

航空力学に基づくパラシュートを用いた昼花火のシミュレーション

矢花 明莉[†] 藤澤 誠[†](正会員) 三河 正彦[†][†]筑波大学

Daytime Fireworks Simulation with Parachute Based on Aerodynamics

Akari YABANA[†], Makoto FUJISAWA[†](Member), Masahiko MIKAWA[†][†]University of Tsukuba

〈あらまし〉本研究では、昼花火を物理シミュレーションを用いてCGアニメーションにより再現する方法を提案する。昼花火は打ち上げ花火の一種であり、中でも本研究は「煙竜」と呼ばれる昼花火を対象とする。煙竜は、発煙筒をつけたパラシュートを打ち上げて、パラシュートの落下とともに煙が描く螺旋状の軌跡を鑑賞する花火である。提案手法では、パラシュートのシミュレーションと流体シミュレーションによる煙を組み合わせることで、煙竜をCGで再現する。パラシュートのシミュレーションでは、屋根部分を航空力学に基づく力を考慮したパラシュートモデル、荷物部分を自由落下する質点としてモデル化し、間を繋いでいる紐をバネ・ダンパを用いて表現する。煙は格子法を用いた流体シミュレーションによって再現し、パラシュートの荷物部分から煙を噴出することで煙竜のシミュレーションを行う。

キーワード：物理シミュレーション, 昼花火, 流体シミュレーション, 航空力学

〈Summary〉 This paper proposes a method to reproduce daytime fireworks as CG animation using physical simulations. Daytime fireworks are a kind of fireworks and this paper focuses on daytime fireworks called "Enryu". Enryu is a firework that launches the parachute with the smoke candle and watch the smoke follow a spiral trajectory as the parachute falls. In this paper, we simulate Enryu by combining the simulation of the parachute and the smoke from the fluid simulation. In the simulation of the parachute, the top part is modeled as a parachute model based on aerodynamics, the bottom part is modeled as a single mass point, and the string connecting the two part is represented by spring and damper. We simulated smoke by grid-based fluid simulation, and Enryu is simulated by blowing smoke from the bottom part of the parachute.

Keywords: physical simulation, daytime fireworks, fluid simulation, aerodynamics

1. はじめに

近年、映画やゲームなどのインタラクティブコンテンツにおいて、コンピュータグラフィクス (CG) 技術による表現は欠かせないものとなっている。特に自然現象において、アーティストの技量や作業量に依存せず高品質なCGを作成するために、物理シミュレーション技術に関する研究が数多く行われている。物理シミュレーションの対象となる物理現象の中で、本研究では打ち上げ花火とそれにより生ずる煙の動きに着目する。打ち上げ花火の中でも、音や光を楽しむコンテンツである夜花火は、ゲームやインタラクティブコンテンツ等で用いられるため多く研究されている^{1),2)}。一方で、打ち上げ花火には昼に打ち上げる昼花火も存在する。昼花火は音や

煙を楽しむコンテンツであり、現在は秋田県で行われる大曲の花火大会など、少数の花火大会でのみ開催されている³⁾。昼花火には、音を楽しむ号砲や万雷、煙が菊のように広がる煙菊、煙が柳のように垂れて落ちる煙柳、パラシュートに発煙筒をつけて落下させる煙竜などの種類が存在する。本研究では、物理シミュレーションを用いて煙竜を再現することを目的とする。

CG分野において昼花火を対象とした研究は少なく、中でも煙竜の再現を目的とした研究は我々の調べた限りではまだない。煙竜は他の昼花火と比べても周りの気流の変化に影響されやすく、またパラシュートの設定によって見た目の制御がある程度可能であるため、煙竜のシミュレーション手法を

提案することで、新たなインタラクティブアートの提案に活用できると考える。

煙竜は、パラシュートに発煙筒をつけたものを打ち上げ、パラシュートの落下とともに煙が螺旋状の軌跡を描く様子を鑑賞する花火である。本研究では、煙竜をパラシュートのシミュレーションと煙のシミュレーションを組み合わせることによって再現する方法を提案する。パラシュートのシミュレーションでは、パラシュートの屋根部分を航空力学的な力を考慮した円形パラシュートモデル⁴⁾、荷物部分を自由落下する質点としてモデル化し、間を繋ぐ紐をバネ・ダンパを用いて表現する。煙は格子法を用いた流体シミュレーションによって再現する。

