

## СТАТЬЯ

## Открытый доступ

## Мягкие роботы, вдохновленные мышцами, на основе двусторонних диэлектрических эластомерных актуаторов

Йель Ян<sup>1,2</sup>, Дэнфэн Ли<sup>3</sup>, Яньхуа Сунь<sup>1,2</sup>, Менге Ву<sup>1,4</sup>, Цзинью Сю<sup>4</sup>, Ин Ли<sup>2</sup>, Синге Ю<sup>4</sup>, Лу Ли<sup>2</sup> и Цзюньшэн Юй<sup>1</sup>

## Аннотация

Группы мышц выполняют свои функции в организме человека посредством двусторонней активации мышц, что дает бионическое вдохновение для создания искусственных роботов. Создание мягких робототехнических систем с искусственными мышцами и несколькими размерами управления может стать эффективным средством разработки легкоуправляемых мягких роботов. Здесь мы сообщаем о двустороннем приводе с функцией двусторонней деформации, аналогичной функции группы мышц, которую можно использовать для мягких роботов. Для создания этого двустороннего привода в качестве искусственной мышцы был выбран недорогой диэлектрический эластомер VNB 4910, а в качестве рамы привода служили полимерные пленки, изготовленные определенной формы. Путем сквозного соединения этих двусторонних приводов можно разработать мягкого 3D-робота в форме шестерни с разнообразными возможностями движения, используя регулируемые комбинации приводов. Лежа на земле всеми ногами, был реализован ползущий мягкий робот, ловкодвигающийся в нескольких направлениях. Более того, рулевое управление было мгновенным и эффективным. Стоя двумя ногами на земле, он также действует как катящийся мягкий робот, который может выполнять двунаправленное перекачивание и подъем на уклоне 2°. Наконец, вдохновленный круговой мышцей рта во рту, был продемонстрирован похожий на рот мягкий робот, который мог кусать и хватать предметы, вес которых в 5,3 раза превышал вес его тела. Двунаправленная функция одного привода и различные комбинированные режимы нескольких приводов позволяют мягким роботам демонстрировать разнообразные функциональные возможности и гибкость, что является очень ценным примером для проектирования высокоуправляемых роботов.

## Введение

Появление разработки мягких роботов представляет собой успешный пример обучения у природы, позволяющего копировать поведение и функции человека или животного<sup>1</sup>. Обычные роботы, сконструированные с твердыми телами и механическими приводами, часто демонстрируют точное управление и движение, но между ними и реальными животными или людьми все еще существует разрыв, обусловленный различием бионических механизмов.

Структура человеческого тела включает не только твердые кости в качестве опорного каркаса тела, но также мягкие мышцы и суставы в качестве мягких приводов и контроллеров движений тела. Разработка мягких приводов, имитирующих конструкцию и кинематику тела животного<sup>3–5</sup>, является эффективным дополнением к роботизированной бионике. Технология мягкого срабатывания была разработана с использованием различных интеллектуальных материалов, таких как диэлектрические эластомеры (DE)<sup>6,7</sup>, жидкокристаллические полимеры (LCP)<sup>8,9</sup>, сплавы с памятью формы (SMA)<sup>10</sup> и гидрогели<sup>11</sup>. Мягкие приводы и роботы играют незаменимую роль в биомедицинской инженерии<sup>12,13</sup>, морском обнаружении<sup>14,15</sup>, медицинской реабилитации<sup>16</sup> и промышленных операциях<sup>7,17</sup> из-за мягкости их тел. Для обеспечения хорошей маневренности и производительности движений управляемость мягкого робота является чрезвычайно важным показателем.

Роботы часто выполняют точное многомерное управление, полагаясь на точные двигатели или механические устройства, в то время как новые типы мягких роботов могут управляться только путем деформации материала мягких приводов с помощью простого

Адрес для переписки: Дэнфэн Ли (dengfli2-c@my.cityu.edu.hk) или Синге Ю (xingeyu@cityu.edu.hk) или Лу Ли (lilicqwu.edu.cn) или Цзюньшэн Ю (jsyu@uestc.edu.cn)

<sup>1</sup> Государственная ключевая лаборатория электронных тонких пленок и интегрированных устройств, Школа оптоэлектронных наук и техники, Университет электронных наук и технологий Китая (UEESTC), Чэнду, Китайская Народная Республика

<sup>2</sup> Ключевая лаборатория Чунцина по изучению поверхности материалов и интерфейсов, Чунцинский центр совместных инноваций микро/нано оптоэлектронных материалов и Устройства, микро/нанооптоэлектронные материалы и устройства International База научно-технического сотрудничества Китая, Школа материалов Наука и техника, Чунцинский университет искусств и наук, Чунцин, КНР  
Полный список информации об авторе доступен в конце статьи.

© Автор(ы) 2023



Открытый доступ. Эта статья распространяется по международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0, которая разрешает использование, совместное использование, адаптацию, распространение и воспроизведение на любом носителе и в любом формате при условии, что вы укажете соответствующую ссылку на оригинального автора(ов) и источник, предоставив ссылку на лицензию Creative Commons и указать, были ли внесены изменения. Изображения или другие материалы третьих лиц в этой статье включены в лицензию Creative Commons, если иное не указано в кредитной линии материала. Если материал не включен в лицензию Creative Commons статьи и предполагаемое использование не разрешено законодательством или превышает разрешенное использование, вам необходимо будет получить разрешение непосредственно от правообладателя. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

способ срабатывания<sup>18,19</sup>. Однако нелинейную деформацию мягких материалов трудно предсказать<sup>20</sup>, что затрудняет выполнение мягкими роботами сложных эксплуатационных требований<sup>21,22</sup>. Чтобы улучшить управляемость мягких роботов, нам необходимо научиться у природы создавать мягкие приводы, например, имитирующие структуру и функцию мышц. Мышцы организмов обычно управляются в виде мышечных пар или мышечных групп. Мышцы с обеих сторон кости обладают приводящим эффектом и действуют синергетически при движении конечностей. Если взять в качестве примера человеческое тело, то к двусторонним мышцам относятся двуглавая и трехглавая мышцы плеча, межкостные мышцы, круговые мышцы глаза и т. д. Межкостные мышцы могут контролировать размахивание пальцев, а круговые мышцы глаза могут сотрудничать, чтобы контролировать открытие и закрытие [глаз](#)<sup>23,24</sup>. Поэтому, вдохновленное структурой мышечных групп, увеличение размера управления является эффективной стратегией для разработки управляемых мягких приводов и роботов.

