ニッポン放送賞

外部環境に応じて自律的に推進制御可能な 螺旋状ハイドロゲルマイクロロボットの構築

> 慶應義塾大学大学院 総合デザイン工学専攻

吉田 光輝

1. 緒 言

生物の形態や構造、機能を模倣することで、新しい技術の開発やモノづくりに活かそうと する科学技術であるバイオミメティクス (生物模倣) が注目されている□□。その起源は古く、 レオナルド・ダ・ヴィンチは鳥類を観察しすることで飛行装置を実現しようとした。また、 1903年に世界で初めて航空機の飛行に成功したライト兄弟は、飛んでいる鳩の観察から着 想を得たとも言われている。その後も、絹糸を真似た合成繊維ナイロンやモルフォ蝶の羽の 構造色を模倣した発色デバイス、カワセミのくちばしを模した空気抵抗の少ない新幹線のデ ザインなど高分子化学や工学、光学など様々な分野で発展を遂げてきた^[2]。さらに、フォト リソグラフィなどのマイクロスケールの加工技術の勃興により、昆虫の歩行^[3]や飛翔^[4]を模 做した昆虫サイズのロボット (マイクロロボット) などロボティクスの発展にも寄与してい る。このように生体模倣技術は生物の機能だけでなく生物の形態や機構などにも及んでいる。 さらに、近年では、コラーゲンなどのハイドロゲルや心筋細胞などの生体組織を用いて、柔 軟性を有するクラゲ^[5]やエイ^[6]、拮抗筋構造^[7]を模したより生体に近いマイクロロボットの 研究も盛んに行われている。このような生体模倣型マイクロボットは、将来的に日常生活を 彩る新たな技術となるだけでなく^[8]、人工的に生命を再構築するための原理の創出や技術の 発展に繋がると考える。一方で、従来の生体模倣マイクロロボットは歩行や遊泳、飛翔といっ た一つの機能の模倣に注力しており、生命のように外部環境によって行動を制御するような 自律的なシステムを持つ生体模倣型マイクロロボットへの実装は達成されていない。そこで 本研究では、外部環境に応じた自律制御可能な生体模倣型マイクロロボットの構築を目指す。

2. 研究背景

2.1 螺旋状マイクロロボット

生体模倣型マイクロロボットの中でも、生体内などの微小環境下で駆動可能なマイクロロ ボットは、人の立ち入れない環境探査や人体内での診断・治療を行うデバイスへの応用に向 けて開発が盛んに行われている^{[9][10]}。我々は、生体内などの微小環境において、周囲の環 境をセンシングしながら自由に動き回るシステムとして、微生物や精子が持つ螺旋状の鞭毛 に着目した。自然界における多くの微生物にとって流体中を自由に動き回る機能は生存や栄 養などの確保に必要不可欠な機能である^[11](図1(a))。微生物などのマイクロ/ナノスケー ルの物体が流体中を運動する場合、寸法効果により強い粘性が働く。粘性力が支配する流体 中での効率的な推進を実現するために、微生物はタンパク質でできた特殊なモータで回転す る螺旋状の鞭毛(大腸菌の一種のE. Coliの鞭毛サイズ^[12]:直径~400nm、鞭毛長さ2-5µm)を発達させてきた。螺旋状鞭毛による動きは低レイノルズ数領域(Re<<1)において効 率的に微生物を推進させることが可能である。加えて、微生物は推進速度や遊泳方向などの 遊泳の運動性を螺旋状鞭毛の変形のみによって達成している^[13]。例えば、大腸菌の一種で ある E. coliの鞭毛はわずか数 pN の力で変形し^[14]、方向転換に要する鞭毛の変形時間はお よそ0.1秒ととても短い^[15]。つまり、微生物は螺旋状の鞭毛の変形による運動性の制御によっ て、誘引物質と忌避物質のいずれにも素早く反応し、目標地点までの遊泳を実現している。

