

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	フライフィッシングの原理を応用した小型低出力マニピュレータによる投擲の研究 第1報：ロッドからの繰り出しを考慮したラインのモデリング
Title(English)	Study on Casting by Using Compact and Low-Power Manipulator Based on the Principle of Fly-Fishing - 1st Report: Modeling of Line with Consideration of Releasing from Rod -
著者(和文)	袴田遼典, 遠藤央, 菅原雄介, 石井裕之, 武田行生
Authors(English)	Ryousuke Hakamata, Mitsuru Endo, Yusuke Sugahara, Hiroyuki Ishi, Yukio Takeda
出典(和文)	日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2021 講演論文集, ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2021, 6

# フライフィッシングの原理を応用した小型低出力マニピュレータによる投擲の研究 —第1報：ロッドからの繰り出しを考慮したラインのモデリング—

## Study on Casting by Using Compact and Low-Power Manipulator Based on the Principle of Fly-Fishing - 1st Report: Modeling of Line with Consideration of Releasing from Rod -

○学 袴田遼典 (東工大) 正 遠藤 央 (東工大) 正 菅原雄介 (東工大)  
正 石井裕之 (早大) 正 武田行生 (東工大)

Ryousuke HAKAMATA, Tokyo Institute of Technology, hakamata.r.aa@m.titech.ac.jp

Mitsuru ENDO, Tokyo Institute of Technology

Yusuke SUGAHARA, Tokyo Institute of Technology

Hiroyuki ISHI, Waseda University

Yukio TAKEDA, Tokyo Institute of Technology

This study focuses on fly-fishing to realize casting with less reaction force by a compact and low-power manipulator. In this paper, a modeling method of a line released from a rod is proposed to realize fly-fishing by such a manipulator. First, the line is modeled as a serial chain composed of multiple links where a single link's length changes according to the line's release speed. Here, inspired by the bisection method, when the link exceeds twice the length of the others, the link is considered as divided into two links to improve the analysis accuracy. In addition, a computational method to take into account the aerodynamic force applying on the line is proposed. Finally, the validity of the proposed model is confirmed by evaluating the error of the simulation results based on the result of a pendulum experiment of a line released from a fixed point at a constant release speed.

**Key Words:** Casting, Modeling of cable, Fly-fishing, Flexible robot, Manipulation

### 1 はじめに

紐などを機構のリンクの一部として用いたエンドエフェクタの投擲により、遠くの対象物を掴みそれを手繰り寄せ、対象物の回収や機体自体の移動を可能とすることで、軽量かつ簡素な機構で作業範囲の拡大を実現するキャストマニピュレータの研究がある [1]。このキャストマニピュレータを小型移動ロボットに搭載することで、移動ロボットのさらなる作業範囲の拡大が期待できる。

キャストマニピュレータの研究には、回転運動により蓄積したエネルギーによる投擲 [1]~[5] や、シリンダの高速動作による投擲 [6] の研究があるが、これらの手法では投擲距離が長いほど投擲時に機体に生じる反力が大きくなる。ここで、より反力の小さい投擲が可能となれば、ドローンやケーブル上を走行するロボット [7] など、反力の影響を受けやすいような小型移動ロボットにも搭載することが可能となる。

ここで著者らは、釣魚の一手法であるフライフィッシングに着目した。フライフィッシングとは、ラインの先端に非常に軽量のフックを付け、繰り出されたラインの質量を利用し投擲する手法である [8]。フライフィッシングの様々な手法の中ではフォルスキャストが代表的であり、かつ最も速くに投擲できる。この投擲手法では、ロッドを前方に振るフォワードキャスト (図 1(a)) や後方に振るバックキャスト (図 1(b)) を繰り返す。ここで、ラインはロッドの根元付近で把持されることにより繰り出しが拘束されており、またロッドの先端から適切な長さだけ出ている。フォワードキャストキャストとバックキャストの切り替えをラインが伸びる瞬間に行うことで、図 1(c) に示すような U 字型のループ形状のラインを形成できることがわかっている [9]。この時、フォワードキャスト中にラインの拘束を解くことで、ラインの慣性力によりガイドに沿ってロッドの先端からラインが繰り出される。これにより、人の腕部の仕事がラインの位置エネルギーとして蓄積される [10]。ループ形状が十分な長さになったのち、図 1(d) のようにロッドを振り下ろすことで、ループ形状が伸びてフックが目標地点まで投擲される。この投擲手法により、人の腕部に生じる小さな反力でもより遠くへ投擲できる。したがって