Здесь мы сообщаем о высокоуправляемом мягком роботе, основанном на структуре двустороннего срабатывания. Подобно паре мышц организмов, двусторонние приводы обеспечивают двустороннее управление и скоординированное поведение, аналогичное мускулатуре человека. Каждый двусторонний актуатор собирается из двух односторонних актуаторов, изготовленных из недорогого диэлектрического эластомера VNB 4910 и полиэтилентерефталата (ПЭТ). Диэлектрический эластомер<sup>25</sup> считается идеальным выбором для изготовления искусственных мышц. По сравнению с фототермическими актуаторами<sup>26</sup> и актуаторами, реагирующими на влажность<sup>27</sup>, актуаторы из диэлектрического эластомера имеют такие преимущества, как быстрый отклик<sup>28</sup> и электрическая управляемость. По сравнению с другими приводами с электроприводом<sup>29</sup>, диэлектрические эластомеры имеют преимущество в виде большой деформации<sup>28</sup>. Кроме того, мы сконструировали 3D-робота в форме шестерни, используя эти двусторонние приводы, чтобы продемонстрировать более универсальные функции и управляемость. Будучи подвижными роботами, собранные мягкие 3D-роботы демонстрируют хорошую управляемость при ползании и перекачивании. Ползучий робот обладает способностью двигаться в разных направлениях за счет прямого переключения между двусторонними приводами. Благодаря характеристикам двустороннего срабатывания катящийся робот может осуществлять двунаправленное перекачивание и подвигаться. Наконец, мягкий робот, похожий на рот, был разработан как захват, способный кусать и захватывать предметы, в пять раз превышающие его собственный вес. Многие существующие мягкие роботы также обладают такими формами движения, как ползание<sup>30,31</sup> и перекачивание<sup>32</sup>. Большинство из них имеют только один режим движения, тогда как наши шестеренчатые 3D-роботы обладают множеством функций и более высокой управляемостью и маневренностью (таблица S1). Дизайн этого двустороннего привода, вдохновленный группами мышц, предлагает новую идею для разработки легкоуправляемых 3D-роботов.

Результаты и обсуждение

Двусторонние мягкие приводы

На рисунке 1а и дополнительном рисунке S1 показан процесс производства односторонних приводов и двусторонних приводов.

приводы. Односторонний привод состоит из ПЭТ-подложки толщиной 0,18 мм, армирующих рамок толщиной 0,18 мм (рис. S3) и предварительно растянутого диэлектрического эластомера с двусторонними электродами из угольной смазки в качестве активного слоя. После отпускания диэлектрический эластомер образует седловидную поверхность, а привод имеет изогнутую форму под определенным углом. При подаче напряжения на электроды из угольной смазки с обеих сторон пленка ДЭ, подвергнутая максвелловскому напряжению, сжимается в направлении электрического поля и расширяется в направлении, перпендикулярном электрическому полю. В то же время упругая потенциальная энергия, запасенная в раме ПЭТ, высвобождается, и привод стремится сплюснуться. Двусторонний актуатор был сформирован путем соединения двух односторонних актуаторов спина к спине (рис. 1а).

По сравнению с односторонним приводом двусторонний привод обеспечивает лучшую стабильность и контроль размеров. Во-первых, двусторонний привод по-прежнему может работать как односторонний, приводя в действие только одну сторону привода. Угол отклонения, определяемый как изменение угла исполнительных механизмов относительно их исходного состояния, был введен для оценки производимости исполнительного механизма. При изгибе привода в правую сторону значение угла отклонения устанавливается положительным, а при изгибе влево — отрицательным. Путем экспериментов мы установили, что рабочее напряжение выше 6 кВ вызывает сморщивание или пробой диэлектрического эластомера, что неблагоприятно для привода. Поэтому мы выбрали управляющие напряжения ниже 6 кВ. Чтобы проверить стабильность приводов, на односторонний привод и на левую сторону двустороннего привода было подано напряжение 6 кВ для циклического испытания с 20 циклами. Как показано на рис. 1б, двусторонний актуатор показывает лучшую стабильность: стандартное отклонение угла отклонения составляет всего 0,021°, что значительно ниже, чем у одностороннего актуатора со стандартным отклонением 1,48°. Стабильность двустороннего привода объясняется совместным действием структур с двух сторон. Однако из-за связывающего эффекта двусторонней структуры конструкция на одной стороне двустороннего привода будет блокировать деформацию конструкции на другой стороне. При одинаковом напряжении срабатывания на одной стороне двусторонний привод получает меньший угол отклонения 19,50°, чем угол отклонения 56,31° для одностороннего привода. Двусторонний привод также может работать как привод двустороннего изгиба, поочередно приводя в действие обе стороны привода, обеспечивая улучшенный контроль размеров. Напротив, односторонний привод может изгибаться только в одну сторону. Диапазон углов введен для определения диапазона угла отклонения привода. Как показано на рис. 1с и в фильме S1, как односторонние, так и двусторонние приводы демонстрируют уменьшение диапазона углов с увеличением частоты срабатывания. Двусторонний привод по-прежнему может генерировать углы отклонения на более высоких частотах (> 10 Гц), что позволяет использовать его в подводных плавающих роботах. Многие исследования показали, что до тех пор, пока