このような螺旋状鞭毛の優れた遊泳メカニズムを模倣した螺旋状マイクロロボットは盛ん に研究されており、その構築方法として電着^{[16] [17]}や蒸着^[18]、レーザプリンティング^[19]が報 (a) 螺旋状鞭毛



図1. 本研究の概要。(a) 微生物の鞭毛による外部環境に応じた形態および遊泳の変化。 (b) 提案する螺旋状ハイドロゲルマイクロロボット。

告されている。しかしながら、先行研究の螺旋状マイクロロボットは外部より磁場を印加す ることで流体中を推進させるために、マイクロボットが金属で構築されているため、実際の 螺旋状鞭毛のように螺旋形状の柔軟な変形を行うことができない。そのため、マイクロボッ トには制御機構を持たず、推進速度や方向の制御は高度に制御された外部システムによって のみ行うことができる。加えて、外部から印加する磁場を局所的に制御することはできない ため、複数の螺旋状マイクロロボットの独立的な制御は不可能である。したがって、より生 体に近いシステムの実現やより高度な体内医療システムへの応用に向けて、外部環境をセン シングし、自律的に推進制御可能な螺旋状マイクロロボットの実現が求められる。

2.2 本研究の目的と意義

そこで本研究は、柔軟な螺旋状ボディを有するハイドロゲルマイクロロボットの構築およ び外部環境に応じた螺旋状ボディの変形による推進制御の実現を目的とする(図1(b))。提 案する螺旋状ハイドロゲルマイクロロボット(以下、螺旋状ゲルロボット)はハイドロゲルと 磁性ナノ粒子から構成される。外部から印加した回転磁場に追従して螺旋状ゲルロボットが 回転することで流体中をコークスクリューのように推進することができる。外部環境に応じ た螺旋状ボディの変形には刺激応答性ゲルを用いる。刺激応答性ゲルは温度^[20]や pH^[21]、 光^[22]、グルコース^[23]などの化学物質などに応答して、膨潤収縮する特性を有するハイドロ ゲルのことである。刺激応答性ゲルを螺旋状ゲルロボットの一部にパターンすることで、外 部環境に応じた螺旋状ボディの形状変化を実現する。最後に、螺旋状ボディの変形によって、 外部温度を検知して螺旋状ゲルロボットの推進速度を自律的に制御可能であることを実証す る。

3. 推進速度に関わる螺旋形状パラメータの導出

3.1 螺旋状ゲルロボットの推進速度の理論的解析

初めに螺旋状ゲルロボットの推進に関わる螺旋形状パラメータについて理論的に議論する (図2(a))。低レイノルズ数領域における螺旋状鞭毛を用いた推進モデルは Lighthil が提唱 した静止流体中を運動する鞭毛の円柱状の要素が受ける抗力を速度の接線成分と法線成分に 分けて考える Resistive force theory と呼ばれる理論をもとに検討する。この理論を元に螺 旋状ゲルロボットの1次元の推進モデルを考えると推進速度 *u* は、

$$u = \frac{-\frac{\pi D_{spiral}^2}{2} (\xi_{ll} - \xi_n) \cos \alpha}{\pi D_{spiral} \left(\frac{\xi_{ll} \cos^2 \alpha + \xi_n \sin^2 \alpha}{\sin \alpha}\right)} \omega.$$
(1)

となる。ここで、 D_{spiral} は螺旋直径、aはピッチ角、 ω は回転速度、 ξ_{ll} と ξ_{n} はそれぞれ螺旋状鞭毛の単位円柱要素の接線方向と垂直方向にかかる抗力係数であり、

$$\xi_{ll} = \frac{2\pi\eta}{\ln(\frac{0.36\pi}{\cos\alpha}I)}, \xi_n = \frac{4\pi\eta}{\ln\left(\frac{0.36\pi}{\cos\alpha}I\right) + 0.5},$$
(2)