この原理を応用すれば、小型低出力マニピュレータによるより遠くへの投擲が可能となると考えられる。

フライフィッシングの力学解析と制御法については、ラインの運動方向の解析や制御がこれまでのフライフィッシングのモデル化や制御に関する研究 [8]~[12] で行われてきた。ただしフライフィッシングの投擲動作で特徴的である逐次的なラインの繰り出しについては、これをモデル化し解析した例はない。

本研究では、文献 [8] で提案されたモデルを拡張し、ロッドから逐次的に繰り出されるラインの力学モデルを提案する。具体的にはラインを多リンク機構としてモデル化し、特に二分法の原理に着想を得てロッド先端に接続されたリンクが延伸し適宜分割されることでラインの繰り出しを記述するものである。また、ラインに生じる空気力の影響は無視できないため、これを流れ場に斜めに置かれた円筒に生じる揚力と抗力としてモデル化し、上記のモデルに統合する。このモデルの妥当性と課題について、これを用いたシミュレーションと実験結果に基づき考察する。

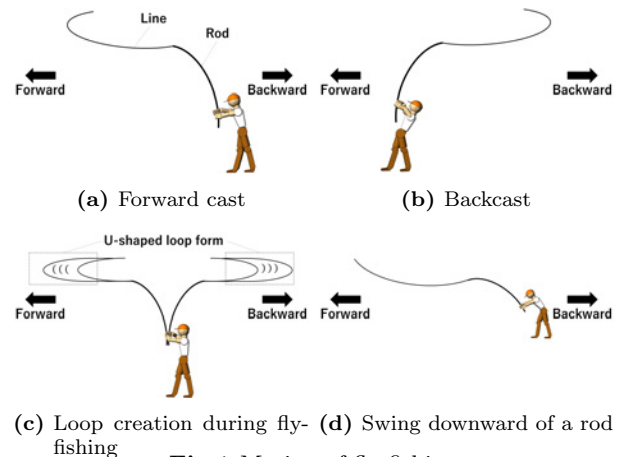


Fig.1 Motion of fly-fishing

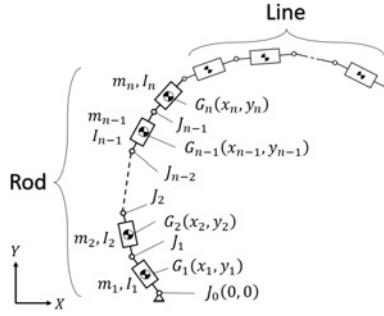


Fig.2 Rod and line as a serial chain composed of multiple links

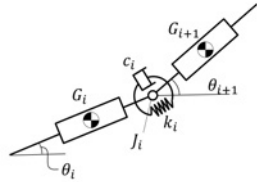


Fig.3 Joint between links

## 2 ロッドとラインの解析モデル

### 2.1 ロッドの解析モデル

ロッドとラインを図2, 図3のように、複数の剛体要素が回転ばねと回転減衰が生じる回転対偶で結合された平面機構としてモデル化する。本節では、図2のロッドのみを解析の対象とする。ここで用いるパラメータを以下のように定義する。

- $i$  : リンク番号 (1~ $n$ )
- $m_i$  :  $i$  番目のリンクの質量
- $I_i$  :  $i$  番目のリンクの慣性モーメント
- $k_i$  :  $J_i$  の回転ばね定数
- $c_i$  :  $J_i$  の回転減衰定数
- $l_i^R$  :  $G_i J_i$
- $l_i^L$  :  $J_i G_{i+1}$
- $l_i$  :  $l_i^R + l_i^L$

- $\mathbf{r} = [x_1 \ y_1 \ \dots \ x_n \ y_n]^T$  : 位置ベクトル
- $\boldsymbol{\phi} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T$  : 回転方向ベクトル
- $\mathbf{Q}_r, \mathbf{Q}_\phi$  : 一般化力

ここで、質量行列、慣性テンソルはそれぞれ次のように定める。

$$\mathbf{M}_r = \text{diag}[m_1 \ m_1 \ m_2 \ m_2 \ \dots \ m_n \ m_n] \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_\phi = \text{diag}[I_1 \ I_2 \ \dots \ I_n] \quad (2)$$