2. 手 法

本研究で提案する手法の概要を図1に示す。本研究の対象である昼花火の煙竜は、発煙筒をつけたパラシュートを打ち上げ、落下させる現象である。この再現のため、本研究ではパラシュートのシミュレーションと煙のシミュレーションを組み合わせる手法を提案する。シミュレーションはパラシュート、煙の順で行う。パラシュートと煙のシミュレーションについて、それぞれ2.1節と2.2節で説明する。

2.1 パラシュートシミュレーション

提案手法では、パラシュートを屋根部分、荷物部分、間を繋ぐ紐の3つの部分に分けてモデル化する。それぞれ、屋根部分は航空力学的な力である抗力やピッチングモーメントを考慮した円形パラシュートモデル、荷物部分は自由落下する質点としてモデル化し、間を繋ぐ紐はバネ・ダンパを用いて表現する。

屋根部分は円形パラシュートモデル⁴⁾を用いて、6自由度の剛体として扱う。パラシュートの物体座標系から見た6自由度の剛体の支配方程式を以下に示す。

$$\mathbf{F}_{canopy} = m\dot{\mathbf{V}} + m(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}) \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_{canopy} = \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega} \quad (2)$$

ここで、 m は質量、 \mathbf{I} は慣性モーメント、 \mathbf{V} は速度、 $\boldsymbol{\Omega}$ は角速度である。 \mathbf{F}_{canopy} 、 \mathbf{M}_{canopy} はそれぞれ図2に示すように、

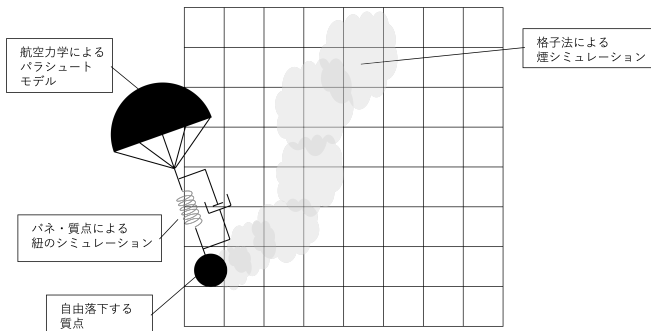


図1 提案手法の全体像
Fig. 1 Overview of our method

屋根部分にかかる力である抗力とピッチングモーメントであり、重力 \mathbf{G}_p を用いて以下のように表せる。

$$\mathbf{F}_{canopy} = \mathbf{F}_{aero} + m\mathbf{G}_p \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{canopy} = \mathbf{M}_{aero} \quad (4)$$

抗力は、流体中を物体が運動する際に流れから受ける、物体の速度と逆方向の力である。抗力 \mathbf{F}_{aero} は、抗力係数 $C_D(\alpha_{sp})$ 、迎角 α_{sp} 、流体の密度 ρ 、f 屋根の投影面積 S_0 、対気速度 \mathbf{V}_a を用いて以下のように表される。

$$\mathbf{F}_{aero} = 0.5C_D(\alpha_{sp})\rho\|\mathbf{V}_a\|S_0\mathbf{V}_a \quad (5)$$

式(3)、式(5)より \mathbf{F}_{canopy} を求め、それを式(1)の左辺に代入し、前進オイラー法で速度 \mathbf{V} を更新することでパラシュートの位置を求める。角速度についても同様にしてピッチングモーメント \mathbf{M}_{canopy} から求める。ピッチングモーメント \mathbf{M}_{aero} は流れから受けるモーメントであり、 R_0 をキャノピーの通常時の半径とすると以下の式で表せる。

$$\mathbf{M}_{aero} = \rho\|\mathbf{V}_a\|S_0R_0 \begin{bmatrix} C_m(\beta) \\ C_m(\alpha) \\ C_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

抗力係数 $C_D(\alpha_{sp})$ 、ピッチングモーメント係数 C_m は実験的に求められる値である⁴⁾。本研究では図3、図4に示す文献4)の実験データを用いて計算している。

