

報告日 2020年 12月 30日  
報告者 東北大学 工学研究科 助教  
安部 祐一

## 1 研究概要

(和文)

### (1) 課題名 (日本語)

管内流れの流体特性を利用した空飛ぶ消火ホースの浮上安定化に関する研究

### (2) 研究者氏名

安部祐一, 東北大学, 工学研究科, 助教

### (3) 研究概要 (日本語)

柔軟な索状ロボットの駆動方法の一つとして, 流体噴射が着目されている. 胴体内部に管路を配置し, 根本の駆動源を使って大きな推力を得られるため, 空飛ぶ消火ホースなどへの応用が期待されている. この応用を考えるうえで, 柔軟管内の流れの流体効果で振動現象が起きないかを分析することが必要であるが, これらの効果は非線形で複雑であり, これまで分析されてこなかった. 本研究では, この課題にチャレンジする. 具体的には, 先端に噴射ノズルを搭載したオイラー梁管路を対象に, 流体効果を考慮した先端の安定浮上方法 (位置制御方法) を提案し, 実機検証を行う.

### (4) キーワード

流体噴射, 流体構造相互作用, 片持ち送水管, リアプノフ安定性

(英文)

### (1) Research title

Stabilization of flying fire hose under the fluid structure interactions

### (2) Name of researcher with title of position

Yuichi Ambe, Assistant professor, Tohoku University

### (3) Summary

Actuation with fluid jets is suitable for continuum robots because it can generate relatively large force delivered through the flexible pipe inside the body from the root. For example, we have proposed an idea of flying firefighting hose actuated by water jets to access the fire source directly. The challenging point is how to avoid undesired oscillations, such as flutter, caused by the fluid-structure interaction with the flexible body. However, previous studies have not tackled on these interactions due to its nonlinearity and complexity. This study proposes a stabilized control method of a jet actuated continuum robot by considering the fluid-structure interactions. Concretely, we focus on the cantilevered Euler pipe whose head is actuated by water jets.

We derive the model and propose the controller to stabilize the head floating. The simulation and experiment with the prototype robot validate the controller.

#### (4) Key Words

Fluid jet actuation, Fluid structure interaction, cantilevered pipe conveying fluid, Lyapunov stability

## 2 本研究の意義・特色

本研究では、流体噴射によって先端が駆動される片持ち送水管の、流体相互作用を考慮した安定浮上方法を初めて提案し、実験検証した。本成果は流体噴射駆動される柔軟索状ロボットの制御方法を提案するうえでの重要な知見となる。

本研究では、流体の特性を巧みに利用して、流速によらずロボットの浮上を安定化させる点が特色である。内部流がホースに及ぼす力学的作用は、エネルギーを注入してフラッタ現象を引き起こす作用だけでなく、エネルギーを散逸させる作用も持っている。先端で水噴射方向を適切に制御することで、エネルギー散逸作用だけを取り出し、流速にかかわらず安定な先端浮上制御を実現した。

## 3 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

### 3.1 分析対象とモデル

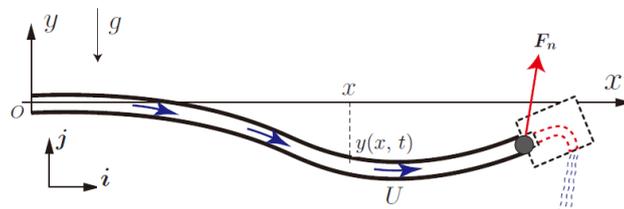


図 1 先端にノズルのついた片持ち送水管

本研究で対象とする片持ち送水管は、図 1 に示されるような端部が固定支持され、先端からノズルを通して水を噴射するものである。先端に搭載されたノズルには複数の噴射孔が設けられ、それぞれの噴射方向を制御することで合力を制御できるものとする。論文<sup>(1)</sup>に基づき、以下の仮定のもとに片持ち送水管のモデル(図 1)を構築した。モデルの詳細は文献<sup>(2)</sup>を参考ください。

(A1) 矢状平面 ( $O - xy$ ) に運動を限定する。鉛直方向の変位  $y(x, t)$  は微小とし、送水管を長さ  $L$  のオイラー梁を用いてモデル化する。梁の根本は原点  $O$  で固定される。

(A2) 送水管先端には能動ノズルが搭載されており、先端で任意の並進力を発生できる。ノズルは胴体の長さに比べて十分小さいとして、重さ  $m_n$  の質点とした。

