

Hydro-Triggered Moto Printing : 立体形状と超撥水加工を用いた 水環境での動きの設計手法

安村 俊介, 橋田 朋子*

(2025.2.28 受理)

Hydro-Triggered Moto Printing: Design Methods for Movement in Water Environments Using 3D Structures and Superhydrophobic Coatings

Shunsuke YASUMURA and Tomoko HASHIDA*

Recent advances in 4D printing and HCI suggest the potential for autonomous movement and self-assembly over time using material properties, without electrical control. While these methods implicitly embed movement patterns for specific structures, they assume a single motion type and do not necessarily consider the explicit design of movement itself. This study focuses on generating intentional motion on the water surface. We propose a design method that induces targeted motion in floating 3D structures by leveraging inflow and outflow as a driving force, using structural design and superhydrophobic coatings. First, we establish the propulsion principle based on inflow and outflow. Then, we define fundamental motions such as linear movement, rotation, and cancellation. By controlling outflow timing, we design motion transitions, enabling delayed linear motion, delayed rotation, and meandering. Finally, we explore greater design flexibility by expanding shape configurations and inflow control.

Keywords : Superhydrophobic, 3D printing, Three-dimensional shape, Water environment, Motion design

近年の4D-PrintingやHCIでは、物性を利用して電気的な制御なしに、時間軸を持った自律的なモノの移動や集合を行える可能性が示されつつある。これらの手法には実現したい構造のためにモノの動き方が暗に含まれているが、動き方は単一のものであって、動き自体の設計は必ずしも考慮されていない。本研究では、水環境で意図的な「動き」を発生させること自体を目的とし、立体構造設計と超撥水加工によって、水に浮かぶ立体に水の受け入れと排水を起こし、それを動力として狙った動きを自律的にする設計手法を提案する。本手法では、まず水の受け入れと排水による推進力を利用した動きの発生原理を構築した。次に、その原理に基づき、直進、回転、動きの打消しといった基本的な動作を定義した。さらに、排水のタイミングを制御することで、動きのパターンの時間変化を設計し、時間を空けてからの直進や回転、蛇行のような複雑な動きを可能にした。加えて、形状設計や水入力の自由度を高める展開を示し、動きの設計手法の更なる可能性を探った。

キーワード：超撥水、3Dプリンティング、立体形状、水環境、動きの設計

1. はじめに

近年、ソフトロボティクスや4D-Printing, HCIにおけるself-assemblyと呼ばれる研究分野では、物性を利用して時間軸を持った自律的なモノの移動や集合を行える可能性が示されつつある¹⁻⁴⁾。本研究ではこれらの中でも、電気を動力源とせず、立体構造および物性と、環境とのインタラクションによっ

て動きを生み出そうとする試みに注目している^{3,4)}。これらの手法には実現したい構造のためにモノの動き方が暗に含まれているが、動き方は機能目的のために恣意的に選択されたものであって、動き自体の設計は必ずしも考慮されていない。

本研究では、意図的な「動き」を発生させること自体を目的とする。その際、動きは環境、立体構造、物性の関係で定まると考え、それらの適切な選択や設計を行う。環境と立体構造の関係に着目してモノの動きを事前に設計する先駆的事例として、多面体表面の起伏の設計により、坂道という環境で、意図した軌道上で転がる物体の研究がある⁵⁾。これに対し筆者らは、環境として水に興味があり、水環境上で、モノの立体構造の工夫とその表面の物性の影響も設計に取り入れることで、モ

* 責任著者, Corresponding author
早稲田大学 西早稲田キャンパス
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1
Waseda University
3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

ノの自律的な動きを設計することを目指す。

水環境において立体形状と物性を活用して移動機構を実現する先行事例には、疎水性を利用して水面と関係を作るもの^{6,7)}、マランゴニ現象を用いて動力を発生させるもの^{8,9)}、気泡を動かした反作用によって動力を得るもの¹⁰⁾などがあるが、これらは電気入力による撥水性の制御、あるいはより高度な素材の加工や形状設計を必要とする。

一方、自然物の中には単純な仕組みで水上において特異な動きを実現しているものもあり、本研究では特にスイレンの葉の形状特性に着目する。スイレンの葉には切れ込みがあり、水位の上昇に応じて円錐形に変形することで根への負担を軽減している¹¹⁾。観察の結果、水位の上昇時には葉が切れ込みから水を受け入れ、かつ排出することで上下と水平方向に動き続けていることが確認できた。この現象に着想を得て、地面との接続がない器状の立体に水が入り出せる穴を設け、その数や位置を変えることで、水環境において水の受け入れと排水を起こし、自律的に動くモノが設計できると考えた。一方で、その動きは排水によって起こるため、排水の流速が弱いと推進力も小さくなり、立体の動きが視認しにくくなる。そこで立体表面に超撥水加工を施すことで表面の摩擦が減り、排水の流速を上げ、より大きな動きを発生させるようにする。これにより、本研究では、汎用 3D プリンターでの立体造形と市販のコーティング剤のみによって肉眼で十分に観察できる程度の動きを実現する。

以上、立体構造の設計と超撥水加工によって、水環境において任意の水の入力があると、立体に水の受け入れと強い排水が発生し、それを動力として狙った動きを自律的にする設計手法を提案する。

2. 関連研究

2.1 立体形状と物性を活用した水環境での動き設計

立体形状と物性を活用した水環境での移動機構には、疎水性を利用して水面と関係を作るもの、マランゴニ現象を用いて動力を発生させるもの、気泡を動かした反作用によって動力を得るものなどがある。

疎水性を活用した水上移動機構の設計には、アメンボなどの水生生物の移動原理を参考にした撥水性を持つ脚によって水面を押し進むもの⁶⁾や、撥水性を電気制御によって変化させることで水上から水中への移動をシームレスに行う設計⁷⁾をするものが挙げられる。これらは電気入力によって疎水性のある部位を動かす、あるいは疎水性自体を制御することで水環境での特定の動きパターンを定義している。これに対し本研究では、電気制御を用いることのない環境とのインタラクション方法を設計し、動きを定義する。