ピッチングモーメント \mathbf{M}_{aero} の yaw 成分は、パラシュートが z 軸周りに回転する力を示す。この力の働き方によってパラシュートの軌跡が変化し、煙竜で見られる螺旋を描く様子を再現することができる。

円形パラシュートの屋根部分、荷物部分は、複数本の紐で繋がれている。この紐の長さが全て等しい時は $C_n = 0$ であり、式(6)からピッチングモーメント \mathbf{M}_{aero} の yaw 成分は0になる。従って、この場合はパラシュートは螺旋の軌跡を描かず、直線的に落下する。一方で、複数本の紐の長さに違いがある場合には、 $C_n \neq 0$ となり、その値によってパラシュートの

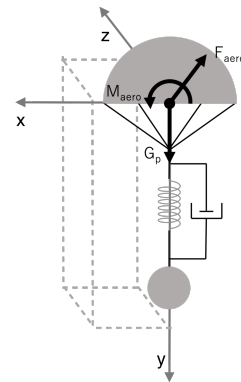


図2 屋根部分にかかる力
Fig. 2 Force applied to the parachute part

軌跡が変化する。図 5 に (1.0, 0.0, 0.0) の風がある場合の C_n の値と軌跡の変化の様子を示す。

2.2 流体シミュレーション

本研究では煙を非圧縮性流体として扱い、流体の支配方程式としてナビエ・ストークス方程式を用いる。非圧縮の粘性流体に関するナビエ・ストークス方程式を以下に示す⁵⁾。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}_{ext} \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{u} は流体速度、 ν は動粘性係数、 ρ は空気の密度、 p は圧力、 \mathbf{F}_{ext} は外力である。また、数値拡散によって滑らかになった流れに乱流を追加する方法として、Vorticity confinement⁶⁾を用いる。式 (7)、式 (8) から求めた速度 \mathbf{u} を用いて、煙の密度 ρ_s を移流させることで煙を表現する。

煙竜では、煙がパラシュートの動きに沿って長い螺旋の軌跡を描くため、シミュレーション空間を広くとる必要がある。シミュレーション空間全体を高解像度に格子分割して計算することで、詳細なシミュレーション結果を得ることができる。

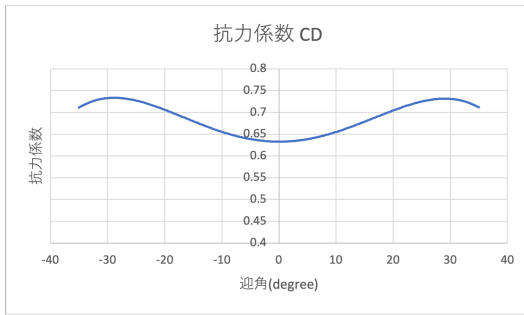


図 3 抗力係数 C_D の実験による計測データ
Fig. 3 Drag coefficient C_D measured by experiment

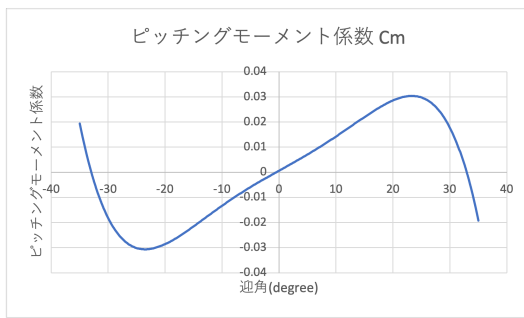


図 4 ピッチングモーメント係数 C_m の実験による計測データ
Fig. 4 Pitching moment coefficient C_m measured by experiment

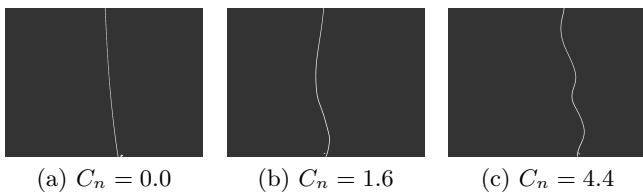


図 5 C_n の値による軌跡の変化
Fig. 5 Trajectory change due to C_n

が、広範囲のシミュレーションでは計算点が多く、膨大な計算時間がかかってしまう。そこで、物体の周囲にはグリッド幅が小さいローカルグリッド、計算空間全体ではグリッド幅が大きいグローバルグリッドを定義し、相互に値をやりとりしながら流体シミュレーションを行う Overlapping grid という手法⁷⁾を用いる。