(A3) 流体は非圧縮ニュートン流体であり、梁内部の一様な管を流れる。流れは plug flow (流速  $U$  が一定で管路沿ったベクトルを持つ) であると仮定する。つまり、流体の速度分布は一定 (Fully developed flow) であり、管摩擦係数が十分小さいことを仮定。

(A4) ノズルは十分小さく流路のエネルギー損失を無視する．また，ノズルが生成する力はノズルが運動していない仮定のもとで導出する．  
重力加速度  $g$  は鉛直下向きにかかっているとし，弾性管の単位長さあたりの重さ  $m$ ，流体の重さ  $M$  とする． $\mathbf{i}, \mathbf{j}$  はそれぞれ  $x, y$  軸方向の単位ベクトルである．

モデルをもとに運動方程式を導出すると以下の式が得られる（詳細は文献<sup>(2)</sup>に記載）

$$EIy'''' + E^*I\dot{y}'''' + \hat{M}\ddot{y} + \hat{M}g + 2MU\dot{y}' - \frac{\partial}{\partial x}(R_i y') - R_s \delta(x - L) = 0 \quad (1)$$

$$y(0) = 0, y'(0) = 0, (E^* \frac{\partial}{\partial t} + E)Iy''(L) = 0, (E^* \frac{\partial}{\partial t} + E)Iy'''(L) = 0 \quad (2)$$

なお， $[\ ]'$  は  $x$  による偏微分を表し， $E$  はヤング率， $I$  は断面二次モーメント， $E^*$  は Kelvin-Voigt 減衰定数， $\hat{M} = M + m + m_n \delta(L - x)$  であり， $R_i, R_s$  は先端ノズルがそれぞれ軸方向と軸に垂直な方向に実現する噴射反力の合力である．本モデルにおいて流体圧力は運動に影響を及ぼさない．送水管の運動に影響を及ぼす流体に関わる項は，送水管の時間変形に関わる項  $2MU\dot{y}'$  と，送水管出口で軸方向にかかる力に関わる項  $R_i$ ，送水管出口のせん断方向にかかる力  $R_s$  である．

### 3.2 制御手法

本稿では，ダイナミクスベース制御の考え方にに基づき，エネルギーの時間変化の式をもとに制御手法について考察する．なお，本稿では簡単のために  $R_i, R_s$  は  $x$  に依存しないとして議論を進める．

#### A) エネルギーの時間発展

送水管の流体の運動を考慮しない ( $U = 0$  の場合) エネルギー  $E_p$  は以下のように定義することができる．

$$E_p = \int_0^L \left( \frac{1}{2} \hat{M} \dot{y}^2 + \frac{1}{2} EI y''^2 + \hat{M} g y \right) dx$$

このとき，エネルギーの解軌道に沿った時間微分は，運動方程式(1) と境界条件(2) を用いて少々面倒な計算を繰り返すことで，以下のように書くことができる．

$$\dot{E}_p = - E^* I \int_0^L \dot{y}''^2 dx - MU \dot{y}_L^2 + R_s \dot{y}_L + R_i y'_L \dot{y}_L - R_i \int_0^L y' \dot{y}' dx$$

なお， $y_L = y(L)$  と表記した．右辺第1項は，Kelvin-Voigt 減衰によるエネルギー損失項であり，第2項は運動方程式の流体項  $2MU\dot{y}'$  によって失うエネルギーである（先端の速度の二乗に比例したエネルギーを損失する）．第3項は噴射反力のせん断方向成分によって送水管先端が変位してされた仕事である．第4項と5項は噴射反力の軸方向成分によって，送水管先端が軸方向に変位してされた仕事を表している．ノズルを持たない送水管であれば， $R_i = -MU^2, R_s = 0$  であり，第4,5項の効果によって

エネルギーが増大し、フラッタ現象が流速に応じて起きるようになると解釈できる。一方で、 $R_s$ ,  $R_i$ をうまく設定することで、望ましくない影響を削除できる。