と表される。ここで、Iはばね指数であり、 $I = D_{spiral}/D_{gel}$ である (D_{gel} はゲル直径)。式(1)を螺旋直径 D_{spiral} と回転速度 ω で無次元化すると、

$$u^* = \frac{u}{D_{spiral}\omega} = \frac{-(\xi_{ll} - \xi_n)\cos\alpha}{2\left(\frac{\xi_{ll}\cos^2\alpha + \xi_n\sin^2\alpha}{\sin\alpha}\right)} = f(I,\alpha).$$
(3)

となる。式(3)より無次元推進速度 u^* はばね指数Iとピッチ角aに依存することが分かる。 ピッチ角aを変化させた場合(ばね指数I = 3.5)、ピッチ角aの上昇に伴い無次元推進速度 u^* は上昇し、 $a = 43^\circ$ を境に減少する傾向が確認できる(図2(b))。一方で、ばね指数Iを2.8 から5の間で変化させた場合($a = 40^\circ$)、無次元推進速度 u^* は0.098-0.118とほとんど変化 しない(図2(c))。以上より、螺旋状ゲルロボットの無次元推進速度 u^* はピッチ角aに大き く依存すると言える。そのため、本研究では螺旋状ゲルロボットの推進制御に向けてピッチ 角aの制御を目指す。



図2. 推進速度の理論的解析。(a)推進速度に関する螺旋形状パラメータ。(b)無次元推 進速度とピッチ角の関係。(c)無次元推進速度とばね指数の関係。

3.2 ピッチ角の異なる螺旋状ゲルロボットの構築

次に、ピッチ角 a の異なる螺旋状ゲルロボットの無次元推進速度 u*を測定することで、3.1 で議論した理論が提案する螺旋状ゲルロボットにも適用可能であることを検証する。ピッチ 角の異なる螺旋状ハイドロゲルの構築には独自に考案した竹槍状先端を用いた非対称ゲル化 を用いる^{[24][25]}(図3(a))。非対称ゲル化手法とは、カルシウムイオンに反応して瞬時に架橋 するアルギン酸ナトリウム溶液を竹槍状先端から射出することで、竹槍状先端近傍で非対称 的にゲル化を行うことで連続的に螺旋状のハイドロゲルを構築する手法である。磁性ナノ粒 子(10.2%(w/w/)、粒子径~10nm)を分散させたアルギン酸ナトリウム溶液(2%(w/w))を 塩化カルシウム(CaCl₂)溶液(1M)に一定流量200 μ L/min で竹槍状先端(内径:300 μ m、先端 角度20°)から射出した(図3(b))。この時、浮力によって水面方向に力が加わることで、螺 旋状ゲルが水面方向に引かれながら構築される。この浮力を用いた非対称ゲル化手法により、 ピッチ角の異なる螺旋状ゲルロボット($a = 14 - 42^\circ$ 、平均ゲル直径 $D_{gel} = 476\mu$ m、平均螺 旋直径 $D_{spiral} = 1629\mu$ m)の構築に成功した(図3(c))。

3.3 螺旋状ゲルロボットの推進速度の測定

次に構築した螺旋状ゲルロボットの無次元推進速度 u^* の比較を行う。螺旋状ゲルロボットに2軸の直行ヘルムホルツコイルを用いて回転磁場を印加することで、回転推進を行った(図3(d))。螺旋状ゲルロボットの推進環境として粘性液体(1M CaCl₂ + 0.75g/mL スクロール溶液、粘性 $\eta = 12.6$ mPa s)を満たしたチャンバをヘルムホルツコイルの中央に設置した。回転磁場(10mT、5Hz)を螺旋状ゲルロボットに印加することで、粘性流体中の推進を実現



図3. 推進実験結果。(a) 竹槍状先端を用いた非対称ゲル化(b) ピッチ角の異なる螺旋状ゲルロ ボットの構築。(c) 異なるピッチ角を有する螺旋状ゲルロボット。(d) 推進実験セットアップの 概要。(e) 回転推進の様子。(f) ピッチ角と無次元推進速度の関係。