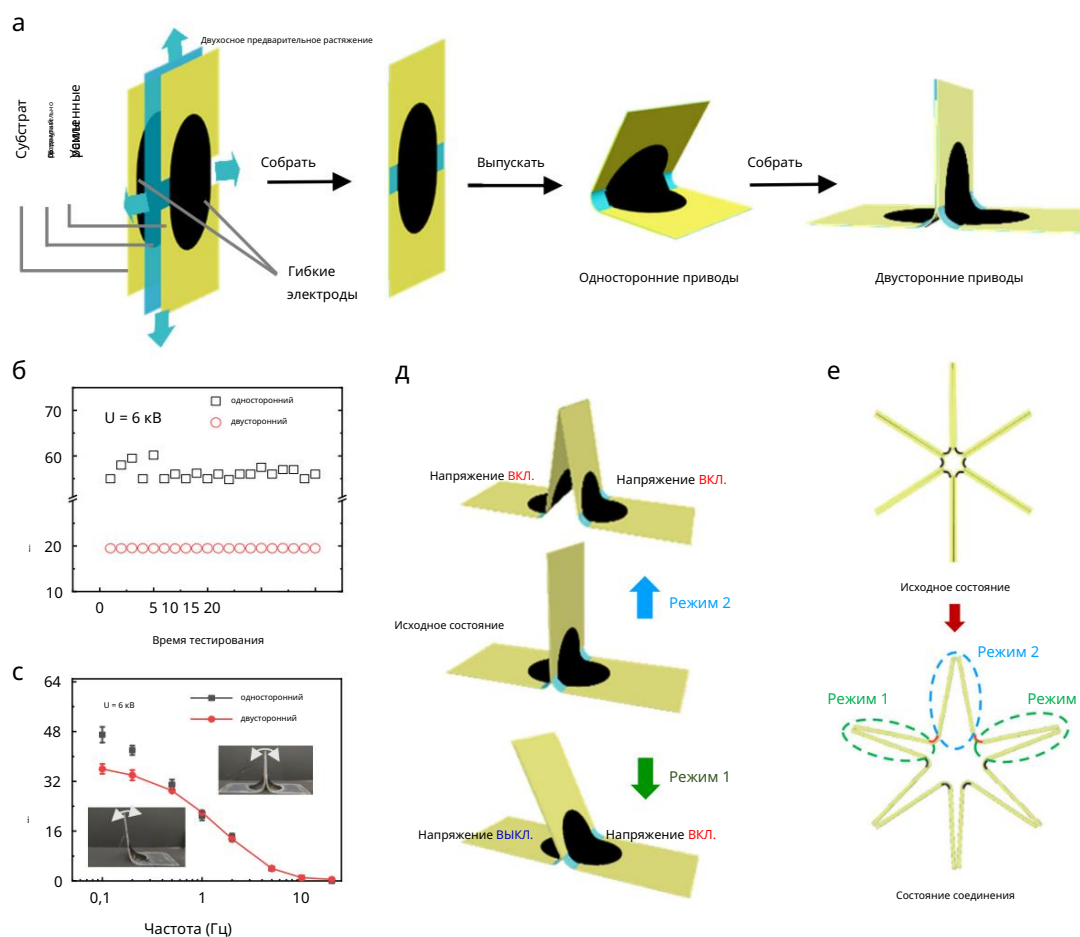


Рис. 1. Конструкция и изготовление двустороннего мышечного привода. а Процесс изготовления двустороннего привода. б Испытание устойчивости одностороннего и двустороннего привода. в Изменение диапазона угла отклонения с частотой срабатывания. д Два режима срабатывания двустороннего привода. Режим 1 относится к режиму срабатывания приложения напряжения с обеих сторон для создания одностороннего изгиба. Режим 2 относится к режиму приложения одинакового напряжения с обеих сторон для создания зазора. е Проектирование зубчатого 3D-робота с соединением режима 1 и режима 2

поскольку инкапсуляция оптимизирована, возможны подводные роботы [14, 33]. Этот закон деформации с частотой срабатывания обеспечивает важную информацию для проектирования и приведения в действие последующих роботов.

Как описано выше, двусторонний привод может деформироваться в двух направлениях, поочередно приводя в действие две стороны привода, что можно определить как режим 1. Когда обе стороны привода приводятся в действие одновременно, середина привода разделяется и создает определенный разрыв, который можно определить как моду 2 (рис. 1г). Размер зазора называется расстоянием зазора. Путем интеграции двусторонних приводов можно создать трехмерного робота в форме шестерни (рис. 1е). Режим срабатывания 1 и режим 2 можно комбинировать, чтобы регулировать форму и положение робота для реализации легко контролируемого разнонаправленного движения.

Производительность двустороннего привода зависит от жесткости ПЭТ и степени предварительного растяжения

эластомера. Толщина и радиус отверстий  $R$  подложки из ПЭТ являются основными факторами, влияющими на ее жесткость. Мы используем диапазон изменения угла отклонения (диапазон угла) и диапазон изменения расстояния зазора (диапазон зазора), чтобы оценить влияние этих параметров на работу двустороннего привода (рис. S2a). Как показано на рис. S2b, больший радиус, соответствующий меньшей жесткости, приводит к большему диапазону углов и меньшему диапазону зазора. Для более толстых подложек для достижения той же производительности требуется больший радиус. Кроме того, больший коэффициент предварительного растяжения эластомера приводит к большей деформации привода (рис. S2c). Поэтому для дальнейших исследований мы выбрали радиус отверстия 12,5 мм для ПЭТ-подложки толщиной 0,1 мм и 15 мм для ПЭТ-подложки толщиной 0,18 мм и коэффициент предварительного растяжения диэлектрического эластомера. Чтобы лучше понять два режима срабатывания двустороннего привода, мы провели анализ методом конечных элементов для

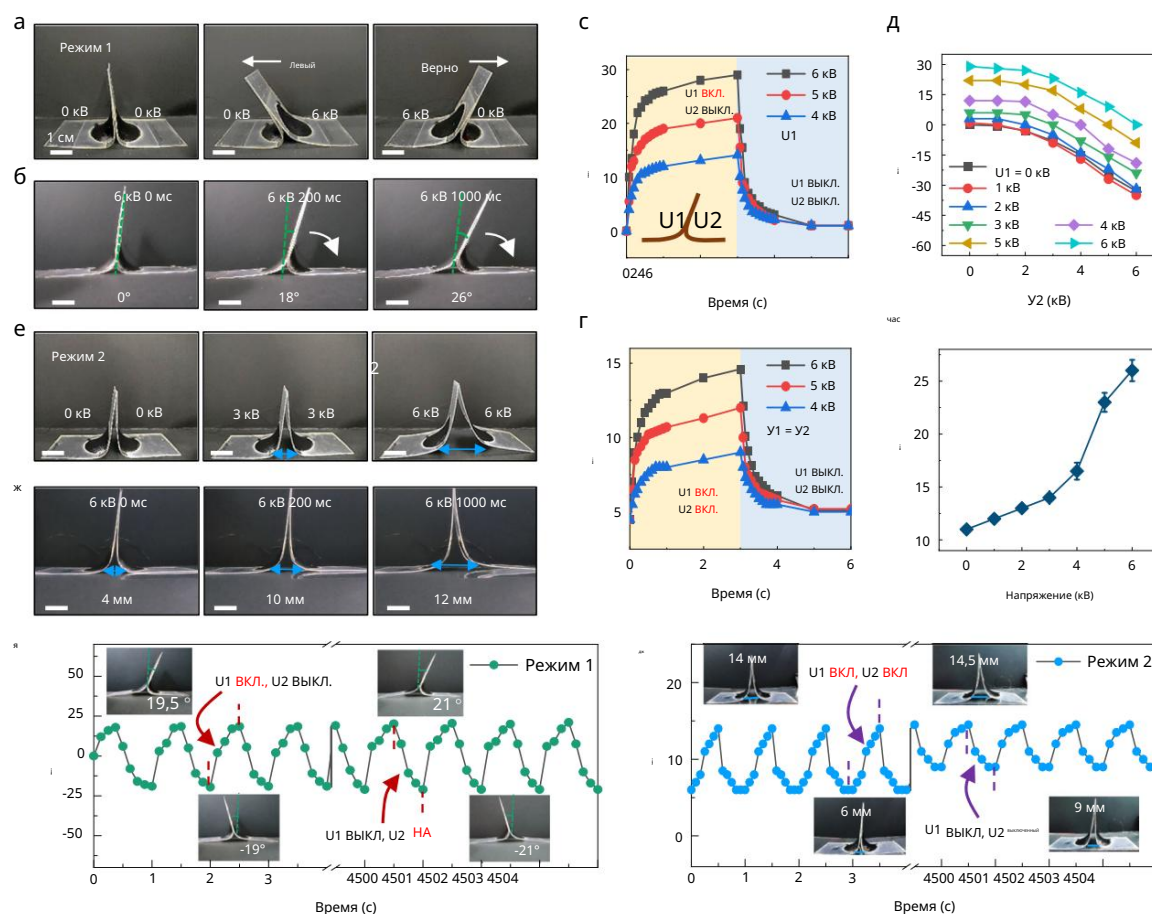


Рис. 2. Характеристики двустороннего привода. а Двусторонняя деформация двустороннего привода в режиме срабатывания 1. б Оптические изображения двусторонней деформации привода при 0 мс, 200 мс и 1000 мс (режим 1). в Изменение угла отклонения во времени при режиме срабатывания 1 с левой стороны напряжения U1 4 кВ, 5 кВ и 6 кВ. д Угол отклонения двустороннего привода при различных сочетаниях U1 и U2. е Деформация двусторонний привод в режиме срабатывания 2. Более высокое напряжение приводит к увеличению зазора. Оптические изображения деформации двусторонней привод на 0 мс, 200 мс и 1000 мс (режим 2). г Расстояние зазора изменяется во времени при режиме срабатывания 2 с напряжением срабатывания 4 кВ, 5 кВ. и 6 кВ. ж Расстояние зазора двустороннего привода при различных напряжениях. з Циклический тест на двустороннюю деформацию в режиме 1. двусторонний привод приводился в действие левым и правым переменным напряжением величиной 5,5 кВ и частотой 1 Гц. и Тест производительности велосипеда двусторонний привод в режиме 2 с напряжением срабатывания 5,5 кВ и частотой циклирования 1 Гц.