## B) 制御方法

本研究で提案する制御手法は以下である。

$$\begin{aligned} R_i &= 0 \\ R_s &= K(y_d - y_L) - D\dot{y}'_L \end{aligned}$$

$K, D$  は負でない定数であり、 $y_d$ は目標とする浮上高さである。このとき、エネルギー関数  $V$  を以下で定義すれば、

$$V = E_p + \frac{1}{2}c \int_0^L y'^2 dx + \frac{1}{2}K(y_d - y_L)^2$$

エネルギー関数  $V$  の解軌道に沿った時間微分は以下で書ける。

$$\dot{V} = -E^*I \int_0^L \dot{y}''^2 dx - MU\dot{y}'_L^2 - D\dot{y}'_L^2 \leq 0$$

ノズルの噴射反力を、先端の姿勢と位置に依存した単純なフィードバック制御則で決定することによって、系のエネルギー関数を常に減少させることができる。面白いことに、流体の効果をエネルギーの散逸速度を向上させるために使うことができる。特に、重力項がない場合 ( $g = 0$ )、エネルギー関数  $V$  は正定関数となり、系はリアプノフ安定となる。

## 3.3 シミュレーション及び実機実験結果

本提案手法の妥当性を検証するためにシミュレーション、および実機実験を行った。紙面の都合上実機実験の結果を中心に説明する。シミュレーション結果は文献<sup>(3)</sup>を参照ください。

### A) 開発した実験機

開発した実験機を図 2 に示す。実験機は先端のノズルモジュールと 2.4m の胴体部分から構成される。胴体部分は塩ビパイプ(VU40)より構成され、内部に送水ホース(内径 25mm)を固定した構造である。胴体外部には複数の IMU (TDK, ICM-20948) が搭載される。胴体部分の根本側は固定台に固定され、流量計(Keyence, FD-R50)と圧力計(長野計器, GC31)が接続される。実験機の詳細な物理パラメータは表 1 に示す。

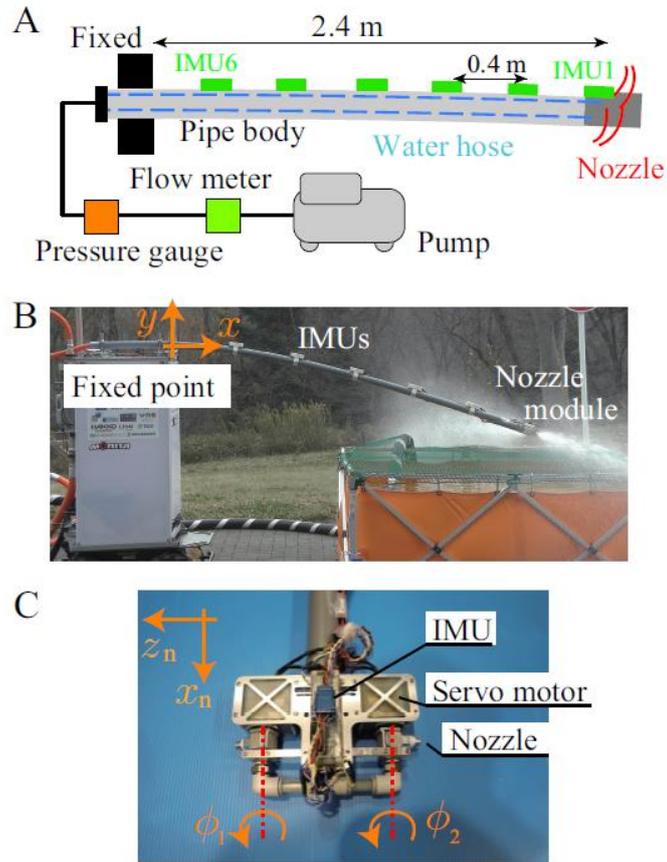


図 2 開発した実験機

表 1 実験機の物理パラメータ

Parameters	Variables	Values	Parameters	Variables	Values
Unit mass of pipe [kg/m]	$m$	1.11	Second moment of area [m <sup>4</sup> ]	$I$	$7.66 \times 10^{-8}$
Unit mass of water [kg/m]	$M$	0.491	Young's modulus [Pa]	$E$	$2.93 \times 10^9$
Mass of nozzle [kg]	$m_n$	1.23	Kelvin-Voigt coefficient [sPa]	$E^*$	$3.56 \times 10^7$
Length of pipe [m]	$L$	2.40	Gravity acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	$g$	9.80

本実験機で提案制御を行うために、IMUをもとにノズルモジュールの位置と速度を推定し、提案制御で実現すべき合力はノズルモジュールの2つノズルの噴射方向を制御して実現している。