した (図3(e))。異なるピッチ角 $a(14-42^{\circ})$ を有する9種の螺旋状ゲルロボットの推進速度 u、回転速度 ω 、螺旋直径 D_{spiral} を測定し、式 (3)を用いて無次元推進速度 u^* を算出した。 算出した無次元推進速度 u^* はピッチ角 aの増加に伴い増加する傾向が見られた(最小値 0.026、最大値0.077、図3(f))。この増加傾向は推進速度理論(図2(b))の傾向と一致する。 この結果より、理論と同様にピッチ角 aによって推進速度が制御可能であることが明らかに なった。一方で、実験値と理論値を比較すると実験値の方が小さい結果となった。理由とし て、推進速度理論はレイノルズ数 Re=0の時にのみ完全に成り立つ理論であることが挙げ られる。また、螺旋状ゲルロボットの推進によって理論では考慮されていない慣性項が発生 することも原因の一つだと考えられる。

4. 刺激応答性ゲルを用いた螺旋状ハイドロゲルの変形

次に、刺激応答性ゲルを用いて外部環境をセンシングして自律的に螺旋形状を変化する機構の実現を目指す。刺激応答性ゲルとしてアルギン酸ナトリウム溶液と同様に Ca²⁺ で架橋 することができ、温度に応答する特性を持つ Poly (*N*-isopropyl acrylamide-co-acrylic acid) (p(NIPAM-co-AAc))を用いる^[26]。刺激応答性ゲルは等方的に収縮するため、螺旋状ゲル全体を刺激応答性ゲルで構築した場合、ピッチ角は変化せず螺旋状ゲル全体が等方的に収縮してしまう。そこで、刺激応答性ゲルの膨潤収縮による螺旋状ハイドロゲルのピッチ角変化を実現するために、螺旋状の微生物であるツリガネムシに着目した(図4(a))。ツリガネムシは螺旋状の体の内部にサルコメアと呼ばれる筋肉組織がパターンされており、その構造によって素早く大きな変位を実現している。ツリガネムシの螺旋形状の一部に筋肉がパターンされた構造を模倣し、刺激応答性ゲルと非応答性ゲルの二層構造を有する螺旋状ハイドロゲルの構築および螺旋形状の変形を行う(図4(b))。



図4. バイレイヤ刺激応答性螺旋状ゲル。(a)螺旋状の微生物の伸縮。(b) 二層状螺旋状ゲル。 (c) 有限要素法シミュレーションによる変形解析。(d) 垂直パターン螺旋状ゲルの変形。(e) 外 周パターン螺旋状ゲルの変形。(f) 二層状螺旋状ゲルの繰り返しのピッチ角変化。

はじめに、有限要素法シミュレーションを用いて刺激応答性ゲルのパターン角 θ と螺旋形状の変形の関係性を解析する。ゲル直径 $D_{gel} = 300 \mu m$ 、螺旋直径 $D_{spiral} = 1050 \mu m$ 、初期ピッチ角 $a_i = 20° \text{ cr} パターン角 \theta = 0°$ (内周パターン)、90° (垂直パターン)、180° (外周パターン)の3種類の螺旋状ゲルロボットのモデルを構築した。螺旋形状の変形の比較には、螺旋のピッチ間距離であるギャップ $G = (p - D_{gel})$ を用いた (図4(c))。変形前のギャップは304 μm だった (図4(c) 白線)。パターン角 $\theta = 0°$ と90°の場合、螺旋軸方向に大きく収縮し、螺旋形状が密に巻かれた状態まで変形することが確認できた (0° = $G = 36 \mu m$ 、90°: $G = 96 \mu m$ 、(図4(c) 赤線、緑線)。一方で、パターン角 $\theta = 180°$ の場合は、螺旋軸に対して大きく伸長した ($G = 2641 \mu m$ 、図4(c) 青線)。以上のシミュレーション結果より、刺激応答性ゲルを螺旋状ゲルにパターンすることで螺旋軸に対して大きな変形を実現できることが明らかになった。また、パターン角によって、変形挙動が変わることも明らかになった。