マランゴニ現象を利用した動きの設計手法には、界面活性剤を部分的に塗布して推進力を発生させる研究⁸⁾や、ハイドロゲルの特性と形状を活用して動作を設計する研究⁹⁾がある。これらの手法では、水上の物体の特定部分に推進力を発生させ、その方向と組み合わせによって動きのパターンを定義するため、設計者の意図した動きを自律的に実現できる。しかし界面活性剤を用いる手法は動作ごとに操作が必要で、ハイドロゲルを用いる手法は素材の加工や形状設計に高度な技術を要する。これ

らに対し本研究では、専門的な技術を必要としない簡易な手法を提案する。具体的には、立体形状自体で推進力を発生させ、それを組み合わせることで動きのパターンを制御する方法を示す。

また、濡れ性勾配を施した物体に動力を発生させる研究¹⁰⁾では、濡れ性勾配を施した水中の水平面では濡れ性の高い方に気泡が移動することを利用し、その反作用として水上の物体が推進力を得る機構を提案している。しかしこの手法では微小な直進運動のみしか実現できていない。本研究では、水上の物体から水環境への排出を動力とする手法を取り入れ、物体自体が水を貯めこみ、のちに排水を起こすことで動力を得る手法を提案する。それにより先行研究とは異なり、直進以外の動きを定義し、それらの組み合わせにより動きの時間変化を可能にする。

2.2 自然界の水環境における動きの発生とその模倣

水環境において特異な動きを実現している例として、スイレンの葉があげられる。スイレンの葉は円形に何か所の切れ込みがある形状をしており、水位の上昇時に円錐形の変形を可能にしている。それによりスイレンは成長を有利に行うことができる¹¹⁾。また、スイレンの葉の切れ込みは水流の影響を減らす効果があることが知られており、それを水中ロボット工学に応用する研究¹²⁾がある。これらのようにスイレンの葉の形状は水環境での植物や人工物の安定性に対して有効であることが示されているが、一方で、スイレンの様子を観察すると、その葉が切れ込みから水を受け入れ、かつ排出することで上下と水平方向に動き続けていることが確認できた。本研究ではこの現象に着想を得て、根のように地面との接続がない器状の立体に切り込みを入れ、その大きさ、位置、数を変えることで、水環境において水の受け入れと排水を起こし、自律的に動くモノが設計できると考えた。先行研究らに対して本研究は、スイレンの葉の構造をより自由な動きのために活用するという点で異なる。

3. 提案と設計

3.1 提案

本研究では、汎用 3D プリンターを用いた PLA (Poly-Lactic Acid) 樹脂による立体造形と市販の超撥水コーティング剤のみによって肉眼で十分に観察できる程度の動きを水環境で実現する。スイレンの葉の構造から着想を得た立体構造の設計と、それによる動きの発生を増強するための超撥水加工によって、立体に水の受け入れと強い排水を発生させ、それを動力として狙った動きを自律的にする設計手法 Hydro-Triggered Moto Printing を提案し、それによって出来上がった立体を Moto-printed Boat と呼ぶ。

水を一時的に貯め込むことができ、かつ壁面に穴が開いていて排水も行える器型の立体を設計すると、その立体内に水が入ったのち穴から排水が起きる際にその反作用で立体が動力を得る機構がつかれる。本研究では、その機構をつくり、立体の概形 (Overall shape of the solid)、容器内底面積と高さの積である立体容積 (Bottom area × Height of the internal volume)、穴の横幅と高さ (Hole width, Hole height)、穴の位置 (Hole position)、穴の下底の高さ (容器内底面から穴の下底までの高さ) (Height of the lower edge of the hole)、表面の疎水性 (Surface hydrophobicity)、それら複数の組み合わせ設計によ

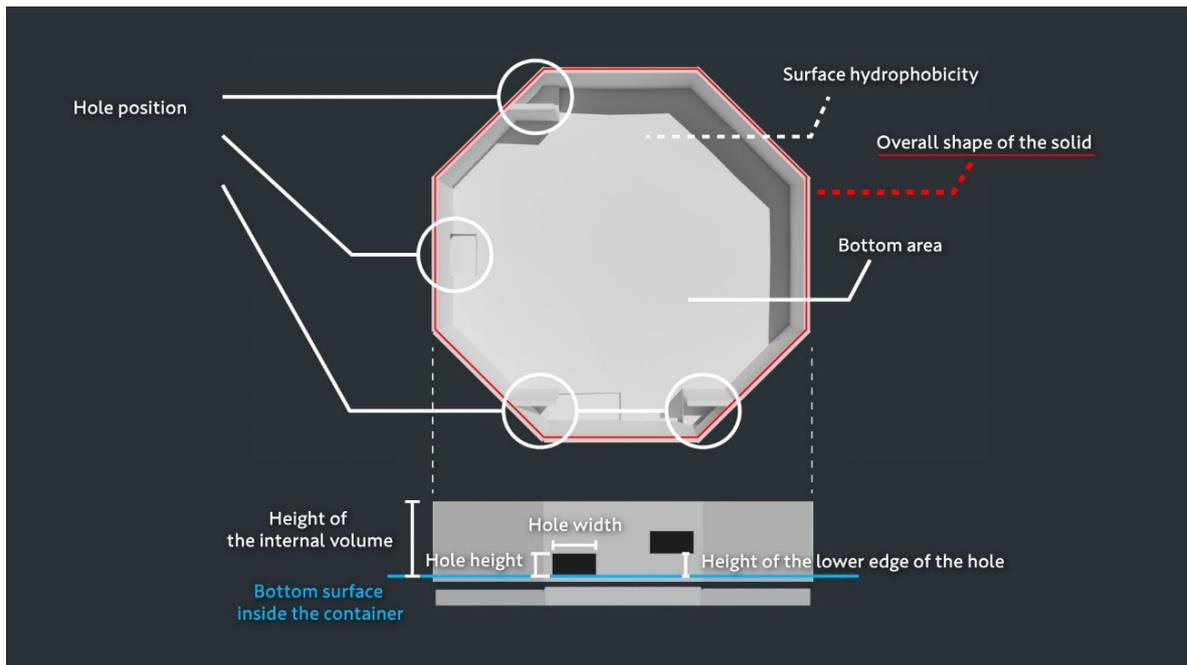


Fig. 1 Overview of parameters affecting Moto-printed Boat.