### B) 流体効果の検証

流体効果により振動が抑制されることを示すために、制御ゲインを $K = D = 0$ としたうえで外乱応答を確かめる。先端に棒を使って初期外乱を与え、その際の先端位置の時間応答を確認した。各流速で外乱は6回与え、流速は7種類変更した。一例を図3に示す。流速が早くなるに応じて外乱の収束時間が短くなる傾向がある。

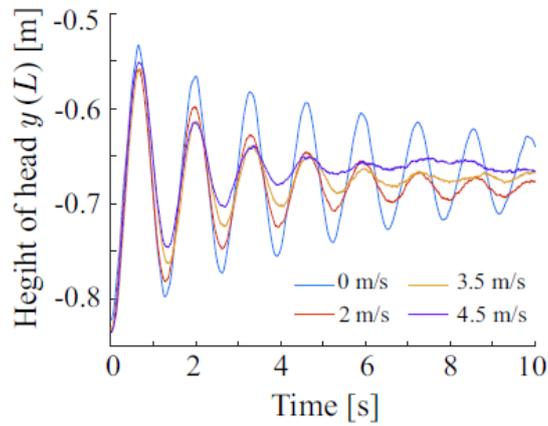


図 3 流速に対する外乱応答の変化

より詳細に傾向を分析するために、得られた先端位置の時間応答を 1 次モードの振動と仮定して以下の関数でフィッティングを行い、固有値や周波数、平衡点の流速に対する傾向を調べた。

$$y = ae^{\lambda t} \sin(\omega t) + b$$

この時、固有値 $\lambda$ 、角振動数 $\omega$ 、平衡点 $b$ の、流速 $U$ に対する変化を図 4A に示す。

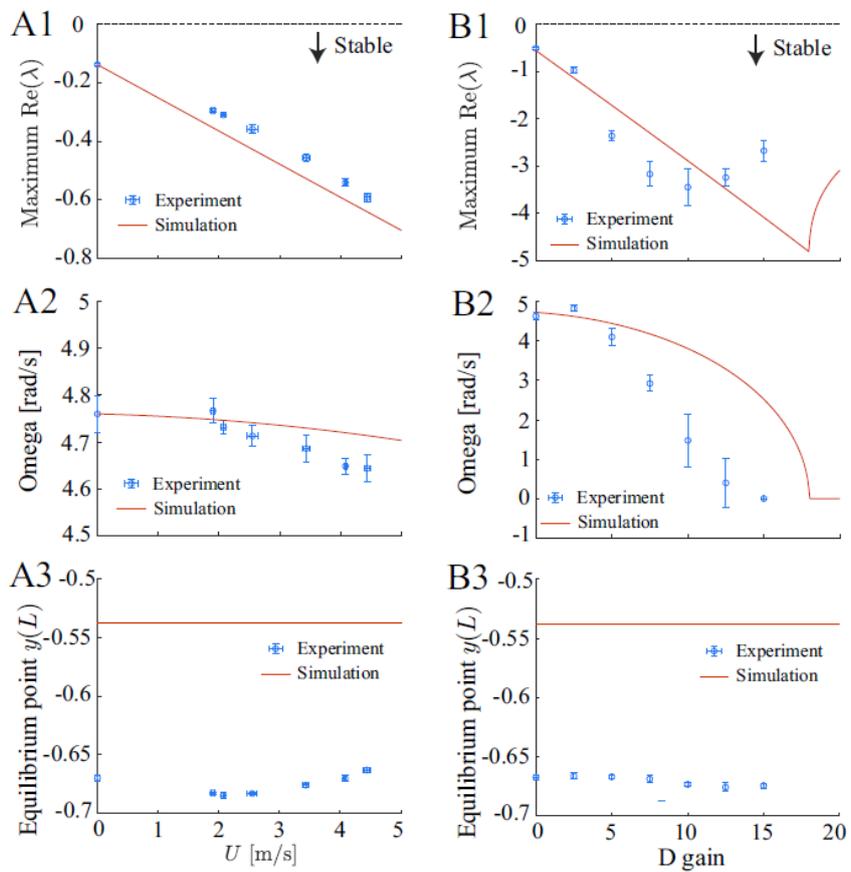


図 4 流速(A)やDゲイン(B)に対する固有値、角速度、平衡点の応答

なお、同一の物理パラメタでシミュレーションした際の、1次モードの固有値、各振動数、平衡点の値も同一のグラフにプロットした。

結果から、実機、シミュレーションともに、流速が上がるにつれて、固有値は減少し、安定性が改善している(図 4A1)。また、角周波数は減少する(図 4A2)。本結果から、本制御で流速に応じて安定性は悪化せず改善できる点が検証できた。