次に、二層状螺旋状ゲルを用いた変形の実証を行う。二層状螺旋状ゲルを作製するために マイクロ流体デバイスを用いて竹槍状先端内に刺激応答性材料と非応答性材料の二層流を形 成することで、二層構造を持つ螺旋状ゲルを構築した^[24](図4(b))。刺激応答性材料として 0.4%(w/w) NaAlg. +2.6%(w/w) p(NIPAM-co-AAC)、非応答性材料として1.5%(w/w) NaAlg. +1.0%(w/w) アルギン酸プロピレングリコール (PGAlg.) を使用した。刺激応答性ゲ ルのパターンと螺旋形状の変形の関係性を明らかにするために、刺激応答性ゲルが螺旋軸に 垂直になるようにパターンした刺激応答性螺旋状ハイドロゲル (θ = 90°、垂直パターン螺 旋状ゲル、図4(d)) および外周にパターンした螺旋状ハイドロゲル (θ = 180°、外周パター ン螺旋状ゲル)を構築した(図4(e))。ホットプレートを用いて50℃の熱刺激を垂直パターン 螺旋状ゲルに与えると、螺旋軸方向に大きく収縮し、ピッチ角αが48°から21°に変化する ことが観察できた(図4(d))。一方で、外周パターン螺旋状ゲルに加えると、螺旋軸方向に 大きく伸長し、 a が11°から27°に変化した (図4(e))。この結果より螺旋状ゲルに刺激応答 性ゲルをパターンすることで、螺旋軸に対して大きく変形することができることが確認でき た。また、螺旋形状の変形挙動がシミュレーション結果と一致することが分かった。さらに、 刺激応答性ゲルのパターンによって螺旋形状の変形方向の制御が可能であることも示され た。次に、垂直パターン螺旋状ゲルと外周パターン螺旋状ゲルに熱刺激を繰り返し与えると、 螺旋状ゲルのピッチ角はそれぞれ a = 21°-48°(外周パターン)と a = 11°-42°(外周パター ン)の範囲で変化した(図4(f))。この結果より、螺旋状ゲルは繰り返し変形可能であること が示された。

5. バイレイヤ螺旋状ゲルロボットの無次元推進速度制御

螺旋状ゲルロボットのピッチ角変化による無次元推進速度制御を実証するために、刺激応 答層に6.8%(w/w)磁性ナノ粒子 + 2.6%(w/w) p(NIPAM-co-AAC) + 0.4%(w/w) NaAlg. 非応答層に3%(v/v) 蛍光粒子 + 1.0%(w/w) NaAlg. + 1.0%(w/w) PGAlg. を用いて、内周パ ターン螺旋状ゲルロボット(パターン角: $\theta = 17^{\circ}$ 、初期ピッチ角: $a_i = 32^{\circ}$)と外周パター ン螺旋状ゲルロボット(パターン角: $\theta = 199^{\circ}$ 、初期ピッチ角: $a_i = 21^{\circ}$)を構築した(図5(a))。 構築した内周パターン螺旋状ゲルロボットを 24° から 46° の温度刺激を与えると徐々に変 形し、最終的にピッチ角 24° まで変形した(図5(a)、(b))。次に、外周パターン螺旋状ゲル ロボットに温度刺激を与えると、ピッチ角は 21° から 32° に伸長した(図5(a)、(b))。以上 の結果より、螺旋状ゲルロボットは外部温度に応じてピッチ角を変化させることが明らかに なった。