привод в двух режимах срабатывания с помощью

Программное обеспечение ABAQUS (рис. S5). Результаты моделирования показывают что напряжение на одной стороне в режиме 1 приводит к асимметричному распределению напряжений и деформаций в привод, что приводит к углу отклонения. В режиме 2, когда обе стороны задействованы одновременно, напряжение возникший в середине привода приводит к зазору расстояние.

На рисунке 2 представлены характеристики деформации двусторонний привод под два разных срабатывания режимы. Как показано на рис. 2а, двусторонний актуатор изгибается в сторону вправо, когда приводится в действие его левая сторона, и он сгибается к влево, когда активируется его правая сторона. Под действием напряжением 6 кВ, угол отклонения достигает 18° и 26° при времена срабатывания 0,2 с и 1 с соответственно (рис. 2б). взаимосвязь между углом отклонения и срабатыванием

время в процессе гибки показано на рис. 2в.

Привод достигает максимальной деформации примерно за 1,5 с. Напряжение срабатывания с левой стороны равно выражается как U1, а что с правой стороны выражается как U2. Это попеременное высоковольтное срабатывание с обеих сторон. соответствует режиму срабатывания 1. Любой желаемый изгиб угол между 30° и 30° можно получить путем комбинирования разные значения U1 и U2 (рис. 2г). Когда обе стороны одновременно срабатывает (режим срабатывания 2), середина двусторонний привод начинает расширяться с образованием зазор, поскольку актуатор привязан к плоской поверхности (рис. 2д). Исходное расстояние зазора составляет 4 мм, а затем достигает 10 мм. и 12 мм при времени срабатывания 0,2 с и 1 с соответственно (рис. 2е). Изменение расстояния зазора со временем и с напряжение срабатывания показано на рис. 2г, з. Рисунок 2и,к демонстрирует тест велосипедной производительности двустороннего

привод на два режима срабатывания с напряжением срабатывания 5,5 кВ и частотой 1 Гц. После 4500 циклов срабатывания угол отклонения двустороннего привода в режиме срабатывания 1 не уменьшается, а незначительно увеличивается с 19° до 21°. При режиме срабатывания 2 в течение 4500 циклов зазор привода также увеличивается с 14 мм до 14,5 мм (Фильм S2). Кроме того, в качестве основного механического параметра измерялась сила срабатывания двустороннего актуатора в разных режимах. Как показано на рис. S4, сила срабатывания, создаваемая приводом, находится на уровне миллиньютон. По мере увеличения напряжения блокирующая сила привода продолжает увеличиваться. Привод, работающий в режиме 1, производит меньшую силу срабатывания, чем привод, работающий в режиме 2, поскольку в режиме 2 срабатывание осуществляется по напряжению с обеих сторон. Этот результат гарантирует, что двусторонний привод можно использовать в течение довольно длительных циклов без какого-либо ухудшения характеристик деформации.

#### Ползающие мягкие

роботы. Основываясь на характеристиках деформации двустороннего привода в двух режимах срабатывания, ожидается, что скоординированная работа нескольких приводов обеспечит робота с высокой управляемостью. На рисунке 3а показан мягкий робот в форме шестерни, интегрированный с несколькими приводами путем соединения их встык, образуя робота с замкнутым кольцом. Как показано на рис. 3б, этот мягкий робот лежит на земле, все ноги привода находятся на земле. Когда приводы мягкого робота приводятся в действие, ноги робота могут совершать непрерывные раскачивающие движения, похожие на ползание некоторых рептилий, таких как морские черепахи<sup>34</sup>. На рисунке 3б показана принципиальная схема разнонаправленного ползающего движения зубчатого 3D-мягкого робота. Регулируя и переключая положения исполнительных механизмов, мягкий робот может осуществлять движение в шести направлениях. Таким образом, мягкий робот может ползти по заданному пути. При срабатывании четырех соседних исполнительных механизмов корпус робота расширится, что отражается на изменении угла между ногами робота (рис. 3в).

Красные точки обозначают положения приводов, которые приводятся в действие. Чем больше напряжение срабатывания, тем больше степень открытия и изменение угла робота.

На рис. 3г показан процесс ползания зубчатого мягкого робота за один шаг. Направленное сканирование возникает из-за разницы в направлении и продолжительности силы трения во время приложения и снятия напряжения, и мы даем подробное обсуждение на рис. S6. Вначале четыре привода, отмеченные красными точками, были приведены в действие напряжением 5 кВ, и корпус робота начал расширяться и двигаться вперед со значительным смещением. После снятия приложенного напряжения тело робота в течение короткого времени начало сжиматься и с небольшим смещением переместилось назад. Расстояние шага робота соответствует разнице между передними

смещение и обратное смещение. Неравномерное трение при движении вперед и назад приводит к увеличению расстояния шага вперед. Скорость ползания и расстояние шага робота тесно связаны с частотой включения и выключения напряжения срабатывания (Фильм S3). На рис. 3д показана зависимость скорости ползания и расстояния шага зубчатого мягкого робота от этой частоты. Результаты показывают, что робот достигает максимальной скорости на частоте 2 Гц, а скорость ползания составляет 4,3 мм/с. Расстояние шага робота постепенно уменьшается по мере увеличения частоты переключения из-за сокращения времени деформации.

Расстояние шага мягкого робота достигает разумного значения — 6 мм. Таким образом, даже при низкой частоте срабатывания 2 Гц скорость ползания этого робота все равно достигает 4,3 мм/с, что достаточно для создания непрерывного направленного движения (таблица S1). Как показано на рис. 3ф, этот мягкий робот полз вперед за 20 с при двух разных частотах, причем большее расстояние перемещения достигалось при частоте 2 Гц.