なお、収束した際の平衡点の値(図 4A3) がシミュレーションと実機で異なっているが、これはパイプに曲がり癖がついていた点や、先端が重く変位が大きいため(全長の2割程度)オイラー梁モデルの近似限界などが考えられる。

### C) 提案制御の検証

提案制御のダンパ項により振動が抑制されることを示すために、流速を 3.66m/s で固定し、制御ゲインを  $K=0$  としたうえで、Dゲイン  $D$  を変えた際の外乱応答を前実験と同様に確かめた。

前実験と同様に、固有値  $\lambda$ 、角振動数  $\omega$ 、平衡点  $b$  の  $D$  ゲインに対する変化を図 4B に示す。結果から、 $D$ ゲイン増加とともに、固有値は減少して増加する傾向があることが分かる。また、角周波数についても  $D$ ゲインとともに減少し、ゼロに至る傾向がある。この傾向はシミュレーションと一致する(4B1,2)。以上から、提案する  $D$ 制御についても、シミュレーションと同様に働いており、適切に選択することで安定性を改善できることが分かる。

### 3.4 まとめ

- 流体噴射によって駆動される片持ち送水管に着目し、いくつかの仮定をもとにモデルを導出した。
- モデルのエネルギー関数の時間発展の特長に着目し、流速に寄らずエネルギー関数を常に減少させることができる制御法を提案した。重力がない場合はリアプノフ安定となることを示した。
- 実機実験とシミュレーションにより、提案制御の検証を行い、流体効果により振動が減衰される点と、提案制御により安定性を向上させることが可能であることを示した。実機とシミュレーションの齟齬の部分の詳細な分析は、今後の課題である。

- (1) Paidoussis MP, Issid NT. “Dynamic stability of pipes conveying fluid”, *Journal of Sound and Vibration*. 1974;33(3):267-294.
- (2) 安部祐一, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, “水噴射で浮上する片持ち送水管の安定性に関する考察”, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2018, 1C2-10
- (3) 安部祐一, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, 片持ち送水管の水噴射による安定浮上, 日本機械学会ダイナミクス&デザインカンファレンス, OS4-1-4 621, 福岡市, 2019年8月27-30日.

#### 4 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

安部 祐一, 東北大学, 助教  
多田隈 建二郎, 東北大学, 准教授  
昆陽 雅司, 東北大学, 准教授  
田所 諭, 東北大学, 教授

#### 5. 研究実施時期

2019年(平成31年)4月1日から 2020年(令和2年)9月30日まで

#### 6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- 安部祐一, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, 片持ち送水管の水噴射による安定浮上, 日本機械学会ダイナミクス&デザインカンファレンス, OS4-1-4 621, 福岡市, 2019年8月27-30日.
- 安部祐一, 山内悠, 昆陽雅司, 多田隈建二郎, 田所諭, 大変形する柔軟送水ホースの流体力を考慮したモデル化に関する考察, 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2019, 1B4-03, 高松市, 2019年12月12-14日.

実験結果も含めてまとめたものをジャーナルとして投稿予定.

#### 7. 内外における関連研究の状況

これまで, 内部に流体が流れる送水管の振動現象は, パイプラインでの振動などの工学的な問題を含んでおり, 多く分析されてきた. 特に, 先端が開放されている片持ちパイプにおいて, 臨界流速を超えると振動が起きてたわみが増大していくフラッタ現象が起こることが知られている. これに対し, ワイヤなどを用いた制振手法も何点か報告されている(H. Doki et al, Journal of Fluids and Structures, 1998). しかし, 著者の知る限り, 水の噴射反力を用いて胴体の浮上を安定化させた研究はなされていない.

#### 8. 今後の発展に対する希望

今後は以下のようにモデルを拡張して分析可能範囲を増やし, 実際の柔軟索状ロボットに適用できるようにしたいと考えている.

- 本モデルの3次元化による分析
- 梁モデルを拡張して, 大きな変形を扱えるようなモデルにする.
- 胴体に分散して複数の噴射がある場合へのモデルの拡張