文献 [8] では、ラグランジュの未定乗数法により導出される次のような関係式を用いてロッドやラインをモデル化した。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_r & 0 & \boldsymbol{\Phi}_r^T \\ 0 & \mathbf{M}_\phi & \boldsymbol{\Phi}_\phi^T \\ \boldsymbol{\Phi}_r & \boldsymbol{\Phi}_\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_r \\ \mathbf{Q}_\phi \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 $\boldsymbol{\lambda}$  はラグランジュの未定乗数ベクトルであり、拘束方程式  $\boldsymbol{\Phi}$  および  $\boldsymbol{\gamma}$  はそれぞれ次のように表せ、 $\boldsymbol{\Phi}$  を  $\mathbf{r}$ ,  $\boldsymbol{\phi}$  で偏微分したものをそれぞれ  $\boldsymbol{\Phi}_r$ ,  $\boldsymbol{\Phi}_\phi$  と定義する。

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} l_1^L \cos \theta_1 - x_1 \\ l_1^L \sin \theta_1 - y_1 \\ x_1 + l_1^R \cos \theta_1 + l_2^L \cos \theta_2 - x_2 \\ y_1 + l_1^R \sin \theta_1 + l_2^L \sin \theta_2 - y_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} + l_{n-1}^R \cos \theta_{n-1} + l_n^L \cos \theta_n - x_n \\ y_{n-1} + l_{n-1}^R \sin \theta_{n-1} + l_n^L \sin \theta_n - y_n \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} l_1^L \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 \\ l_1^L \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \\ l_1^R \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 + l_2^L \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 \\ l_1^R \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 + l_2^L \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 \\ \vdots \\ l_{n-1}^R \dot{\theta}_{n-1}^2 \cos \theta_{n-1} + l_n^L \dot{\theta}_n^2 \cos \theta_n \\ l_{n-1}^R \dot{\theta}_{n-1}^2 \sin \theta_{n-1} + l_n^L \dot{\theta}_n^2 \sin \theta_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

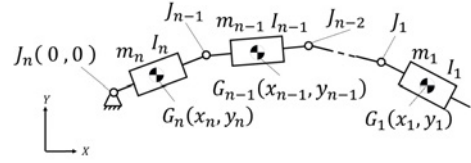


Fig.4 Line as a serial chain composed of multiple links

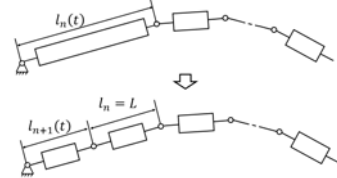


Fig.5 Division of nth link

式 (3) を連立方程式と見なし  $\ddot{\mathbf{r}}$  と  $\boldsymbol{\lambda}$  を消去するように解くことで次の運動方程式を得る。これにより、ロッドの根元にかかるトルクや根元の角度が与えられれば、ロッドやラインの挙動を求めることができる。

$$\ddot{\boldsymbol{\phi}} = (\mathbf{M}^*)^{-1} \mathbf{Q}^* \quad (6)$$

$$\mathbf{M}^* = \mathbf{M}_\phi + \boldsymbol{\Phi}_\phi^T (\boldsymbol{\Phi}_r^T)^{-1} \mathbf{M}_r \boldsymbol{\Phi}_r^{-1} \boldsymbol{\Phi}_\phi \quad (7)$$

$$\mathbf{Q}^* = \mathbf{Q}_\phi - \boldsymbol{\Phi}_\phi^T (\boldsymbol{\Phi}_r^T)^{-1} (\mathbf{Q}_r - \mathbf{M}_r \boldsymbol{\Phi}_r^{-1} \boldsymbol{\gamma}) \quad (8)$$

### 2.2 繰り出されるラインのモデル化

前節で述べた手法では、全てのリンクの長さが変化することを想定していないため、ロッドのモデル化には適用可能だが、繰り出されるラインのモデル化にはそのままでは適用できない。そこで、式 (3) を拡張し新たな変数を導入することで、ラインの長さに対応したモデルに拡張する。

まず、ラインを図2のように多リンク機構と見なすとき、図4のようにラインの先端のリンクを第1リンク、ロッドに接続しているリンクを第  $n$  リンクとする。各リンクの関係は図3と同様である。したがって、前節のロッドのモデルとリンク番号の順番が逆となるように計算する。