3. 結果

本章では、提案手法によって煙竜のシミュレーションを行なった結果を示す。実験は CPU: Intel Core i7-3630QM 2.4GHz、メモリ: 16GB の環境で行い、GLSL を用いたテクスチャベースボリュームレンダリングにより結果をレンダリングした。

図 6 にパラシュートの軌跡と煙竜をシミュレーションした結果を示す。左側はパラシュートのみをシミュレーションし、軌跡を白線で示した図、右側は軌跡に沿って煙のシミュレーションを行なった結果である。

図 6 から、パラシュートの軌跡に沿って煙が螺旋状の軌跡を描く、煙竜のシミュレーションができていることが確認できる。パラシュートの軌跡はピッチングモーメント M_{aero} の yaw 成分に関わる C_n によって変化する。本研究では C_n をユーザ指定のパラメータとしているが、実際にはパラシュートの屋根部分と荷物部分を繋ぐ複数本の紐の長さによって決まる値のため、より正確なシミュレーションをしたい場合には紐の長さ C_n の値の関係を調査する必要がある。

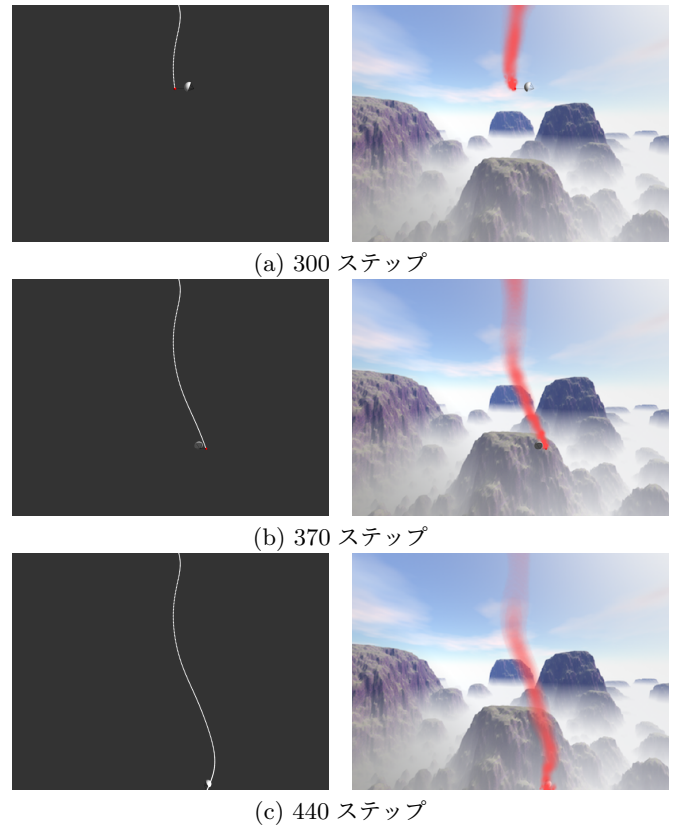
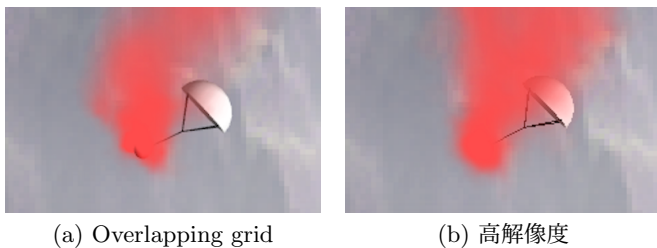


図 6 $C_n = 4.2$ のシミュレーション結果
Fig. 6 Simulation result with $C_n = 4.2$

図7, 図8に Overlapping grid を用いた場合と, 全て高解像度でシミュレーションした場合の結果を示す. 計算時間は Overlapping grid を用いた場合が1ステップあたり約42秒, 全て高解像度でシミュレーションした場合は1ステップあたり約260秒であり, Overlapping grid を用いることで, 高解像度の場合と比べて計算速度が6.2倍高速になった. 図8に示すように, パラシュートから離れた部分では高解像度でシミュレーションした場合の方が細かな乱流が表現できていることが確認できる. 一方で, 図7に示すように, パラシュート付近では Overlapping grid を用いた場合も乱流が表現できている, 高速性を重視したい場合には提案手法が有効である.

