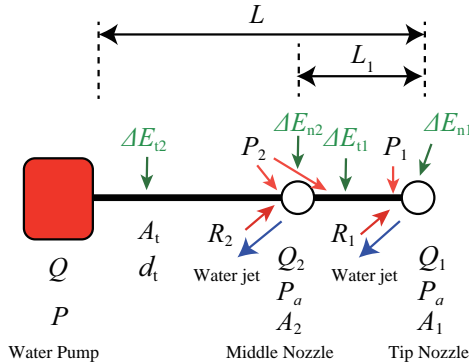


Fig.2 Flow Model (n=2)

の運動量とノズル出口の運動量の差により、先端、及び中間ノズルの噴射孔に反力が作用する。

2.2 流路設計

2つのノズルモジュールをホースに実装するにあたり、ホースが浮上するために十分な噴射反力を見積もる必要がある。そこで、ノズル数が2個 (n=2) の場合でのシステムをモデル化し、最適な噴射孔の断面積を評価した。このときに構築した流路モデルを図2に示す。ここで、ポンプの元圧を P 、流量を Q とした。先端ノズルの断面積を A_1 、流出する流量を Q_1 、中間ノズルのそれを A_2 、 Q_2 とし、いずれも大気解放 (大気圧 = P_a) とした。また、先端ノズル入口の圧力を P_1 、中間ノズルの入り口と出口の圧力を P_2 とした。また、ノズルの圧力損失をそれぞれ ΔE_{n1} 、 ΔE_{n2} とし、先端ノズルから中間ノズルまでのホースの長さおよび圧力損失をそれぞれ L_1 、 ΔE_{t1} 、中間ノズルからポンプまでの圧力損失を ΔE_{t2} とした。また、ホースの全長を L 、断面積を A_t 、内径を d_t とした。そして、水噴射により得られる反力を先端ノズル、中間ノズルそれぞれ R_1 、 R_2 とした。

2.3 噴射孔断面積と噴射反力との関係

ホースを浮上させるために十分な噴射反力を得るには、ノズル出口の流速が最大になるように噴射孔の断面積を設計する必要がある。そこで、図2に示す理論モデルを元に、圧力が一定の場合での各ノズルモジュールにおける噴射孔断面積と噴射反力の理論値を求めた。

この時、水の密度を ρ とすると、ベルヌーイの定理より、

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_1}{A_t} \right)^2 - \frac{P_a}{\rho} - \frac{1}{2} \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 = \Delta E_{n1} \quad (1)$$

$$\frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} = \Delta E_{t1} \quad (2)$$

$$\frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} \left(\frac{Q_2}{A_t} \right)^2 - \frac{P_a}{\rho} - \frac{1}{2} \left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 = \Delta E_{n2} \quad (3)$$

$$\frac{P}{\rho} - \frac{P_2}{\rho} = \Delta E_{t2} \quad (4)$$

ホース、及びノズルでのエネルギー損失の関係から、

$$\Delta E_{n1} = \lambda_{n1} \frac{1}{2} \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2, \quad \Delta E_{n2} = \lambda_{n2} \frac{1}{2} \left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 \quad (5)$$

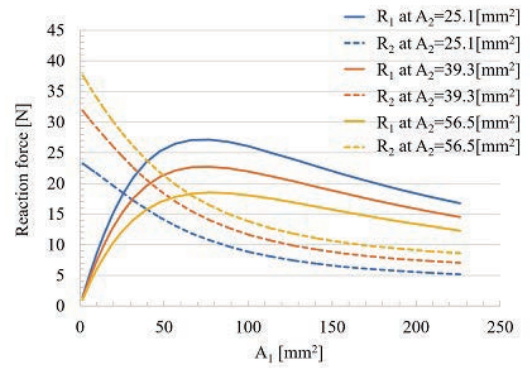


Fig.3 Relation of The Nozzle Outlet Cross-sectional Area to Reaction Force

$$\Delta E_{t1} = \lambda_t \frac{1}{2} \frac{L_1}{d_t} \left(\frac{Q_1}{A_t} \right)^2, \quad \Delta E_{t2} = \lambda_t \frac{1}{2} \left(\frac{L - L_1}{d_t} \right) \left(\frac{Q}{A_t} \right)^2 \quad (6)$$