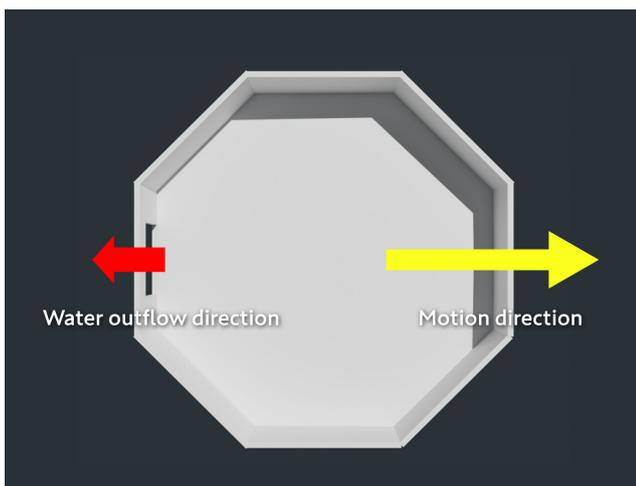


Fig. 2 Basic structure utilizing outflow for motion.

って狙った動きの実現をする (Fig. 1).

3.2 推進力発生原理

穴1つあたりから発生する推進力は、排水の流速と流量によって決まるため、立体の容積、立体表面の疎水性、穴の横幅と高さによって変化する。

排水を利用した最も簡単な構造は Fig. 2 のような、水を取り入れられる容器状の立体の壁面に穴を開けた形状によって実現出来る。この立体に水を充填させると、Fig. 2 の赤矢印で示す方向に穴から外に水が流れ、その反作用によって立体自体が排水の反対方向へ推進力を得る。本研究ではこの現象を最も基本的な動きの発生原理とし、水環境における立体の自律的な動きを設計する。また、立体の概形は、後述する排水の設計のため対称性の良い形が望ましく、以降の説明は簡単のため八角形

で図示する。

3.3 基本動作の定義と組み合わせの提案

立体に複数の穴を設けると、穴からの排水が立体の推進力を生むため、動きのパターンは穴の位置関係によって設計することができる。時間経過における動きのパターンの変化は穴の下底の高さの関係によって設計することができる。Figure 3 に排水による動きのパターンの設計を示す。

提案手法の最も単純な動きは「直進 (Straight motion)」である。Figure 3 (a) に示す通り、複数の穴から生まれる推進力の合力の作用線が立体の重心を通る場合、立体は直進する。排水は容器が空になるまで続き、その間立体は排水方向と反対方向に進み続ける。

次に、Fig. 3 (b) に示す通り、推進力の作用線が立体の重心に対して点対称な形になるよう穴の位置を変えることで、「回転 (Rotation)」方向の力を生むことができる。排水は容器が空になるまで続き、その間立体は排水方向と反対の回転方向に回り続ける。

加えて Fig. 3 (c) に示す通り、反対方向の排水を同時に行うことで「打消し (Cancellation)」の動きを実現できる。二つの同じ大きさの穴が推進力を打ち消し合うような向かい合いの位置にある場合、排水時でも立体はその場に留まることになる。

また、穴の下底までの高さが容器底面より高い場合、時間経過によって排水が進んで水位が下がり、容器内の水面が穴の下底を下回ると、その穴からは水が流れ出なくなる。したがって Fig. 3 (d) に示すように穴の下底の高さを変えることで、動きのパターンの時間変化を表現できる。Figure 3 (d) の側面図 (Fig. 4) に示すように、打ち消しの位置関係にある穴のうち、片方の下底が一方よりも高い場合、しばらくすると立体内の水位が下がり、高い位置にある穴から排水がなくなることで打消しが消え、低い方にある穴からの排水のみによって立体は動き

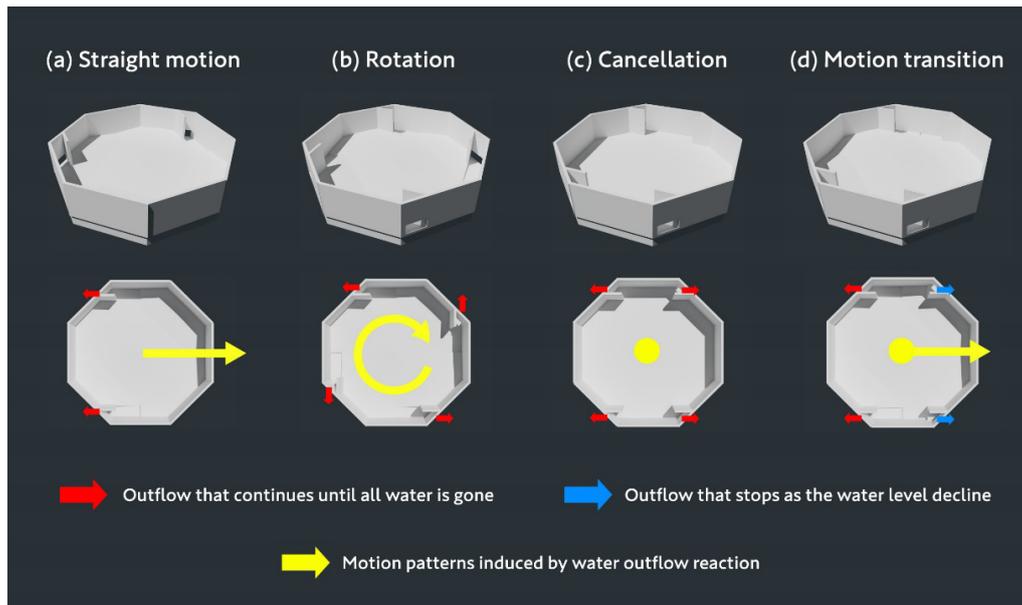


Fig. 3 Motion patterns designed by outflow configuration.