また、第  $n$  リンクはラインの繰り出し速度に応じて伸びる可変リンクと見なし、次のように定義する。ここで、 $m$  はラインの分割数であり、初期状態において  $m = n$  である。

$$l_1 = l_2 = \dots = l_{m-1} = L \quad (9)$$

$$l_m = l(t) \quad (10)$$

さらにここで、二分法の原理に着想を得て、図5のように、第  $n$  リンクが一定の長さ (元のリンクの長さの2倍) に達したときこれを第  $n+1$  リンクと第  $n$  リンクに分割する。すなわち、 $l(t) > 2L$  のとき  $m = n+1$  となる。これにより、第  $m$  リンクの長さは最大でも  $2L$  であるため、この  $L$  を十分小さな値とすることで、本来柔軟物であるラインの挙動を再現できるはずである。

ラインの第  $n$  リンクの長さを  $l_n(t) = l_n^L(t) + l_n^R(t)$  と表し、ロッドの先端部を原点として考える。このとき、前節と同様の計算に式 (11) および式 (12) を導入すると、式 (13) が得られる。

$$\boldsymbol{\Phi}_{l_n} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \cos \theta_n & 0 \\ \sin \theta_n & 0 \\ 0 & \cos \theta_n \\ 0 & \sin \theta_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} l_2^R \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 + l_1^L \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 \\ l_2^R \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + l_1^L \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \\ \vdots \\ l_n^R \dot{\theta}_n^2 \cos \theta_n + l_{n-1}^L \dot{\theta}_{n-1}^2 \cos \theta_{n-1} + 2l_n^R \dot{\theta}_n \sin \theta_n \\ l_n^R \dot{\theta}_n^2 \sin \theta_n + l_{n-1}^L \dot{\theta}_{n-1}^2 \sin \theta_{n-1} - 2l_n^R \dot{\theta}_n \cos \theta_n \\ l_n^L \dot{\theta}_n^2 \cos \theta_n + 2l_n^L \dot{\theta}_n \sin \theta_n \\ l_n^L \dot{\theta}_n^2 \sin \theta_n - 2l_n^L \dot{\theta}_n \cos \theta_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

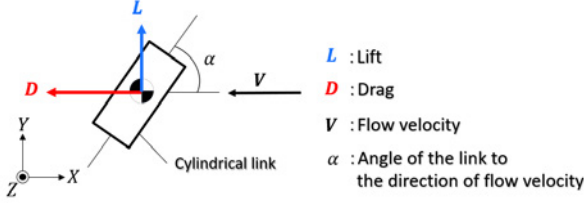


Fig.6 Aerodynamic force applying on cylindrical link

$$\begin{bmatrix} M_r & 0 & 0 & \Phi_r^T \\ 0 & M_\phi & 0 & \Phi_\phi^T \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{l_n}^T \\ \Phi_r & \Phi_\phi & \Phi_{l_n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{l}_n^R \\ \ddot{l}_n^L \\ \ddot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_r \\ Q_\phi \\ 0 \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (13)$$

この式では  $\gamma$  に  $\dot{l}_n^L$  および  $\dot{l}_n^R$  が含まれるため、連立方程式を解くことが容易ではない。しかし、1章で述べたように、フライフィッシングではラインの繰り出し速度  $\dot{l}_n = \dot{l}_n^L + \dot{l}_n^R$  はラインの慣性力により求まる。このとき、

$$\gamma' = \gamma - \Phi_{l_n} \begin{bmatrix} \dot{l}_n^R \\ \dot{l}_n^L \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

とすることで、

$$\begin{bmatrix} M_r & 0 & \Phi_r^T \\ 0 & M_\phi & \Phi_\phi^T \\ \Phi_r & \Phi_\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_r \\ Q_\phi \\ \gamma' \end{bmatrix} \quad (15)$$

が得られ、ロッドとラインは  $\gamma$  の値を変えることにより前節と同様の手法で解析が可能になる。

### 2.3 空気力の考慮

ラインは軽量であり、空気力の影響は無視できないと考えられ、これをモデルに反映させる。前節までは平面機構としてモデル化したのが、空気力はラインの直径に依存するため、3次元空間で空気力をモデル化する。図6のような進行方向に対して傾いている細長い円柱モデルに作用する空気力は、主に円柱軸の垂直方向に作用し、円柱軸方向に生じる力は無視でき、また空気力の大きさは流速  $V$  の円柱軸垂直成分  $V \sin \alpha$  に起因するとされている [13]。そのため、流速に円柱が垂直に置かれた場合の抗力係数  $C_{Dbasic}$  を用いて、揚力係数  $C_L$  および抗力係数  $C_D$  は次式のように表せる。

$$C_L = C_{Dbasic} \sin^2 \alpha \cos \alpha \quad (16)$$

$$C_D = C_{Dbasic} \sin^3 \alpha \quad (17)$$

したがって、揚力、抗力は次式のように表せる。

$$L = \frac{1}{2} \rho C_{Dbasic} (V \sin \alpha)^2 \cos \alpha d l \quad (18)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho C_{Dbasic} (V \sin \alpha)^2 \sin \alpha d l \quad (19)$$