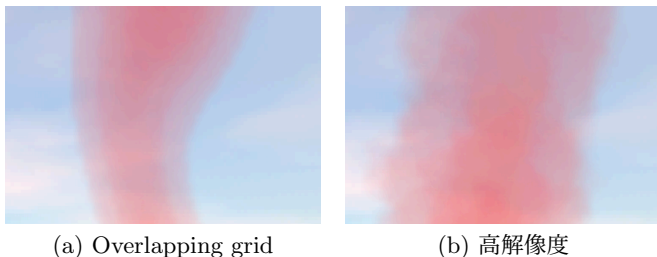
実際の花火大会では, 図9のように複数の煙竜を同時にあげるシーンが多く見られる. このようなシーンを再現するため, レンダリング時に場所によって色を変えることで, 色の違う煙竜が2つある場合のシミュレーションを行なった結果を図10に示す.



(a) Overlapping grid (b) 高解像度

図7 パラシュート付近拡大図

Fig. 7 Closeup view of the area near the parachute



(a) Overlapping grid (b) 高解像度

図8 パラシュートから離れた部分の拡大図

Fig. 8 Closeup view of the area away from the parachute

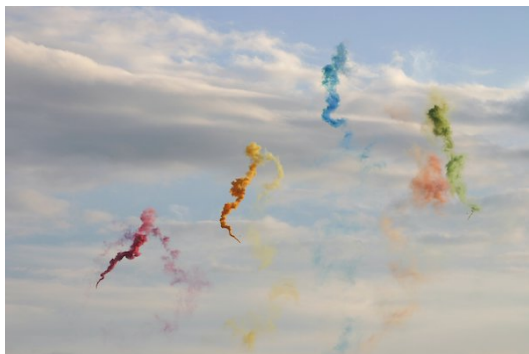


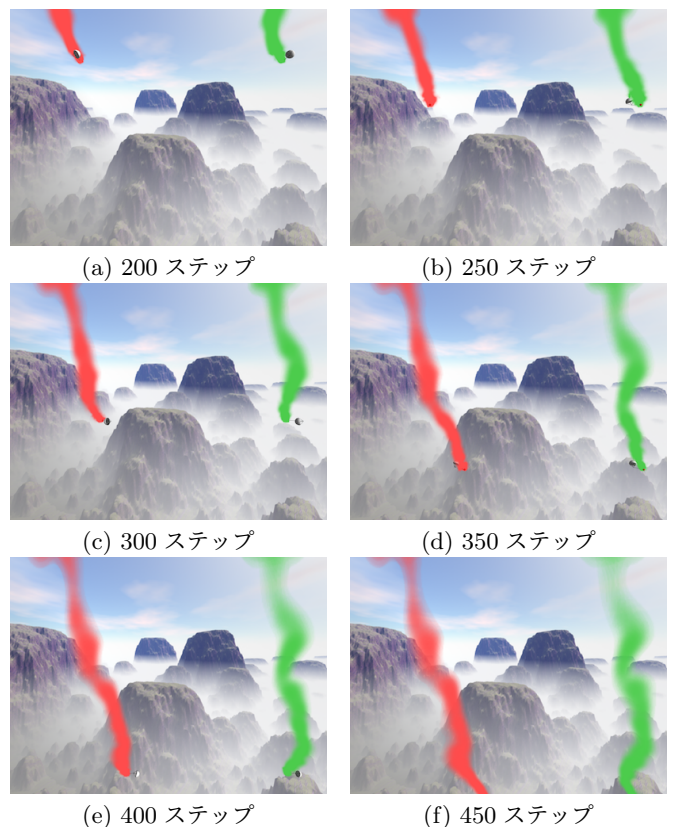
図9 複数の煙竜 (画像提供: 秋田県大仙市)

Fig. 9 Photograph of multiple daytime fireworks "Enryu" (provided from Daisen City, Akita Prefecture)

4. まとめと今後の課題

本研究では, 昼花火の一種である煙竜を物理シミュレーションを用いて再現する手法を提案した. 煙竜は発煙筒をつけたパラシュートを打ち上げて, 落下とともに煙が螺旋状の軌跡を描く様子を鑑賞する花火であるため, パラシュートのシミュレーションと煙のシミュレーションを組み合わせることによってその再現を行なった. また, 提案手法を実装し, パラシュートのパラメータ変更による軌跡の変化や, 実際の花火大会に近いシーンが再現できることを確認した.