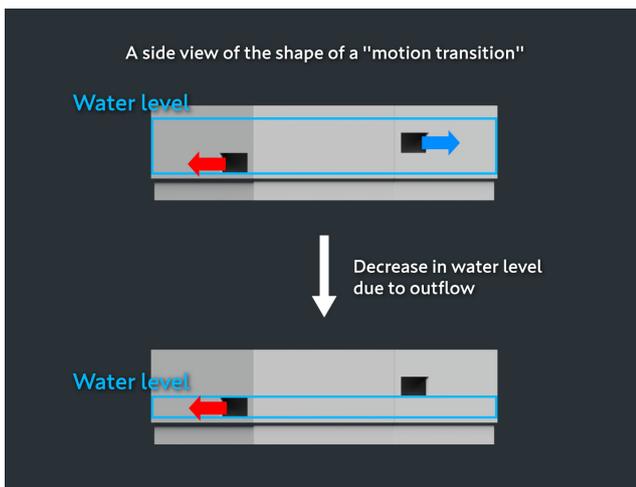


Fig. 4 Outflow stops as water level decreases.

始める。この「動きのパターンの時間変化 (Motion transition)」を直進や回転と組み合わせることで、複雑な動きを表現することができる。

3.4 超撥水加工の導入

意図的な動きを設計するうえで、容器内の水が余さず排水されることが重要である。さらに、動きを大きくするためには、排水の流速が速く、水環境からの抵抗が小さいことが望ましい。これらの条件を満たすために、本研究では造形した立体の表面全体に一様な超撥水加工を施す。立体表面に水滴を置きデジタル顕微鏡で撮影後、接触角を測ったところ、PLA 樹脂で印刷した立体の接触角は実測値で約 45° だったが、超撥水加工を施すことで $160^\circ \sim 170^\circ$ に向上することを確認した。

4. Moto-printed Boat の実装

4.1 Moto-printed Boat のパラメータ設計

穴 1 つあたりから発生する推進力は、排水の流速と流量によって決まり、これは立体の容積、立体表面の疎水性、穴の横幅と高さによって変化する。したがって、動きのパターンと大きさに関するパラメータは、立体底面の形状、底面積、容器内部の高さ、それぞれの穴の横幅と高さ、穴の下底までの高さ、表面の疎水性である。本研究では動きのパターン設計を目標としており、今回は簡単のためこれらのパラメータのうち、立体の概形、立体容積、穴の横幅と高さ、表面の疎水性を固定し、動きのパターンとその時間変化の設計に重要な穴の位置と下底の高さ、およびそれらの組み合わせを変えることで実装する。

立体の概形は正八角形とし、容器の寸法は縦横 100.0 mm、高さ 30.0 mm、容器内側の高さを 20.0 mm とした。穴の位置は各辺の midpoint と各頂点を候補とする。それぞれの穴の候補位置に対して、最後まで排水が起こる穴、途中で排水が止まる穴、穴を開けない状態のいずれかを定める。穴の横幅は 12.0 mm、高さ 8.0 mm で固定し、最後まで排水が起こる穴は下底の高さが 0.0 mm、途中で排水が止まる穴は下底の高さが 8.0 mm とした。

また、排水の方向を整えるため、容器内側に長さ 10.0 mm の壁を設け、途中で排水が止まる穴に対して排水を促すための床の長さも同様に 10.0 mm とした。容器の壁と内側の壁の厚さはどちらも 1.5 mm とし、さらに、容器内底面が水上に浮か上がるよう、高さ 6.5 mm の空気層を設定した。容器外寸を基に計算すると、推進力に関わる、水が充填される内容積は $1.66 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 、浮力に関わる外容積は $2.75 \times 10^5 \text{ mm}^3$ である。

以下では、これらの組み合わせによって水上での「直進」「回転」「打消し」の動きと、それらを組み合わせることによる「動きのパターンの時間変化」を用いた複雑な動きを実現する

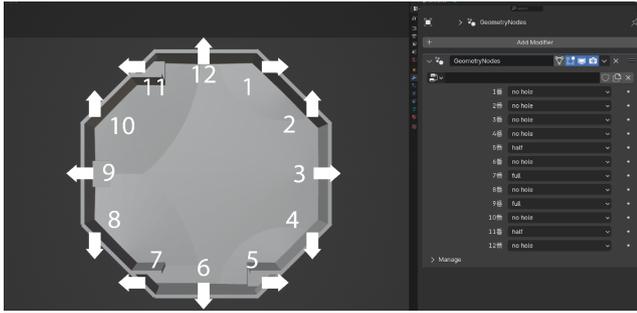


Fig. 5 Customizable 3D modeling system for designing outflow patterns.

ための実装手法の詳細について述べる。

4.2 立体造形システム

立体の造形では、まず設計者が実現したい動きを構想し、その動きに必要な穴の位置、穴の下底の高さを決定する。各動きの検討のため、正八角形状の立体の各頂点と各辺それぞれに穴を開ける可能性がある。そのためそれぞれの穴のサイズや位置、高さをカスタマイズしやすくしておくことが望ましい。これを実現するために、3DモデリングソフトウェアであるBlenderを用いて、専用の造形システムを作成した。これにより、Fig. 5に示すように、それぞれの穴の候補位置に対して穴を開けないか、容器内から水がすべて流れ出るまで排水が起こる穴を開けるか、途中で排水が止まる穴を開けるかのいずれかを設計者が指定することで、任意の印刷用3Dデータをモデリングすることが可能となった。

4.3 構成

立体は浮力によって水に浮くことが要件であるため、比重1.25のPLA樹脂を充填密度5%で3Dプリントして作成する。

その後、接触角が理想値160°~170°の2層式シリカ系コーティング剤であるUltratech international Inc製Ultra-Ever Dry®を立体全面に塗布して超撥水加工を行う。水環境は、底寸325mm×220mmのステンレスパットに水深約50mmの水を張ったものを用いる。水の入力立体を一度手で水に沈めることで行い、水面に対して平行な状態で静かに手を離すことで動きが発生する。