ただし、 $\rho$  は空気密度、 $d$  は円柱の直径、 $C_{Dbasic}$  はレイノルズ数  $Re_i$  の関数である。各リンクのレイノルズ数  $Re_i$  は空気動粘性係数  $\nu$  を用いて次式に基づき定められる。また、各リンクにおける  $C_{Dbasic}$  を  $C_{Di}$  とし、文献 [14] から、次式のように近似できる。

$$Re_i = \frac{|\dot{r}_i| l}{\nu} \quad (20)$$

$$C_{Di} = 3.7434 Re_i^{-0.1776} \quad (\text{低レイノルズ数領域}) \quad (21)$$

$$C_{Di} = 0.83 \quad (10^3 \text{前後のレイノルズ数領域}) \quad (22)$$

$\dot{r}_i$  は各リンクの速度であり、次式に基づき定められる。

$$\dot{r} = -\Phi_r^{-1} \left( \Phi_\phi \dot{\phi} + \Phi_{l_n} \begin{bmatrix} \dot{l}_n^R \\ \dot{l}_n^L \end{bmatrix}^T \right) \quad (23)$$

これにより、各リンクの速度やレイノルズ数、抗力係数が求められるため、これを式 (15) の  $Q_r$  に反映することで、空気力を受ける繰り出されるラインのモデル化ができる。

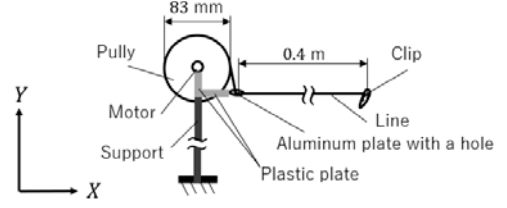


Fig.7 State of experimental equipment before the start of an experiment

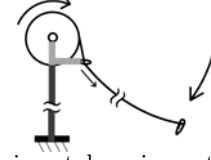


Fig.8 State of experimental equipment after the start of an experiment

Table 1 The values of the parameters

	Parameter	Value
Mass of links	$m_i$	$1.01 \times 10^{-4}$ kg
Rotational spring constant	$k_i$	$2.00 \times 10^{-6}$ N·m/rad
Rotational damping coefficient	$c_i$	$5.0 \times 10^{-4}$ N·m·s/rad
Length of links	$l_i$	0.075 m
Moment of inertia	$I_i = L$	$4.73 \times 10^{-8}$ kgm <sup>2</sup>
Initial total length of line	$\sum_{i=1}^n l_i$	0.4 m
Diameter of line	$d$	$0.235 \times 10^{-3}$ m
Release speed of line	$\dot{l}_n$	0.130 m/s

### 3 モデルの妥当性の確認の実験

提案したモデルの妥当性を検証するため、シミュレーションと実験の比較を行った。実際のフライフィッシングでは、ラインの繰り出し速度はラインに生じる慣性力により求まるが、ここではラインの繰り出し速度がモデルの挙動に与える影響を考察するため、ラインの繰り出し速度を一定とし、プーリから逐次的に繰り出されるラインの先端に錘を付けた振子の挙動を対象として選定した。

#### 3.1 実験方法とシミュレーションのパラメータ

実験方法は以下の通りである。

1. 床に固定された柱の十分高い箇所にはプラスチック板を固定し、それに直径 2 mm の穴をあけたアルミ板を、穴が床に垂直になるように固定する。
2. サーボモータ (KRS-4032HV ICS) と直径 83 mm のプーリを組み合わせ、プーリにライン (DAIWA UVF メガセンサー 8 ブレイド+Si2 号) を一周巻きつける。
3. 1 の柱の十分高い箇所にこのプーリを取り付け、穴からラインが 0.4 m 出ている状態にする。
4. ラインの先端にクリップ (0.25 g) を取り付け、ラインが張った状態を維持しながら、ラインの先端を穴と同じ高さまで持ち上げる (図 7)。
5. 円柱を  $\pi$  rad/s で回転させ穴から一定速度でラインを繰り出し、同時にクリップの固定を解き (図 8)、120 fps で動画を撮影する。
6. 撮影した動画から描画ソフトを用いてクリップの軌跡を求め、シミュレーション結果と比較する。