最後に、螺旋状ゲルロボットの外部環境に応じた無次元推進速度の制御を行う。内周パ ターンと外周パターン螺旋状ゲルロボットを Pico-Surf(2%(w/w) in NovecTM7500)) + 1M CaCl₂ aq. 内に置き、回転磁場 (10mT、5Hz) によって推進させた。変形前 (20°C)の内周パ ターン螺旋状ゲルロボットの無次元推進速度 u^* は0.054 ($a_i = 32^\circ$)だった(図5(c)、(e))。 50°Cの熱刺激を印加すると内周パターン螺旋状ゲルロボットは変形し、無次元推進速度 u^* が0.042 ($a_i = 24^\circ$)に減速した。一方で、外周パターン螺旋状ゲルロボットの無次元推進速



図5. 内周パターン螺旋状ゲルロボットの外部環境に応じた推進制御。(a)熱刺激による変形 挙動。(b) ピッチ角と熱刺激の関係。(c) 推進挙動の変化。(d) 熱刺激印加前後の無次元推進 速度。

度は0.037 ($a_i = 21^\circ$)から0.042 ($a_f = 32^\circ$)に加速した(図5(d)、(e))。以上の結果より、外 部環境に応じた螺旋状ゲルロボットの変形によって無次元推進速度 u^* の変化が可能である ことを実証した。さらに、刺激応答性ゲルのパターンによって螺旋状マイクロロボットの推 進速度の加速と減速のいずれも達成した。

6. 結論と今後の展望

6.1 本研究の結論

本研究では、外部環境に応じた推進制御可能な螺旋状ハイドロゲルマイクロロボットを提 案した。本研究の結論を以下にまとめる。

- (1) 螺旋状ゲルロボットの推進速度がピッチ角に大きく依存することを理論的に明らかに し、実験的に推進速度がピッチ角に依存することを実証した。
- (2) 刺激応答性ゲルを螺旋状ハイドロゲルにパターンすることで、螺旋所形状の伸縮を実現 した。さらに、刺激応答性ゲルのパターン角によって螺旋状ゲルの伸縮挙動が変化する ことを見出した。
- (3) 螺旋状ゲルロボットの外部刺激に応じた螺旋形状変形によって無次元推進速度の制御に 成功した。

6.2 今後の展望

最後に本研究の展望について述べる。

(1) 刺激応答性ゲルによる外部センシング機能

本研究で使用した螺旋状ハイドロゲルの構築手法は刺激応答性ゲルやコラーゲンゲルなど 様々な機能性材料に応用可能である^[24]。加えて、マイクロ流体デバイスを工夫することで より複雑なパターンも実現することができる^[27]。故に、様々な機能性材料の封入および複 雑なパターンを行うことで、外部環境のセンシング性能の向上やより複雑な遊泳制御を達成 することができると考える。そのため、標的物質を探査するマイクロマシンや外部から制御 困難な微小環境で自律的に役割を果たすロボットなどへの応用が大いに期待される。

また、ハイドロゲルは高い生体適合性を有するため、生体内の微小環境などでの使用に適 していると考える。そのため、螺旋状ゲルに細胞や薬剤を封入することで、局所的な細胞療 法やターゲットドラッグデリバリなど将来の医学の発展にも貢献することができると考え る^[24]。例えば、外部環境センシング機能と治療行為を組み合わせることで診断と治療を同 時に行うセラノスティクスへの応用も期待される^[28]。