Важно отметить, что робот в форме шестерни обладает разнонаправленной симметрией. Следовательно, мы можем активировать приводы в разных положениях, чтобы заставить робота двигаться в разных направлениях (Фильм S4 и рис. 3г). Мы продемонстрировали рулевое управление роботом с несколькими различными углами поворота: 53°, 126° и 170°, которые близки к 60°, 120° и 180°. Красные точки обозначают положения задействованных исполнительных механизмов для движения в разных направлениях. Переключение направления движения происходит мгновенно, что показывает, что скорость переключения направления может быть очень высокой. Более того, робот может сразу двигаться вперед в следующем заданном направлении без перехода по дуге окружности. Таким образом, с точки зрения скорости реакции на рулевое управление и эффективности рулевого управления этот робот превосходит предыдущие роботы, которые полагаются на изгиб тела для вращения (таблица S1) 35–38.

#### Катящийся мягкий робот

Мягкий робот в форме шестерни также может работать стоя, опираясь только двумя ногами на землю. Таким образом, он может катиться вперед как катящийся мягкий робот. Приводя в действие приводы в разных положениях, барицентр всего робота можно отрегулировать для создания поведения качения на земле или даже на склоне (рис. 4а). Для создания этого катящегося мягкого робота было собрано семь приводов (дополнительный рисунок S8a). Чтобы обеспечить руководство процессом прокатки, мы дополнительно исследовали распределение барицентра мягкого робота при различных комбинациях приводов (рис. S7 и рис. S8b). Как показано на дополнительном рисунке S8b, когда приводы 1, 2 и 3 были приведены в действие, барицентр робота был ниже, чем в исходном состоянии, а также наблюдалось большое смещение в боковом направлении, что послужило важной основой. чтобы робот катился вперед. Подробно, прокатка



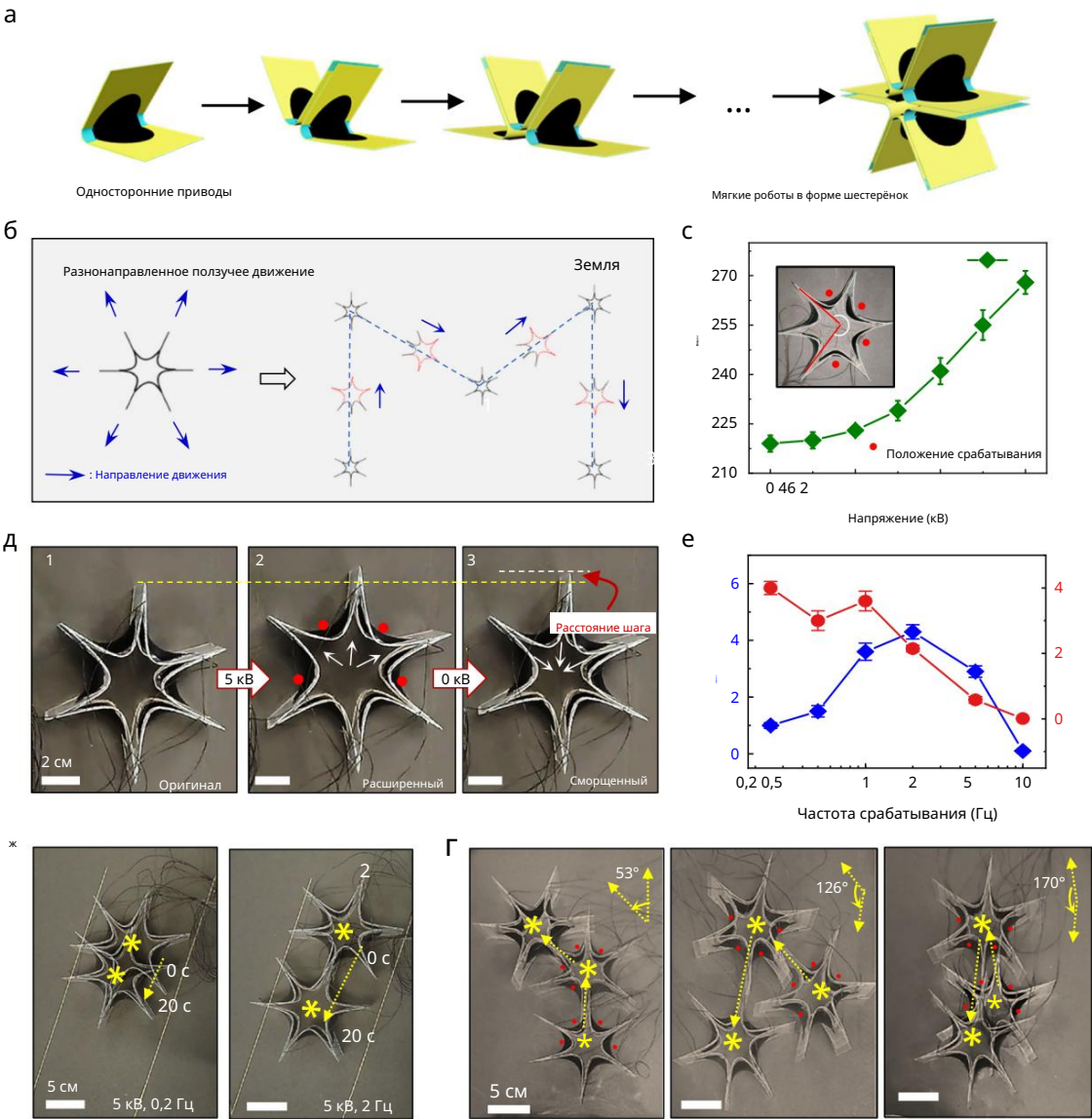


Рис. 3. Мягкий 3D-робот в форме шестерни и его поведение при ползании. Изготовление зубчатого 3D мягкого робота. б Отображение разнонаправленной управляемости и ползания по заданной траектории. в Изменение угла между двумя двусторонними исполнительными механизмами (отмечены красной линией) при напряжении срабатывания от 0 кВ до 6 кВ. д Процесс ползания мягкого робота в форме шестеренки за один шаг. Красные точки обозначают положения приводов, которые приводятся в действие. е Зависимость скорости передвижения и расстояния шага зубчатого мягкого робота от частоты включения и выключения напряжения срабатывания. ж Демонстрация расстояния сканирования робота на разных частотах. з Направленная управляемость ползущего робота. Ползущая ориентация робота была изменена путем переключения положений срабатывания.

Процесс робота за один шаг записывался и анализировался следующим образом. Управление напряжением срабатывания и углом наклона всех исполнительных механизмов показаны на рис. 4б, в. Угол привода — это угол между двумя ногами робота, где расположен привод. Один шаг был разделен на две фазы, называемые фазой предварительной прокатки (фаза 1) и фазой импульса (фаза 2). На этапе предпрокатки к исполнительным механизмам 1, 2 и 3 подавалось напряжение, постепенно увеличивавшееся от 0 до 5,5 кВ, и барицентр робота перемещался на большой шаг вперед (рис. 4г). В импульсной фазе

Импульсное напряжение с пиковым значением 6,5 кВ применялось для создания мгновенного возбуждения, заставляющего бар-центр робота быстро перемещаться вперед и вниз, что заставляло робота перекачиваться и делать шаг вперед (рис. 4г). Аналогичным образом, когда приводы 4, 5 и 6 были задействованы, мягкий робот мог катиться назад (Фильм S5). Как показано в Таблице S1, двунаправленное перекачивание этого подвижного мягкого робота значительно улучшило возможности управления движением по сравнению с однонаправленным перекачивающим движением предыдущих мягких роботов на основе DE.