となる。

ここで、 λ_t は、ホースの管摩擦係数とし、ノズルの圧力損失係数 λ_{n1} 、 λ_{n2} は、各々のノズルから噴出する水の流速に係る係数と仮定した。

連続の式から、

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (7)$$

運動量保存の法則から、噴射反力 R_1 、 R_2 は、

$$R_1 = \rho \frac{Q_1^2}{A_1}, \quad R_2 = \rho \frac{Q_2^2}{A_2} \quad (8)$$

となる。

ポンプの元圧 $P = 0.7$ MPa、ホース長 $L = 9$ m、ノズル間の長さ $L_1 = 1.6$ m、ホース内径 $d_t = 19$ mm の場合の先端ノズルの噴射孔断面積 A_1 と先端ノズルに作用する噴射反力 R_1 、と中間ノズルに作用する噴射反力 R_2 の関係を図3に示す。この時、 λ_t 、 λ_{n1} 、 λ_{n2} は、それぞれ実験で求めた定数 0.039、0.1663、0.1638 とした。図3の実線が先端ノズルに作用する力 R_1 、破線が中間ノズルに作用する力 R_2 である。中間ノズルの断面積 A_2 は、条件として 25.1 mm²、39.3 mm²、56.5 mm² の場合の3通りとし、一定とした。この時、 A_1 がゼロ近傍の場合には、中間ノズルから多くの水が流出し、先端ノズルに作用する力 R_1 はほぼゼロ、中間ノズルの噴射反力 R_2 は最大の値を取る。 A_1 を徐々に大きくしていくと、先端ノズルから流出する水の流量 Q_1 が増え、それに伴い中間ノズルから流出する水の流量 Q_2 が減少し、実線と破線が交差する。この時、先端ノズル、及び中間ノズルに作用する反力は理論上等しくなる。更に A_1 を大きくしていくと、ノズルから噴出する水の流速が小さくなり、先端及び中間ノズルそれぞれに作用する噴射反力は小さくなる。以上から、噴射ノズルの断面積を 39.3 mm² とすることとした。

3 ノズルモジュール

3.1 設計

以上から、噴射孔の最適な断面積を求めた。目的とする、索状体の安定浮上のために、我々はノズル出口にチューブを装着し、そのチューブをモーターにより曲げることで水の噴射方向を切り替え、発生する噴射反力の方向を変えている。ここで、チューブの内径を選定するにあたり、39.3 mm² という断面積の値は、2又の噴射孔の場合、噴射孔1つあたりの内径が5 mmに相当する。入手可能な内径5 mmチューブは外径が8 mmであり、このチューブを座屈させずに揺動させるためには、チューブの長さを長くし座屈しにくくするとともに高トルクのモーターを採用する必要がある。しかし、これらは結果としてノズルの大型化につながりノズル重量が増加してしまう。これにより、ホースを浮上させるために必要な噴射反力が不足してしまうという課題があった。そこで、ロール方向に揺動させる噴射孔を2つ、ピッチ方向

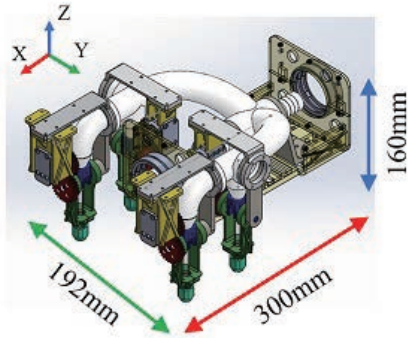


Fig.4 Designed a Nozzle Module

に揺動させる噴射孔を2つ、合計4つの噴射孔を設けることとした。これにより、1噴射孔あたりの最適な内径は、3.54 mmとなる。そこで、チューブは内径4 mm、外径6 mmのものを採用することとし、噴射孔出口の内径は滑らかに3.54 mmとなるように設計した。設計したノズルモジュールを図4に示す。