シミュレーションに用いる各パラメータは、表 1 のように設定する。各リンクの長さは文献 [8] と同程度の値とした。回転ばね定数  $k_i$  は文献 [8] より、各リンクの縦弾性係数  $E$  と断面二次モーメント  $I_{zi}$  を用いて次のように表せる。

$$k_i = \frac{EI_{zi}}{l_i} \quad (24)$$

また、回転減衰係数は計算により求めることが困難であるため、

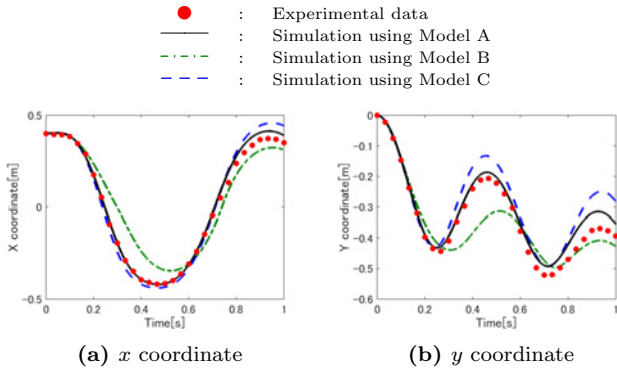


Fig.9 Comparison of the trajectories of the tip of the line

Table 2 RMSE of each simulation result

	RMSE(x)[m]	RMSE(y)[m]
Model A	0.0238	0.0303
Model B	0.0892	0.0594
Model C	0.0453	0.0624

ここでは十分微小な値として  $5.0 \times 10^{-4}$  N·m·s/rad を用いた。シミュレーションは、次の3つのモデルを対象に、ルンゲクッタ・ギル法を用いて、MATLABによりサンプリング間隔を  $10^{-4}$  s として行った。実験結果は、撮影した動画を 1/30 s ごとに区切り、穴を原点としたクリップの位置の軌跡を求めた。

**Model A** 式 (15) に空気力を反映したモデル

**Model B** 式 (3) に空気力を反映したモデル

**Model C** 式 (15) に空気力を反映しないモデル

ただし、Model B は運動方程式を解くときおよびシミュレーション時に、各リンクの長さを  $l_i + (1/n) \int_0^t \dot{l} dt$  とすることで、Model A や Model C とラインの全長が等しくなるようにした。

### 3.2 実験とシミュレーションの結果

シミュレーションと実験結果の比較の結果を図9に示す。3つのシミュレーションのうち、Model A を用いたシミュレーションが最も実験と類似した波形が得られた。次に、これらの結果の誤差評価を行う。グラフから、外れ値が大きいものがないことより、同じ実験データに対しての誤差の相対比較に使用される RMSE を精度評価指標とする。それぞれの算出結果を表2に示す。これらの結果から、ラインの繰り出しと空気力を考慮したモデルが実験結果をもっともよく再現できることが分かった。しかしながら、測定時間が進むほどシミュレーションで得られた値と測定値との差が大きくなっており、振動の周期や振動の減衰比に誤差があることが考えられる。その原因として、シミュレーションではラインの繰り出し速度が一定であるとしているが、実験ではラインと穴との摩擦によりラインの繰り出し速度が変化してしまったためと考えられる。なお、ここでは各リンクの長さは根拠なく定めており、目標とする精度や計算コストに基づき決定する方法については今後の課題である。

## 4 おわりに

本研究では、フライフィッシングの力学解析と制御法の理論構築のために解決すべき課題の一つとして、ロッドから逐次的に繰り出されるラインの挙動を解析するためのモデル化手法を検討した。そこで、ラインの繰り出しがモデルの挙動に与える影響を求めめるため、文献 [8] の手法に基づきラインを多リンク機構としてモデル化するとき、そのリンクの長さが時間に応じて変化する場合の運動方程式の導出した。得られた結論は以下のようにまとめられる。