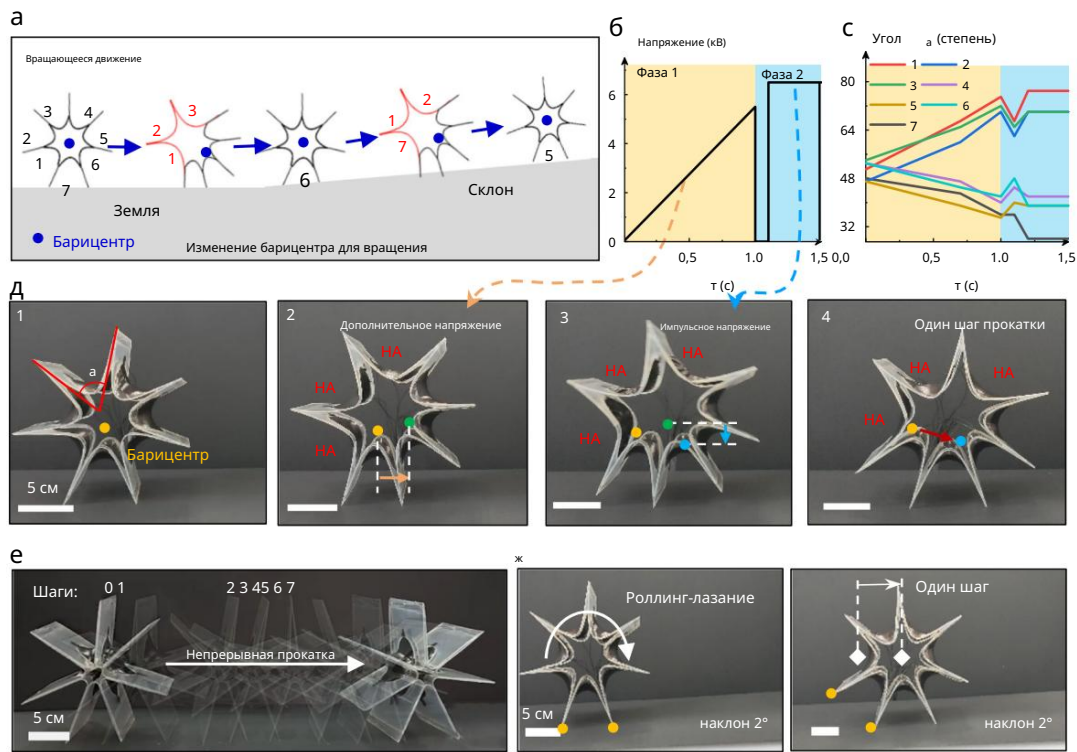


Рис. 4. Катящийся мягкий робот. Принципиальная схема перекаточного движения катящегося мягкого робота по ровной местности и склону. Актуаторы в 3D Роликовый мягкий робот пронумерован по часовой стрелке от 1 до 7. b Процесс управления напряжением для катящегося робота во время периода срабатывания. После барицентра робота поднимается в фазе 1, импульсное напряжение в фазе 2 заставляет робота катиться вперед. c Изменение угла каждого привода в течение периода срабатывания. d Анализ состояния движения катящегося робота в течение периода приведения в действие, в котором 1 — начальное состояние, 2 — состояние подъема барицентра, 3 — состояние качения. возбуждается импульсным напряжением, а 4 — конечное состояние. e Непрерывный процесс прокатки мягкого робота. f Поведение мягкого робота при качении на уклоне 2°

После первого шага можно активировать исполнительные механизмы 7, 1 и 2. и робот сделает второй шаг вперед (рис. 4а). Повторяя этот процесс, робот может непрерывно катиться вперед или назад. Рисунок 4е и дополнительный видеоролик S6 показывает контролируемое движение мягкого робота для полный круг из 7 шагов. Чтобы охарактеризовать прокатку способность катящегося робота на склоне, мы разместили катящийся робот на склоне с углом наклона 2° для прокатный тест (рис. 4f и фильм S7). Катящийся мягкий робот также продемонстрировал стабильное перекачивание на склонах, что существенно расширяет возможности его применения.

Мягкий робот, похожий на рот

Этот мягкий 3D-робот в форме шестеренки демонстрирует расширение тела и сокращение во время процесса его срабатывания, что идеально подходит для захвата предметов. Некоторые исследователи разработали роботы для решения задач, имитируя человеческие пальцы<sup>39,40</sup>. На самом деле, помимо пальцев, многие люди используют еще и свои рты, чтобы брать предметы, особенно у людей с ограниченными возможностями которые потеряли руки. Рот захватывает предметы с помощью за счет сотрудничества круговых мышц, состоящих из несколько мышц. Во рту круговые мышцы называется круговой мышцей рта<sup>41</sup>, которая обычно

контролируемый захват еды. Робот в форме шестеренки представляет собой кольцевая конструкция, соединенная несколькими приводами. структура, образованная соединением головы и хвоста двусторонние приводы, соединенные последовательно, можно рассматривать как «искусственную круговую мышцу». При активации всех исполнительных механизмов мягкий робот может выполнять те же функции захвата, что и человек рот и его можно назвать «ротоподобным мягким роботом» (рис. 5а).

Этот мягкий робот, похожий на рот, может регулировать свой внутренний размер, контроль срабатываемых напряжений на всех исполнительных механизмах. внутренний диаметр был введен для оценки внутреннего диаметра. размером ротоподобного мягкого робота, который был определен как диаметр наибольшего круга, который можно разместить внутренне. Как показано на рис. 5б, робот значительно расширил корпус, увеличив внутренний диаметр вдвое от 21 мм до 42 мм, при срабатываемом напряжении увеличилось с 0 кВ до 6 кВ. Чтобы реализовать эффективный захват производительности, необходимо добавить внутреннюю стену привод, который может обеспечить изолирующую контактную поверхность между роботом и объектом для защиты электроды привода от повреждений. Вот наждачная бумага с В качестве внутренней стенки использовалась сетка разного размера, а В качестве захвата использовался мяч для настольного тенниса диаметром 40 мм. объект. Во время захвата теста производительности