3.2 噴射反力と噴射角度との関係

この時、得たい噴射反力と噴射角度との関係を求めた。パラメータ設定を、図5に示す。先端ノズル、中間ノズルに作用する噴射反力 R_1, R_2 を R_i 、X軸周りの回転をロール、Y軸周りの回転をピッチ、Z軸周りの回転をヨーとし、各ノズルのピッチ角を θ_i (左右で同じ角度とした)、進行方向右側のロール角を ϕ_{Ri} 、左側のロール角を ϕ_{Li} 、($i=1,2$) とし、鉛直下向きを0度、時計周りを正とした。

これより、

$$R_{xi} = \frac{1}{2} R_i \sin \theta_i \quad (9)$$

$$R_{yi} = -\frac{1}{4} R_i (\sin \phi_{Ri} + \sin \phi_{Li}) \quad (10)$$

$$R_{zi} = \frac{1}{2} R_i \cos \theta_i + \frac{1}{4} R_i (\cos \phi_{Ri} + \cos \phi_{Li}) \quad (11)$$

となる。

よって、ピッチ角 θ_i 、ロール角 ϕ_{Ri}, ϕ_{Li} を求めると、

$$\theta_i = \arcsin \frac{2R_{xi}}{R_i} \quad (12)$$

$$\phi_{Ri} = \arccos \frac{2\sqrt{R_{yi}^2 + (R_{zi} - \frac{R_i}{2} \cos \theta_i)^2}}{R_i} - \arctan \frac{2R_{yi}}{2R_{zi} - R_i \cos \theta_i} \quad (13)$$

$$\phi_{Li} = -\arccos \frac{2\sqrt{R_{yi}^2 + (R_{zi} - \frac{R_i}{2} \cos \theta_i)^2}}{R_i} - \arctan \frac{2R_{yi}}{2R_{zi} - R_i \cos \theta_i} \quad (14)$$

以上により、発揮したい力 R_i により各ノズルのピッチ角 θ_i 、ロール角 ϕ_{Ri}, ϕ_{Li} を求めた。

3.3 製作

実際に製作した先端ノズルを図6(a)に、中間ノズルを図6(b)に示す。また、これらのノズルをホースに連結して製作した機体全体を図7に示す。ホース先端から中間ノズルまでの距離は1.6 m、ホースの先端から3 mの位置を3脚により固定した。また、ノズル先端から約3 mには、制振及び機体に硬さを付与するために2対の外径1 mm ステンレスワイヤを通して剛性を上げた。