4.4 動きパターンの実装

立体造形システムを用いて制作した、「直進 (Straight motion)」、「回転 (Rotation)」、「打消し (Cancellation)」による動きのパターンの時間変化を組み合わせた「時間を空けてからの直進 (Delayed straight motion)」、「時間を空けてからの回転 (Delayed rotation)」, それらの応用による「蛇行 (Zig-zag)」の動きを可能にする立体形状と、その実装結果を説明する。また、以降、立体に開ける穴の位置は分かりやすさのためFig. 6に示した番号を具体的に指定するが、立体の概形に対して対称的な位置関係の穴の組み合わせであれば、後述する番号指定に限らずとも全く同じ形状の立体を印刷できる。

7番と11番の位置に最後まで排水が行われる高さの穴を設け、2つの頂点から線対称で平行に排水を行う形を設計した [Fig. 6(a)]. それを印刷した立体 [Fig. 6(b)] を手で水に水

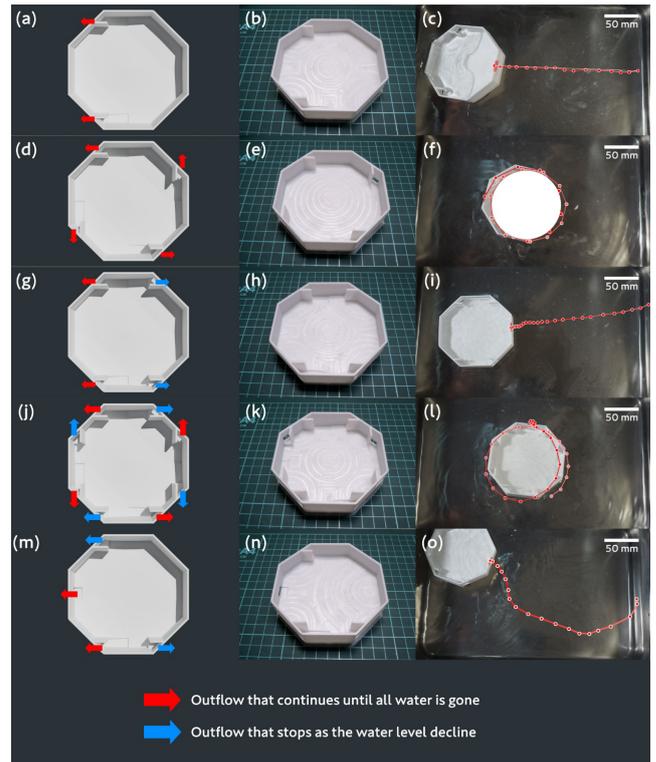


Fig. 6 Motion design, fabricated model, and its movement.

平に沈め、静かに手を離れたところ、立体は直進した [Fig. 6(c)]. 以降、移動の様子の図示は、手を離れた時点から立体内の水がなくなるまでの軌道を上方から撮影したのち、立体側面のうち一辺の midpoint につけた赤マーカーの位置を1/6sごとに点でプロットし、直線でつないだものである。

次に、2, 5, 8, 11番の位置に最後まで排水が行われる高さの穴を設け、4つの頂点から点対称で風車状に排水を行う形を設計した [Fig. 6(d)]. それを印刷した立体 [Fig. 6(e)] で「回転」を表現できることを確認した [Fig. 6(f)].

また、直進の形状に加え、1, 5番の位置に途中で排水が止まる穴を設け、各穴の推進力を打ち消すように設計した [Fig. 6(g)]. それを印刷した立体 [Fig. 6(h)] で排水開始より少し時間を空けてから直進する動きを表現できることを確認した [Fig. 6(i)].

同様に回転の形状に加え、1, 4, 7, 10番の位置に途中で排水が止まる穴を設け、各穴の推進力を打ち消すように設計した [Fig. 6(j)]. それを印刷した立体 [Fig. 6(k)] により排水開始より少し時間を空けてから回転する動きを表現できることを確認した [Fig. 6(l)].

最後にこれらの応用として、7, 9番の位置に最後まで排水が行われる穴、5, 11番の位置に途中で排水が止まる穴を設け、動きが途中で切り替わるように設計した [Fig. 6(m)]. それを印刷した立体 [Fig. 6(n)] により、9番による直進、11番による途中でなくなる右回転、7番と5番の組み合わせによる途中から始まる左回転が重なり、右に曲がりながら進んだのち、左に曲がりながら進む蛇行の動きを表現できることを確認した [Fig. 6(o)].

Table 1 Dimensions, inner and outer volumes, and weight of each Moto-printed boat. Both inner and outer volumes were calculated based on the external dimensions of the container.

Shape (Motion Pattern)	Inner Volume (mm ³)	Outer Volume (mm ³)	Weight (g)
Straight motion	1.66 × 10 ⁵	2.75 × 10 ⁵	36.8
Rotation	1.66 × 10 ⁵	2.75 × 10 ⁵	36.6
Delayed straight motion	1.65 × 10 ⁵	2.75 × 10 ⁵	36.8
Delayed rotation	1.64 × 10 ⁵	2.75 × 10 ⁵	38.6
Zigzag	1.65 × 10 ⁵	2.75 × 10 ⁵	37.1

5. 動作実験

5.1 実験概要

提案した立体が安定して動作するか、および立体表面の超撥水特性が動きの設計に与える効果について明らかにするため、直進、回転、時間を空けてからの直進と回転、蛇行を行うことを想定した5つの立体それぞれに対し、超撥水加工をしない条件（以下、未加工）と立体全面に超撥水加工した条件（以下、超撥水加工）で水入力を行った際の動きを観察し、比較した。