(2) 螺旋状ゲルの変形機能

螺旋状ゲルの変形機構はマイクロロボットの推進制御だけでなくアクチュエータへの応用 も可能である。近年、刺激応答性ゲルを用いたアクチュエータは、高い生体適合性や柔軟性 などの観点から人工筋肉などへの応用が期待され、数多くの研究が報告されている^[29]。し かしながら、従来の刺激応答性ゲルアクチュエータの課題として変形量の少なさや変形方向 の制御が挙げられる。そのため、本研究で提案するバイレイヤ螺旋状ゲルは、螺旋形状と刺 激応答性ゲルのパターンにより、螺旋軸への大きな変形を実現している。さらに、刺激応答 性ゲル自体は収縮にしているのに対し、螺旋状ゲル全体としては伸長するという従来の刺激 応答性ゲルアクチュエータでは実現できなかった挙動を達成している。故に、本研究は従来 の刺激応答性ゲルアクチュエータの持つ課題のブレイクスルーと成り得る。今後、より複雑 なパターンを有する螺旋状ゲルの変形を議論することで、様々な変形挙動を示すソフトアク チュエータへの実現が期待される。以上より、本研究の刺激応答性ゲルのパターンによる外 部環境に応じた螺旋状ゲルの変形メカニズムは独創的であり、学術的に意義深いと考える。

(3) 生体のモデル化と再構築

微生物の鞭毛から着想を得た螺旋形状の変形による推進制御および螺旋状微生物の伸縮機 構を模倣した螺旋状ゲルの変形システムは、いずれもシンプルなシステムのため汎用性が高 く、自律型マイクロロボットの発展に寄与すると考える。また、本研究のように生体の持つ 機能をモデル化および再構築方法の創造は、人工生命の誕生や生命と機械のハイブリッドシ スエムなどの発展の一助となると考える。さらに、再構築したマイクロロボットと生物の機 能を比較することで、生命の持つ優れた機能を解き明かすための新たな視座を手に入れるこ とに繋がると考える。以上より、本研究は将来的に工学の発展のみならず生命の謎を解き明 かすための一助となると考える。

7. 謝辞

この研究を行うにあたり、お世話になりました皆様に深くお礼申し上げます。特に、慶應 義塾大学の尾上弘晃教授には、学部生時代より数えきれないほどのご指導を頂きました。慶 應義塾大学の安藤和也准教授には実験に使用したヘルムホルツコイルを貸して頂きました。 慶應義塾大学の村松眞由専任講師には有限要素法シミュレーションについて、東京農工大学 の川野竜司准教授には刺激応答性ゲルについて、東京工業大学の北本仁孝教授と倉科佑太助 教には磁性ナノ粒子について大変有意義な助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 下村政嗣,次世代バイオミメティクス研究の最前線 一生物多様性に学ぶ一,2017.
- [2] 日本化学会, 持続可能性社会を拓くバイオミメティクス 生物学と工学が築く材料科学, 2018.
- [3] Y. Wu, J. K. Yim, J. Liang, Z. Shao, M. Qi, J. Zhong, Z. Luo, X. Yan, M. Zhang, X. Wang, R. S. Fearing, R. J. Full, L. Lin, *Sci. Robot.* **2019**, *4*, DOI 10.1126/scirobotics.aax1594.
- [4] M. Buck, S. Razavi, R. Derose, T. Inoue, P. a Silver, P. Subsoontorn, D. Endy, Y. Gerchman, C. H. Collins, F. H. Arnold, R. Weiss, M. C. Jensen, C. D. Smolke, L. Wroblewska, L. Prochazka, Y. Benenson, J. J. Tabor, C. a Voigt, C. Lou, a Tamsir, B. C. Stanton, M. Wieland, M. Fussenegger, I. Deese, N. Publishing, G. New, S. K. Lee, J. D. Keasling, a P. Arkin, D. Del Vecchio, W. Brattain, *Science (80-.).* 2013, 603.
- [5] J. C. Nawroth, H. Lee, A. W. Feinberg, C. M. Ripplinger, M. L. McCain, A. Grosberg, J. O. Dabiri, K. K. Parker, *Nat. Biotechnol.* 2012, 30, 792.
- [6] S.-J. Park, M. Gazzola, K. S. Park, S. Park, V. Di Santo, E. L. Blevins, J. U. Lind, P. H. Campbell, S. Dauth, A. K. Capulli, F. S. Pasqualini, S. Ahn, A. Cho, H. Yuan, B. M. Maoz, R.