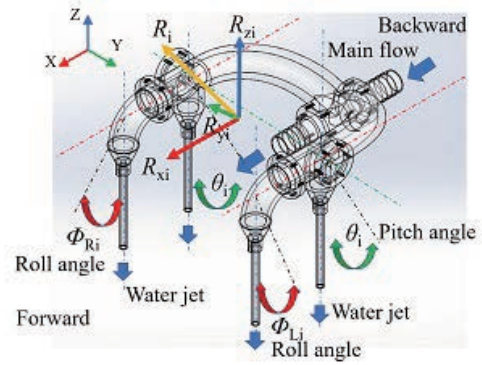


Fig.5 Definition of Pitch and Roll Angle



(a) Tip Nozzle



(b) Middle Nozzle

Fig.6 Developed Nozzles

4 実験

4.1 方法

実験は、屋外で実施した。可搬式消防ポンプ (VC72 PRO 3 Limited, トーハツ (株) 製) に内径19 mmのホースを連結し、先端、及び先端から約1.6 mの位置に水噴射ノズルを取り付け、先端から約3 mの位置を3脚で固定した。ポンプの圧力を $P = 0.7$ MPaとした。ホースを真っすぐに配置し、噴射孔のピッチ角 θ_i 、ロール角 ϕ_{Ri}, ϕ_{Li} が鉛直下向きの状態を0度とした。手動でバルブを開閉して水を流した。ポンプは、最大容量2,500 mm³の水槽から水を吸引する。また、噴射方向の制御は、40 cm間隔で数珠つなぎに取り付けた慣性センサ (MPU-9250, InvenSense製) からピッチ角 θ_i 、ロール角 ϕ_{Ri}, ϕ_{Li} を検出し、噴射方向を切り替えることで、先端ノズル、及び中間ノズルに作用する各々の噴射反力 R_1, R_2 の x, y, z成分、 $R_{x1}, R_{y1}, R_{z1}, R_{x2}, R_{y2}, R_{z2}$ を制御した。慣性センサのサンプリング周波数は2 kHzとした。コ



Fig.7 Developed Robot



Fig.8 Result of Stable Float of Long Body by Water jet injection

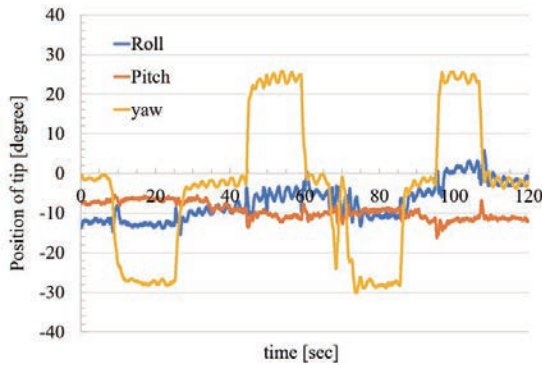


Fig.9 Time Change of Tip Position

ントローラで先端ノズルのロール角 ϕ_{Ri} , ϕ_{Li} を左右に動かすことで、索状体先端部の方向切り替えを行うシステムとした。索状体が、x軸に平行な姿勢を中立姿勢とした。実施した動作を以下に示す。

【安定浮上】 → 【進行方向に対して右側「ヨー（マイナス）方向」に先端を動かし 10 秒間静止】 → 【中立姿勢で 10 秒静止】 → 【進行方向に対して左側「ヨー（プラス）方向」に先端を動かし 10 秒静止】 → 【中立姿勢で 10 秒静止】

以上の動作を 2 回繰り返した。

その後、ステンレスワイヤを外し、同様に水を噴射して浮上できるか確認した。この時、機体先端を紐で釣り支持しながら動作を確認した。

4.2 結果

索状体にワイヤを取り付けた状態と外した状態で水を噴射させ動作確認を行った。ワイヤを取り付けた状態での噴射実験の状況を図 8 に示す。また、この時に先端ノズルを進行方向に対して左右（ヨー方向プラス、マイナス）に旋回させたときの角度変化を図 9 に示す。コントローラでロール角 ϕ_{Ri} , ϕ_{Li} の方向を切り替えることで、先端の方向切り替えを実現することができた。角度にして、+ 25.6 度 ~ - 30.1 度、ヨー軸周りに索状体先端部を旋回させることが出来た。静止時に若干の振動が見られた。

ワイヤを外した状態では、先端ノズルと中間ノズルの間でホースが撓んで先端が反り返る動きが確認され、支持している紐を離すことができず、安定浮上できなかった。これは、ホースの剛性が低下し、ホースが撓んだことが原因であると推察する。ホースの安定浮上のためには、ホースの剛性が大きく影響していると考えられる。今後の課題として、ステンレスワイヤ等でホースの剛性を調整したり、配置するノズル間の距離を短くする等の対策を施すことで改善できると考える。

5 結言

噴射ノズルが 2 つの場合での流路モデルを構築し、最適な噴射孔断面積の理論値を求め、実際にノズルモジュールを設計・製作した。これにより、索状体の先端、及び中間位にノズルモジュールを実装することで、ホース長にして 3 m の索状体を浮上させることができた。また、噴射方向をコントローラで切り替えることで、索状体先端部を約 ±30 度、ヨー軸周りに旋回させた。し