立体の寸法はすべて4.1で述べた通りで、それぞれの重さはTable 1に示す。穴の構成の違いによって各立体の重さには差が生じ、動きに影響を及ぼす可能性があることから、重さを併せて記録した。また、前述のとおり、PLA樹脂で印刷した立体の接触角は実測値で約45°、超撥水加工後で160°~170°である。水環境は同じ形状に対して底寸325 mm × 220 mmのステンレスパットに水深約50 mmの水を張ったものを用いる。水の入力は立体を一度手で水に沈めることで行い、水面に対して平行な状態で静かに手を離すことで動きが発生する。また、いずれの実験においても、入力時や動作中に立体が動くことで、水環境そのものに揺らぎが生じ、それが立体の傾きを引き起こし、排水のタイミングや流量に影響を与える可能性がある。加えて、このような水の揺らぎが立体を押し流すことも、設計された動きの軌道を乱す要因になると考えられる。この水の揺らぎの影響をデータ上和らげる平準化するため、各実験では同一条件下で10回の試行を行い、動作を確認した。動作の様子を取得するため、実験装置を上方から撮影し、赤マーカーの位置を1/6 sごとに点でプロットした画像を作成した。次に、それぞれの動きのパターンごとに「安定した動作」の定義を設け、作成したプロット画像を用いて動きの安定性を評価した。

「直進」については、始点と終点を結んだ線分に対し、すべてのプロット点とその線分から10.0 mm以下の距離内に収まる場合を安定した動作と定義した。

「回転」については、立体中心を軌道の中心とし、マーカー位置である50.0 mmの長さを理想的な円軌道の半径と定めた。軌道の中心は立体の軌道一周ごとに更新し、すべてのプロット点とその円軌道から10.0 m以下の距離内に収まる場合を安定した動作と定義した。

「時間を空けてからの直進」「時間を空けてからの回転」では、容器内の水位が下がり、排水が途中で止まる穴から水が流れなくなった時点前後での動きを観察した。前半では静止していることを理想としているため、すべてのプロット点が初期位

置から10.0 mm以下の範囲内に収まっている場合を安定とした。後半では通常の「直進」「回転」と同じ方法で評価を行った。

一方で「蛇行」については、立体が前進しながら回転を行い、その回転方向が途中で逆方向へ切り替わることを理想の動作としている。したがって、容器内の水位が下がり、排水が途中で止まる穴から水が流れなくなった時点前後で、動きの回転方向が明確に切り替わった場合を安定した動作と定義した。なお、この評価はプロット点を目視で確認する方法によって行った。

5.2 結果と考察

5.2.1 「直進」の実験結果と考察

「直進」について、未加工では10回中10回とも安定しなかった。いずれの場合も初速が乏しく、少しの水の揺らぎの影響を大きく受け、左右対称にある穴から等量の排水が行われずに左右どちらかへの回転のような運動を引き起こした。超撥水加工では10回中10回とも安定した動作を確認できた。なお、超撥水加工での平均速度は89.6 mm/sであった。

5.2.2 「回転」の実験結果と考察

「回転」について、未加工で10回中10回とも安定した動作を確認できた。超撥水加工でも10回すべてにおいて安定した動作を確認できた。なお、立体の平均角速度は未加工で123.1 deg/s、超撥水加工で194.6 deg/sであった。未加工と超撥水加工での角速度の違いは、立体表面の濡れ性が低い超撥水加工の方が排水の速度が速くなることが要因であると考えられる。

5.2.3 「時間を空けてからの直進」の実験結果と考察

「時間を空けてからの直進」について、未加工では「直進」同様に10回中10回すべての場合において前半の静止、後半の直進ともに安定しなかった。いずれの場合も初速が乏しく、水の揺らぎの影響を大きく受けたことで、左右対称にある穴からの排水量に偏りが生じ、左右どちらかへの回転が発生したと考えられる。

一方、超撥水加工では10回中10回すべてにおいて、前半の静止は安定せず、後半の直進は安定した動作を確認できた。後半の直進における平均速度は85.0 mm/sであった。前半では静止ではなく、すべての試行で緩やかな直進が生じ、その際の平均速度は24.6 mm/sであった。前半の直進は後半の直進と比べ、明らかに遅く、時間の経過によって動きが切り替わが発生したことが示唆される。

5.2.4 「時間を空けてからの回転」の実験結果と考察

「時間を空けてからの回転」について、未加工で10回中10回すべてにおいて、前半の静止と後半の回転ともに安定した動作を確認できた。超撥水加工でも10回すべてにおいて、前半

の静止と後半の回転ともに安定した動作を確認できた。後半の回転は、未加工で平均角速度 77.6 deg/s, 超撥水加工で平均角速度 127.83 deg/s の角速度で動作した。

5.2.5 「蛇行」の実験結果と考察

「蛇行」について、未加工では 10 回中 7 回は安定した動作を確認できた。超撥水加工では、10 回中 4 回で安定した動作を確認できた。

安定した動作回数という点では未加工の方が安定しているという結果が得られた。一方で失敗した試行を比較すると、未加工においては、失敗した 3 回は前後半ともに意図した軌道から逸脱し、かつそれぞれ異なる挙動を示した。超撥水加工においては、失敗した 6 回はいずれも前半の動きが確認できなかった場合であったが、後半では意図した回転方向に動いた。

すなわち、蛇行のようなそれぞれの穴が独立した役割を持つ場合、未加工の方が安定した挙動を実現しやすいが、超撥水加工の方が大きく外れた挙動が起きにくいことが示唆される。この違いは、濡れ性に起因する排水速度の違いによるものだと考えられる。未加工では排水速度が遅いため前半の動きと後半の動きが混在しやすく、結果として前後半ともに設計意図から外れた挙動となることがある。一方、超撥水加工では排水速度が速いため前半の動きが十分に現れず、後半の動きのみが顕在化したものと考えられる。

なお目視によるプロット点の確認では、立体の速度は、動きの前半、切り替わり直後、後半でそれぞれ異なる挙動を示しているように見られた。

6. 展 開

本研究で提案する水上での動きの発生手法をさらに拡張するための展開について述べる。Hydro-Triggered Moto Printing は、専門性の高い手法を用いずに、水上での動きの発生原理を定義したのち、その組み合わせによって多様な動きを実現するものがある。5 節では立体の概形、水入力的手法を固定して動きの検証を行ったが、動きの設計システムをより自由度の高いものにするため、発展的な取り組みとして穴の組み合わせ設計をより簡便にするモジュールアイデア、水入力を上から行う手法、水溶性紙を組み合わせる手法を提案・検証し、多様な動きの設計可能性について検証する。