今後の課題としては, パラシュートのシミュレーションに関して, 屋根部分と荷物部分の衝突を考慮していないため, 屋根を紐や荷物部分が突き抜けてしまう場合がある点や, 煙のシミュレーションに関して, 移流項の計算の際に数値拡散を防ぐ点が挙げられる. また, 本研究では荷物部分を方向を持たない質点としてモデル化している. 剛体としてモデル化することで, 煙が噴出する向きの変化を考慮することができ, より複雑な煙の動きを表現できると考えられる. また, パラシュートの形状と煙のインタラクションを考慮することで, より現実的な煙竜のシミュレーションを行うことができると考えられる. さらに, 試し打ちのためにシミュレーションを利用する場合には, 本研究では扱っていない花火の打ち上げや, パラシュートが開く過程の再現も必要となる.



(a) 200 ステップ (b) 250 ステップ (c) 300 ステップ (d) 350 ステップ (e) 400 ステップ (f) 450 ステップ

図10 2つの煙竜があるシーン

Fig. 10 Scene with two "Enryu"

参考文献

- 1) H. Chang, H. Peng, C. Tsai: “Cuda-accelerated Rendering of Fireworks in Nearly Ultra High Definition Videos”, Proc. of 2016 IEEE Second International Conference on Multimedia Big Data (BigMM), pp. 251–254 (2016).
- 2) S. Zhang: “Fireworks Simulation Based on Particle System”, Proc. of 2009 Second International Conference on Information and Computing Science, pp. 187–190 (2009).
- 3) 大曲商工会議所, 全国花火競技大会 — 大曲の花火, <https://www.oomagari-hanabi.com>
- 4) V.N. Dobrokhodov, O.A. Yakimenko, C.J. Junge: “Six-degree-of-freedom Model of a Controlled Circular Parachute”, Journal of Aircraft, Vol. 40, No. 3, pp. 482–493 (2003).
- 5) J. Stam: “Stable Fluids”, Proc. of SIGGRAPH 1999, pp. 121–128 (1999).
- 6) T. Kim, N. Thürey, D. James, M. Gross: “Wavelet Turbulence for Fluid Simulation”, ACM Trans. on Graphics, Vol. 27, No. 3, p. 1–6 (2008).
- 7) Y. Dobashi, Y. Matsuda, T. Yamamoto, T. Nishita: “A Fast Simulation Method Using Overlapping Grids for Interactions Between Smoke and Rigid Objects”, Computer Graphics Forum, Vol. 27, No. 2, pp. 477–486 (2008).

(2022年3月8日 受付)

(2022年6月26日 再受付)



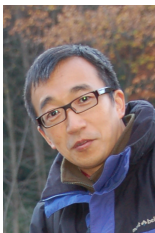
矢花 明 莉

2022年 筑波大学大学院人間総合科学学術院人間総合科学研究群情報学学位プログラム修士課程修了。在学中、物理シミュレーションに関する研究に従事。現在、ヤフー株式会社に勤務。



藤 澤 誠 (正会員)

2005年 静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。2008年 同博士課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2011年 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科助教, 2021年 同准教授, 現在に至る。博士(工学)。CG, 物理シミュレーションなどの研究に従事。情報処理学会, 画像電子学会, 日本 VR 学会, ACM, IEEE CS 各会員。



三 河 正 彦

1994年 大阪大学大学院機械工学分野修士課程修了。同年 NTT アクセス網研究所入所。2003年 筑波大学図書館情報学系講師。2006年 同大学院図書館情報メディア研究科准教授, 現在に至る。博士(工学)。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 日本知能情報ファジィ学会, IEEE 各会員。