Vijaykumar, J.-W. Choi, K. Deisseroth, G. V. Lauder, Science (80-.). 2016, 353.

- [7] Y. Morimoto, H. Onoe, S. Takeuchi, *Sci. Robot.* **2018**, *3*, 1.
- [8] G. Z. Yang, J. Bellingham, P. E. Dupont, P. Fischer, L. Floridi, R. Full, N. Jacobstein, V. Kumar, M. McNutt, R. Merrifield, B. J. Nelson, B. Scassellati, M. Taddeo, R. Taylor, M. Veloso, Z. L. Wang, R. Wood, *Sci. Robot.* **2018**, *3*, DOI 10.1126/scirobotics.aar7650.
- [9] H. W. Huang, M. S. Sakar, A. J. Petruska, S. Pané, B. J. Nelson, Nat. Commun. 2016, 7, 1.
- [10] C. Bergeles, K. Shamaei, J. J. Abbott, B. J. Nelson, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2010, 57, 2064.
- [11] E. Lauga, Annu. Rev. Fluid Mech. 2016, 48, 105.
- [12] S. E. Spagnolie, E. Lauga, *Phys. Rev. Lett.* **2011**, *106*, 1.
- [13] K. Shiba, S. A. Baba, T. Inoue, M. Yoshida, Proc. Natl. Acad. Sci. 2008, 105, 19312.
- [14] N. C. Darnton, H. C. Berg, *Biophys. J.* **2007**, *92*, 2230.
- [15] L. Turner, W. S. Ryu, H. C. Berg, J. Bacteriol. 2000, 182, 2793.
- [16] R. Grisch, B. J. Nelson, M. A. Zeeshan, K. M. Sivaraman, B. Özkale, K. E. Peyer, J. Sort, M. S. Sakar, E. Pellicer, S. Pané, *Small* 2013, 10, 1284.
- [17] W. Gao, X. Feng, A. Pei, C. R. Kane, R. Tam, C. Hennessy, J. Wang, Nano Lett. 2014, 14, 305.
- [18] D. Walker, M. Kübler, K. I. Morozov, P. Fischer, A. M. Leshansky, Nano Lett. 2015, 15, 4412.
- [19] S. Tottori, L. Zhang, F. Qiu, K. K. Krawczyk, A. Franco-Obregõn, B. J. Nelson, *Adv. Mater.* 2012, 24, 811.
- [20] D. Morales, I. Podolsky, R. W. Mailen, T. Shay, M. D. Dickey, O. D. Velev, *Micromachines* 2016, 7, DOI 10.3390/mi7060098.
- [21] N. Bassik, B. T. Abebe, K. E. Laflin, D. H. Gracias, *Polymer (Guildf)*. **2010**, *51*, 6093.
- [22] Y. Takashima, S. Hatanaka, M. Otsubo, M. Nakahata, T. Kakuta, A. Hashidzume, H. Yamaguchi, A. Harada, *Nat. Commun.* 2012, 3, 1270.
- [23] G. Ye, X. Wang, *Biosens. Bioelectron.* **2010**, *26*, 772.
- [24] K. Yoshida, H. Onoe, *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 1.
- [25] K. Yoshida, S. Nakajima, R. Kawano, H. Onoe, Sensors Actuators, B Chem. 2018, 272, 361.
- [26] S. Nakajima, R. Kawano, H. Onoe, Soft Matter 2017, 13, 3710.
- [27] E. Kang, G. S. Jeong, Y. Y. Choi, K. H. Lee, A. Khademhosseini, S. H. Lee, Nat. Mater. 2011, 10, 877.
- [28] M. Tsuchiya, Y. Kurashina, H. Onoe, Sci. Rep. 2019, 9, 1.
- [29] Y. Lee, W. J. Song, J. Y. Sun, *Mater. Today Phys.* **2020**, *15*, 100258.