6.1 複数の立体モジュールを繋げることによる動きの設計

これまでは一つの立体に対して複数の穴を開けることで動きの設計を行ったが、これは概形と穴の候補位置が限定されるため、穴の組み合わせのバリエーションが少ない。そこで本節では複数の立体をモジュールとして扱い、接続することで、立体全体の動きを設計する展開を提案する。具体的には、同じ形状の立体 4 つをモジュールとし、それらの接続位置を変えるだけで基本動作である「直進」「回転」「打消し」が実装できることを示す。

モジュールは 1 つの辺の midpoint に横幅 12.0 mm, 高さ 8.0 mm の穴を設けた、縦横 50.0 mm, 高さ 30.0 mm, 容器内側の高さを 20.0 mm の概形正八角形の立体とした。

まず、これらを Fig. 7(a) のように組み合わせることで直進の動きを設計する。同じ PLA 樹脂で作成したピンを用いて 4

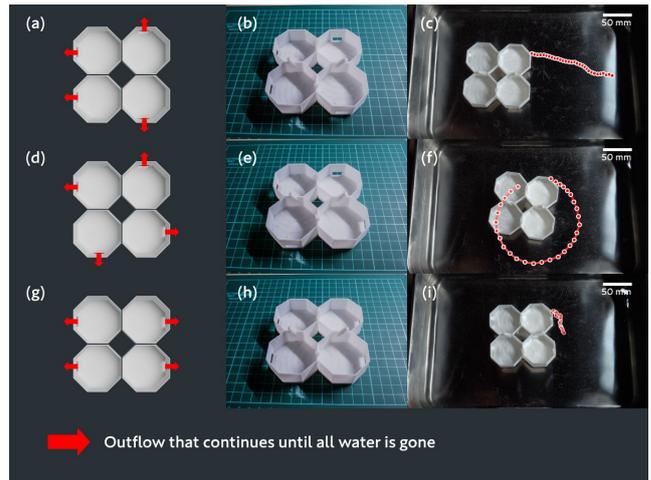


Fig. 7 Motion design, fabricated model, and its movement using a module design system.

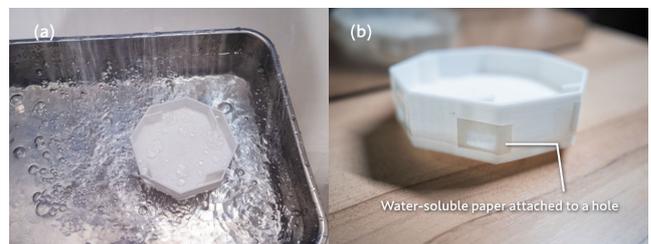


Fig. 8 Water input from the top of the structure and combination with water-soluble paper.

つのモジュールを接続し [Fig. 7(b)], 手で水に沈め、静かに手を放すことで動作を開始させたところ、立体全体は直進した [Fig. 7(c)].

次に、Fig. 7(d) のように組み合わせることで回転の動きを設計する。実際に組み合わせたもの [Fig. 7(e)] を動作させると、立体全体は回転した [Fig. 7(f)].

また、Fig. 7(g) のように組み合わせることで打消しによる動かない状態を設計する。実際に組み合わせたもの [Fig. 7(h)] を動作させると、立体全体はその場に留まった状態で排水をした [Fig. 7(i)]. ただし容器内の水が少なく動作終了では、各モジュールからの排水量が偏り、わずかな回転や直進の動きを見せた。

6.2 水の入力と排水手法の拡張

実装では立体を手で水中に沈めることを入力としたが、原理上、容器内に水が充填していれば手で沈める行為がなくとも同様の動きを見せることができる。回転する立体を水に浮かべ、上からシャワーを当て続けたところ、立体は時計回りに回転し続けた [Fig. 8(a)].

また、上から水を入力する場合、水が容器内に入ると同時に外へ流れ出てしまうため「打消し」を活用することができない。上からの水入力での打消しを行うためには、立体内に水が充填するまでは穴からの排水が起きず、水の充填後、自ら排水が始まる必要がある。電気制御を用いずにこれを実現するため、

Unmaking¹³⁾や Degrade to Function¹⁴⁾として知られている、物性の劣化や破損といった時間変化の現象を機構として活用する手法を組み合わせる。

具体的には水溶紙を用い、水の入力開始から排水が始まるまでの時間を確保する。水溶紙は Youkou-Planning 社製の市販のシークレットエコペーパーを用いた。最も複雑な組み合わせである「蛇行」を行う立体の各穴に対し、セロハンテープを用いて外側から水溶紙を貼り付けた [Fig. 8(b)]. その後、立体を水上に浮かべ、上から水を注いだところ、立体は約 4 s 排水を起さず水を貯め、その後水溶紙が破れると同時に立体は自走を始めた。

7. ま と め

本研究では物体表面の超撥水現象とその立体形状設計によって、動かすモノ自体に一度水を貯めた後その排水を動力として動きを設計する新たな手法を提案した。基本動作として、直進、回転、動きの打消しを実装し、それらの組み合わせによって直進、回転、動作開始後に時間を空けてからの直進、時間を空けてからの回転、複雑な動きである蛇行を設計した。また、立体表面の疎水性が動きに与える影響については、疎水性が低いほど動作しやすいものと、疎水性が高いほど動作しやすいものがあることが分かった。加えて応用として、上からの水入力による動作の確認と、水溶性の紙を組み合わせることで実現した排水タイミングの遅延動作を実装した。

一方で、本研究にはいくつかの課題が残されている。まず、水の揺らぎによる立体の動きの不確実性があげられる。入力時や動作中に立体が動くことで、水環境そのものに揺らぎが生じ、設計された動きの軌道を乱す要因になると考えられる。なお、立体の動きに対する水の揺らぎの影響について、その寄与の程度を本研究では定量的に評価できていないため、今後の課題とする。次に、「蛇行」の運動において、立体の回転方向の変化を十分に定量評価できていないことがあげられる。今後は曲率変化や角運動量の変化などを用いた定量的指標の導入が課題であると考えられる。また、水が排出されきる動作後半になると立体内の水が偏り、容器自体が傾くことで、すべての穴から同量の水が流れ出なくなってしまう、動きが不正確になる場合がある。これは装置全体を拡大することで相対的に水の揺らぎの影響を減らすことができると考えられる。あるいは正確な動作を目指すのではなく、おおよその動きの傾向が発生すれば良いようなアプリケーションの設計が必要になると考えられる。