- 文献 [8] の手法に基づき、ロッドやラインを、複数の剛体要素が回転ばねと回転減衰が生じる回転対偶で結合した多リンク機構と見なしモデル化した。
- 文献 [8] の手法を拡張し、ラインの長さが繰り出された長さに応じて変化するように、根元のリンクをラインの繰り出

しの速度に応じた可変リンクと見なししてモデル化する手法を考案した。ここで、二分法の原理に着想を得て、根元のリンクの長さが元の長さの2倍を超えたとき、このリンクが2つのリンクに分割されるようなモデルとした。これにより本来柔軟物であるラインの挙動をより再現できる。

- 繰り出されるラインのモデルにおける運動方程式で使用する変数から各リンクに生じる空気力をモデル化し、ラインのモデルに統合した。
- 一定速度で繰り出されるラインの振子運動を対象として実験およびシミュレーションを行い比較したところ、提案手法によりラインの繰り出しと空気力を考慮したモデルが、これらを考慮しない場合と比べ、その挙動をよく再現できることが分かった。ただし、振動の周期や減衰比には誤差があった。

今後は、提案したラインのモデルをロッドに組み合わせ、前後に振られるロッドと繰り出されるラインを結合した解析手法を検討する。その後、マニピュレータを用いた実験と人間の動作との比較を通してフライフィッシング動作の制御法を検討し、小型低出力マニピュレータによるフライフィッシングの実現を目指す。

## 謝辞

本研究の一部は競輪の補助を受けて実施した。

## 参考文献

- [1] 有隅仁, 神徳徹雄, 小森谷清, “キャストイングマニピュレーションに関する研究: 第1報, 可変長のひも状柔軟リンクを有するマニピュレータの提案とそのスイング制御法”, 機論 C, 64-626, pp. 3854-3861, 1998.
- [2] 有隅仁, 横井一仁, 神徳徹雄, 小森谷清, “キャストイングマニピュレーションに関する研究: 第2報, スイング動作の制御実験とグリッパの投射動作”, 機論 C, 65-639, pp. 4356-4363, 1999.
- [3] 有隅仁, 小森谷清, “キャストイングマニピュレーションに関する研究: 第3報, 撃力に対するひもの粘弾性解析とグリッパの空中軌道制御”, 機論 C, 68-665, pp. 139-146, 2002.
- [4] 有隅仁, 小森谷清, “キャストイングマニピュレーションに関する研究: 第4報, 撃力を用いた飛行中のグリッパの姿勢制御”, 機論 C, 68-665, pp. 147-155, 2002.
- [5] H. Arisumi, M. Otsuki, S. Nishida, “Launching penetrator by casting manipulator system”, 2012 IEEE/RSJ IROS, pp. 5052-5058, 2012.
- [6] ワタリエイリ, 塚越秀行, 北川能, “ロボットの投擲・跳躍能力を高める磁性ブレーキシリンダ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 1, pp. 95-105, 2010.
- [7] R. Sudiono, Y. Sugahara, M. Endo, D. Matsuura, Y. Takeda, “Cable Traversing Robots on Spatially Structured Cableway for Reconfigurable Parallel Cable System”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 1A1-S02, 2019.
- [8] 渡邊鉄也, “フライキャストイングにおけるモデリングと解析”, 計測と制御, Vol. 58, No. 1, pp. 2-7, 2019.
- [9] G. A. Spolek, “The mechanics of flycasting: The flyline”, American Association of Physics Teachers, Vol. 54, No. 9, pp. 832-836, 1986.
- [10] J. M. Robson, “The physics of fly casting”, American Association of Physics Teachers, Vol. 58, No. 3, pp. 234-240, 1990.
- [11] C. Gatti-Bono, N. C. Perkins, “PHYSICAL AND NUMERICAL MODELING OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A FLY LINE”, J. of Sound and Vibration, Vol. 255, No. 3, pp. 555-577, 2002.
- [12] N. Tsubasa, N. Shigeki, M. Sampei, “Casting motion controller for multilinked manipulator utilizing output zeroing”, Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference, pp. 4402-4407, 2009.
- [13] S. F. Hoerner, “FLUID-DYNAMIC DRAG”, New Jersey, 1958.
- [14] 山邊茂之, 熊本博光, 西原修, “釣り仕掛けアニメーションのための抗力係数の同定と過渡的糸挙動の再現”, 精密工学会誌論文集, Vol. 71, No. 11, pp. 1448-1453, 2005.