かし、ステンレスワイヤを外し、ホースの剛性が低下することで、ノズル間距離 $L_1 = 1.6$ m では浮上できなかった。

今後の課題として、浮上するホース長をさらに伸ばすため、ホースへの剛性の付与やノズル間距離の最適化が必要である。また、風の影響等の外乱に対するロバスト性の付与のため、ホースへの制振機構の付与や索状体の姿勢を推定して、姿勢制御などを行う予定である。更に、実際の消火能力を定量的に評価するとともに、耐熱性の付与等に取り組み、実用化に向けた開発を進めていきたい。

6 謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発プログラム (ImPACT) タフ・ロボティクス・チャレンジにより、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参考文献

- [1] W. Zhang, C. Dai, "Development of A New Remote Controlled Emergency-handling and Fire-fighting Robot," *World Congress on Computer Science and Information Engineering*, 2009, pp. 239-243.
- [2] Q. Zhang, G. Ke, "Kinematic Analysis of Fire-fighting Robot Under the Impact of Waterflow Recoil force," *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2015, pp. 264-268.
- [3] K. A. Ghamry et al., "Multiple UAVs in Forest Fire fighting Mission Using Particle Swarm Optimization," *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 2017, pp. 1404-1409.
- [4] Y. Yamada, T. Nakamura, "Unmanned Fire-fighting Aerial Vehicle to Enable Continuous Water Discharge," *No. 16-2 Proceedings of the 2016 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 2016, 2A2-07b3
- [5] P. Liljeback, O. Stavdahl, A. Beitnes, "SnakeFighter - Development of a Water Hydraulic Fire Fighting Snake Robot," *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2006, pp. 1-6.
- [6] J. A. Silva Rico, G. Endo, Shigeo Hirose, Hiroya Yamada, "Development of An Actuation System Based on Water Jet Propulsion for A Slim Long-reach Robot," *Robomech Journal*, 2017, 4:8.
- [7] 安部祐一, 安藤久人, 昆陽雅司, 田所 諭, "索状体の噴射を用いた浮上制御方法に関する考察", No. 17-2 Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 1P1-P02, 2017.
- [8] 石井昭裕, 神尾柊太, 安部祐一, 安藤久人, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, "空気浮上型索状ロボットの噴射方向の二軸能動化手法の提案", No. 17-2 Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2P1-E06, 2017.
- [9] 安藤久人, 神尾柊太, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所 諭, 円山重直, "水噴射による索状体の能動化装置及び手法の開発", No. 16-2 Proceedings of the 2016 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 1A2-08b2, 2016.
- [10] 安部祐一, 安藤久人, 神尾柊太, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所 諭, "柔軟索状体の胴体浮上安定化手法の提案—二次元多体モデルによる分析—", 第 17 回システムインテグレーション部門講演会, 1E4-7, 2016.
- [11] 安藤久人, 神尾柊太, 安部祐一, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所 諭, 円山重直, "水噴射による索状体の能動化システムの開発, 第 17 回システムインテグレーション部門講演会", 2M3-4, 2016.
- [12] 安藤久人, 安部祐一, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 円山重直, 田所 諭, "水噴射による索状体の能動化システムの開発—単ノズルの場合での流路設計及び複数ノズルモデルの構築—", No. 17-2 Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 1P2-P02, 2017.
- [13] 安藤久人, 安部祐一, 石井昭裕, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, "消防ホースの能動化に向けた水噴射を用いた索状体の安定浮上", 第 35 回日本ロボット学会学術講演会, 1K2-05, 2017.
- [14] H. Ando, Y. Ambe, A. Ishii, M. Konyo, K. Tadakuma, S. Maruyama, and S. Tadokoro, "Aerial Hose Type Robot by Water-Jet for Fire Fighting", *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.3. No. 2, pp.1128-1135, 2018.