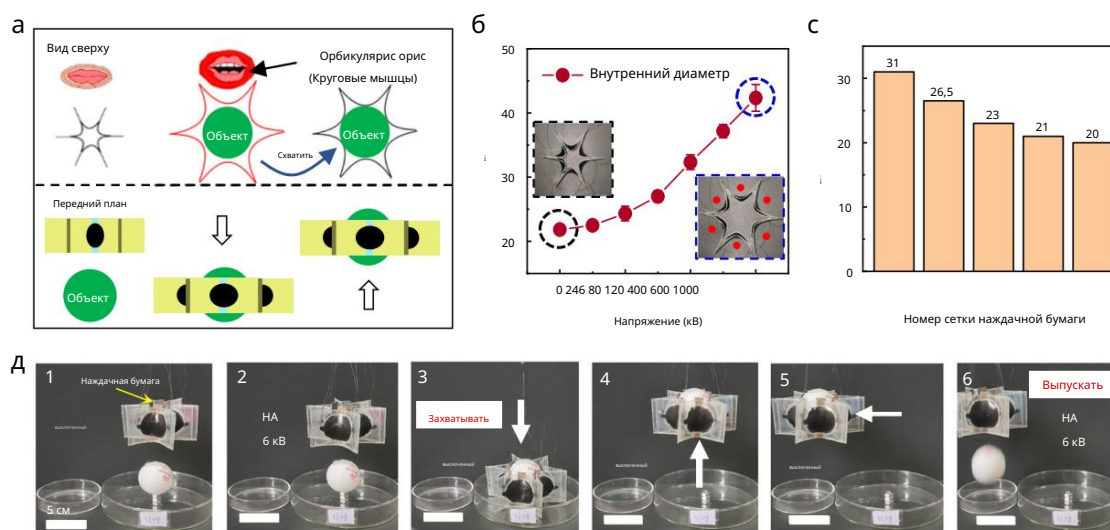


Рис. 5 Ротообразный мягкий робот. Схематическая диаграмма хватательного поведения на основе ротообразного мягкого робота. Имитируя круговую мышцу рта, этот робот может раскрывать свое тело, обходить вокруг объекта и сжимать его, чтобы наконец схватить объект. б Изменение внутреннего диаметра ротообразного робота в зависимости от напряжения срабатывания. Левое вставленное изображение показывает исходное состояние ротоподобного робота. На правом вставке изображен робот, приводимый в действие напряжением 6 кВ. с Максимальный захватывающий вес ротоподобного робота с различными наждачными бумагами в качестве внутренней стенки. d Процесс транспортировки мяча для настольного тенниса массой 31 г и диаметром 40 мм роботом, похожим на рот.

Ротоподобный мягкий робот, вес объекта регулировался путем впрыскивания воды в мяч для настольного тенниса. Как показано на рис. 5в, чем меньше номер ячейки наждачной бумаги, тем тяжелее предметы, которые можно поднять.

При использовании наждачной бумаги размером 80 меш ротоподобный мягкий робот мог удерживать массу 31 г (в 5,3 раза больше массы робота). Рисунок 5d и дополнительный фильм S8 демонстрируют процесс транспортировки мяча для настольного тенниса массой 31 г этим мягким роботом, похожим на рот. Сначала на все приводы было подано напряжение 6 кВ, а внутренний диаметр робота увеличился до более чем 40 мм.

Затем робота опустили вниз так, чтобы внутренняя стенка робота могла обернуть мяч для настольного тенниса. После снятия напряжения внутренняя стенка плотно приклеилась к мячу для настольного тенниса. В это время робот был поднят, при этом трение между внутренней стенкой и поверхностью мяча для настольного тенниса было достаточным, чтобы преодолеть гравитацию мяча для настольного тенниса. После того, как мяч был схвачен, его перенесли и поместили в другую чашку Петри, снова подав напряжение 6 кВ, чтобы открыть похожего на рот мягкого робота.

В целом, этот мягкий 3D-робот в форме шестеренки продемонстрировал разнообразие форм движения мягкого робота и высокую степень управляемости. Однако для расширения диапазона и сценариев его применения предстоит еще многое сделать, чтобы компенсировать недостатки этого робота. Например, нынешний робот по-прежнему требует приведения в действие внешнего громоздкого силового оборудования, что ограничивает его применение на открытом воздухе. Более того, текущее переключение режима движения по-прежнему основано на ручном управлении.

источник питания, и автоматическое переключение между различными режимами движения невозможно. Таким образом, при дальнейшем изучении могут быть добавлены батареи и схемы управления для обеспечения автономного срабатывания, дистанционного управления и автоматического переключения режимов.

## Заключение

В этой работе мы разработали мышечный мягкий двусторонний привод, состоящий из двух односторонних приводов на основе DE. Двусторонний привод превосходит односторонний по стабильности и контролю размеров. Для двустороннего привода были изучены характеристики деформации при двух режимах срабатывания. Чтобы лучше продемонстрировать высокую управляемость двусторонних приводов, мы разработали 3D-мягкий робот в форме шестерни, интегрированный с двусторонними приводами. Мягкий робот в форме шестерни продемонстрировал исключительную гибкость и управляемость в передвижении и манипулировании объектами. Будучи движущимся роботом, он совершал ползущие движения в разных направлениях со скоростью 4,3 мм/с и превосходными характеристиками рулевого управления. Будучи мягким роботом, он также обеспечивает стабильное двунаправленное движение и стабильное перекачивание на уклоне 2°. Робот, похожий на рот, мог схватить и перевезти мяч для настольного тенниса, вес которого в 5,3 раза превышал его собственный. На основе двусторонних приводов мягкий 3D-робот демонстрирует хорошую маневренность и высокую управляемость в различных сценариях управления, особенно при разнонаправленном ползании, быстром повороте и двунаправленном перекачивании. Таким образом, наш робот представляет собой важную конструкцию для легкоуправляемых бионических 3D-мягких роботов.



Материалы и методы

Изготовление двусторонних мягких актуаторов и зубчатых мягких роботов.

Сначала ПЭТ-пленку толщиной 0,18 мм или 0,1 мм разрезали на определенные формы с помощью станка для лазерной резки (Mintron MC-3020). Конкретные параметры, рассчитанные с помощью программного обеспечения САПР, можно найти на рис. S3. Нарезанные ПЭТ-пленки были разделены на две формы: гибкие подложки с эллиптическим отверстием и армированные рамки с полукруглым отверстием.

Эластомер VHB4910 (3 М 60 мм × 60 мм) был растянут до 400 × 400% с использованием инструмента предварительного растяжения. Затем пленку фиксировали акриловой рамкой и снимали с приспособления для предварительного растяжения. Далее к центру DE-пленки прикреплялись ПЭТ-подложка и два армированных каркаса гибкими проволоками, а их отверстия при склеивании совмещались. На обе стороны пленки ДЭ в области отверстия кистью с мягкой щетиной наносился тонкий электродный слой угольной смазки (AMKE G-660A), а затем привод снимался с пленки ДЭ. Таким образом, был приобретен односторонний мягкий привод. Наконец, два односторонних привода были соединены спина к спине, чтобы получить двусторонний привод. Мягкий робот в форме шестеренки был получен путем объединения нескольких актуаторов в кольцевую конструкцию аналогичным способом.