展望としては、表面の疎水性もパラメータに含めることで、より安定した状態で多様な動きを設計できると考えられる。または、3D プリンターで一般的に用いられる樹脂以外の素材での実装が挙げられる。本研究の設計は立体構造と超撥水特性によるものであるため、表面を疎水性に加工でき、かつ水上に浮かぶ素材であれば、折り紙や木、金属などによる造形でも同様の結果が得られると考えられる。また、立体形状についても、複数の立体の組み合わせによって印刷後に動きを設計できるようなモジュールシステムの設計が考えられる。加えて立体の上から水を入力する手法でも動きを発生させることができるため、

雨や海の波など、自然の水環境を入力とする活用方法も検討できると考えられる。

なお本文および図表中に記載の社名、システム名、および製品名は各社の商標または登録商標である。

参 考 文 献

- 1) Fei Zhai, Yiyu Feng, Zeyu Li, Yuxin Xie, Jing Ge, Hui Wang, Wei Qiu, and Wei Feng, "4D-printed untethered self-propelling soft robot with tactile perception: Rolling, racing, and exploring," *Matter*, **4**(10), pp. 3313-3326 (2021), doi:10.1016/j.matt.2021.08.014.
- 2) Martin Nisser, Yashaswini Makaram, Faraz Faruqi, Ryo Suzuki, and Stefanie Mueller, "Selective Self-Assembly using Re-Programmable Magnetic Pixels," arXiv preprint, arXiv:2208.03799 (2022), doi:10.48550/arXiv.2208.03799.
- 3) Hiroki Kobayashi, Farzad Gholami, S. M. Montgomery, Masato Tanaka, Linyue Yue, Chiyu Yuhn, Yuki Sato, Akihiro Kawamoto, H. Jerry Qi, and Tsuyoshi Nomura, "Computational synthesis of locomotive soft robots by topology optimization," *Science Advances*, **10**(30), eadn6129 (2024), doi:10.1126/sciadv.adn6129.
- 4) Danli Luo, Aditi Maheshwari, Andreea Danielescu, Hojun Lim, Benedikt J. Stadler, Jeong-Yun Sun, Lining Yao, "Autonomous self-burying seed carriers for aerial seeding," *Nature*, **614**(7948), pp. 463-470 (2023), doi:10.1038/s41586-022-05656-3.
- 5) Yuri I. Sobleev, Ruojie Dong, Tsvi Tlusty, Jean-Pierre Eckmann, Steve Granick, Bartosz A. Grzybowski, "Solid-body trajectoids shaped to roll along desired pathways," *Nature*, **620**(7973), pp. 310-315 (2023), doi:10.1038/s41586-023-06306-y.
- 6) Dominic Vella, "Floating Versus Sinking," *Annual Review of Fluid Mechanics*, **47**, pp. 115-135 (2015), doi:10.1146/annurev-fluid-010814-014627.
- 7) Yufeng Chen, Neel Doshi, Benjamin Goldberg, Sangbae Kim, "Controllable water surface to underwater transition through electrowetting," *Nature Communications*, **9**(1), p. 2495 (2018), doi:10.1038/s41467-018-04855-9.
- 8) Lidong Zhang, Yihui Yuan, Xiaxin Qiu, Ting Zhang, Qing Chen, Xinhua Huang, "Marangoni Effect-Driven Motion of Miniature Robots," *Langmuir*, **33**(44), pp. 12609-12615 (2017), doi:10.1021/acs.langmuir.7b03270.
- 9) Hong Zhu, Borui Xu, Yang Wang, Xiaoxia Pan, Zehua Qu, and Yongfeng Mei, "Self-powered locomotion of a hydrogel water strider," *Science Robotics*, **6**(53), eabe7925 (2021), doi:10.1126/scirobotics.abe7925.
- 10) Yoshio Mita, Takayuki Sakata, Koji Nishikawa, and Yukihiko Matsumoto, "Wireless driven EWOD technology for a MEMS pond skater," ESSDERC 2008 - 38th European Solid-State Device Research Conference, Edinburgh, UK, pp. 306-309 (2008), doi:10.1109/ESSDERC.2008.4681759.
- 11) Fan Xu, Chenbo Fu, and Yifan Yang, "Water Affects Morphogenesis of Growing Aquatic Plant Leaves," *Physical Review Letters*, **124**(3), 038003 (2020), doi:10.1103/PhysRevLett.124.038003.
- 12) Can Gao, Zhuoxing Liu, Tao Shen, Ziyang Cheng, Yifan Wang, and Jianping Zhao, "Water lily-inspired notch for passive stabilization of floating objects," *Device*, **2**(7), 100405 (2024), doi:10.1016/j.device.2024.100405.
- 13) Katherine W. Song and Eric Paulos, "Unmaking: Enabling and Celebrating the Creative Material of Failure, Destruction,

Decay, and Deformation,” Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21), Article 429, 12 pages, Yokohama, Japan (2021), doi:10.1145/3411764.3445529.

- 14) Qiuyu Lu, Semina Yi, Mengtian Gan, Jihong Huang, Xiao Zhang, Yue Yang, Chenyi Shen, and Lining Yao, “Degrade to Function: Towards Eco-friendly Morphing Devices that Function Through Programmed Sequential Degradation,” Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '24), Article **109**, 24 pages, Pittsburgh, PA, USA (2024), doi:10.1145/3654777.3676464.



安村 俊介

2022年早稲田大学基幹理工学部卒業。2024年早稲田大学大学院基幹理工学研究科修士課程修了。現在同大学院博士後期課程在学中。橋田朋子研究室所属。2024年4DFF2024 Award受賞。



橋田 朋子

2009年東京大学大学院学際情報学府博士課程単位取得退学。博士（学際情報学）。2013年より早稲田大学理工学術院基幹理工学部表現工学科専任講師，准教授を経て2021年同教授。メディア技術・表現の研究に従事。