Метод срабатывания и испытания

Мы использовали МОП-реле, сухие герконовые реле и блок микроконтроллера (MCU) для создания простой многоканальной схемы управления высоким напряжением (дополнительный рисунок S9) для управления зарядкой и разрядкой каждого привода. Для управления одним приводом требуется двухканальное управление напряжением: один для зарядки, другой для разрядки. Микроконтроллер может контролировать рабочий цикл и частоту напряжения каждого канала посредством программирования. Для режима 1 двусторонних приводов два исполнительных механизма имели общий отрицательный полюс, положительный полюс был подключен к четырехканальной системе высоковольтного управления, тогда как для режима 2 требовалось только двухканальное высоковольтное управление. Срабатывание каждого привода ползущего робота, катящегося робота и ротоподобного робота было синхронным, поэтому требовалось только двухканальное высоковольтное управление. Частота в частотном тесте двусторонних приводов, частота в циклическом тесте и частота срабатывания ползущего робота контролировались MCU. В тесте робота, похожего на рот, вес мяча для настольного тенниса контролировался путем впрыскивания воды. Все видео и изображения были сняты камерой (OPPO).

Благодарности. Эта работа поддерживается Национальным научным фондом Китая (U21A20492, гранты № 62171069, 62275041 и 62122002), Национальной программой ключевых исследований и разработок Китая (грант № 2018YFB0407102), Сычуаньской программой науки и технологий (гранты № 2018YFB0407102). 2022YF0081, 2022YFG0012 и 2022YFG0013). Открытый проект Ключевой лаборатории дисплейной науки и технологий провинции Сычуань (ZYGX2022K018), Программа Комиссии по науке и технологиям Чунцина (cstc2019jcyj-msxmX0877, cstc2019jscx-

fxydX0048 и cstc2019jcyj-qX0021), проекты сотрудничества между университетами Чунцина и институтами, входящими в состав Китайской академии наук (HZ2021019), Программа научных и технологических исследований Муниципальной комиссии по образованию Чунцина (KJZD-K201901302, KJQN201901348 и KJCX2020048) и городские власти. Университет Гонконга (гранты № 9667221 и 9680322).

Данные об авторе 1 Государственная ключевая лаборатория электронных тонких пленок и интегрированных устройств, Школа оптоэлектронной науки и техники, Университет электронных наук и технологий Китая (UESTC), Чэнду, Китайская Народная Республика. 2 Чунцин-Ки Лаборатория исследований поверхности и интерфейсов материалов, Чунцинский центр совместных инноваций микро/нано оптоэлектронных материалов и устройств, База международного научно-технического сотрудничества в области микро/нанооптоэлектронных материалов и устройств Китая, Школа материаловедения и инженерии, Чунцинский университет искусств и наук, Чунцин, КНР. 3 Гонконг Центр инженерии церебро-сердечно-сосудистой системы (COCHE), Гонконг, САР, Китай. 4 Кафедра биомедицинской инженерии, Городской университет Гонконга Конг, Гонконг, САР, Китай

Вклад авторов JY, LL и XY курировали этот проект. DL и YY придумали эту идею. YY завершил все эксперименты, разработал систему управления и собрал данные. YY и DL проанализировали данные и подготовили цифры. YS, MW, JS и YL оказали помощь во время эксперимента и подготовки этой рукописи. YY и DL подготовили первоначальный вариант этой рукописи. DL, XY, LL и JY отредактировали эту рукопись.

Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конкурирующих интересов.

Дополнительная информация Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00592-2>.

Поступила: 10 мая 2023 г. Доработана: 10 июля 2023 г. Принята: 21 августа 2023 г. Published online: 07 October 2023

Рекомендации

1. Калли А. и др. Роботы, которые могут адаптироваться, как животные. Природа 521, 503–507 (2015).
2. Липсон, Х. Проблемы и возможности проектирования, моделирования и производства. мягких роботов. Мягкий робот. 1, 21–27 (2014).
3. Ким С., Ласки К. и Триммер Б. Мягкая робототехника: биоинспирированная эволюция робототехники. Тенденции Биотехнологии. 31, 287–294 (2013).
4. Палаги С. и Фишер П. Биоинспирированные микророботы. Нат. Преподобный Матер. 3, 113–124 (2018).
5. Ли, Д.Ф. и др. Биоинспирированные ультратонкие кусочно-управляемые мягкие роботы. Адв. Матер. Технол. 6, 2001095 (2021).
6. Гу, Г.Ю. и др. Обзор приводов из диэлектрического эластомера для мягких роботов. Биоинспир. Биомим. 12, 011003 (2017).
7. Шиан С., Бертольди К. и Кларк Д.Р. «Захваты» на основе диэлектрического эластомера для мягких робототехники. Адв. Матер. 27, 6814–6819 (2015).
8. Да Кунья, М.П., Дебиже, М.Г. и Шеннинг, А. Биоинспирированные световые мягкие роботы на основе жидкокристаллических полимеров. хим. Соц. Ред. 49, 6568–6578 (2020).
9. Панг, ХЛ и др. Сверхбольшое сокращение, направленное за счет светового высвобождения предварительно сохраненной энергии деформации в линейных жидкокристаллических полимерных волокнах. Адв. Функц. Матер. 30, 2002451 (2020).
10. Хуанг, ХН и др. Высокодинамичный привод из сплава с памятью формы для быстродвижущихся мягких роботов. Адв. Матер. Технол. 4, 1800540 (2019).
11. Юк Х. и др. Гидравлические гидрогелевые приводы и роботы оптически и акустически маскируются в воде. Нат. Коммун. 8, 14230 (2017).
12. Чиапчетти М. и др. Биомедицинские применения мягкой робототехники. Нат. Преподобный Матер. 3, 143–153 (2018).
13. Ху, WQ и др. Небольшой робот с мягким телом и мультимодальным передвижением. Природа 554, 81–85 (2018).
14. Ли, Г.Р. и др. Мягкий робот с автономным питанием в Марианской впадине. Природа 591, 66–71 (2021).

15. Кацшманн Р.К. и др. Исследование подводной жизни с помощью мягкой роботизированной рыбы с акустическим управлением. *наук. Робот.* 3, eaag3449 (2018).

16. Парк Ю.Л. и др. Разработка и управление биологическим мягким носимым роботизированным устройством для реабилитации голеностопного сустава. *Биоинспир. Биомим.* 9, 016007 (2014).

17. Шинтаке Дж. и др. Мягкие роботизированные захваты. *Адв. Матер.* 30, 1707035 (2018).

18. Толли, М.Т. и др. Выносливый, непривязной мягкий робот. *Мягкий робот.* 1, 213–223 (2014).

19. Ли, Т.Ф. и др. Быстрая, мягкая электронная рыба. *наук. Адв.* 3, e1602045 (2017).

20. Кейс Дж.К., Уайт Э.Л. и Крамер Р.К. Характеристика мягких материалов для робототехники. *Приложения. Мягкий робот.* 2, 80–87 (2015).

21. Пфайфер Р., Иида Ф. и Бонгард Дж. Новая робототехника: принципы проектирования интеллектуальных систем. *Артиф. Жизнь* 11, 99–120 (2005).

22. Шепард РФ и др. Многоходовой мягкий робот. *Учеб. Натл. акад. наук. США.* 108, 20400–20403 (2011).

23. Лисс Ф.Э. Межкостные мышцы: основа функции руки. *Ручной клин.* 28, 9–12 (2012).

24. Гудмерфи, К.В. и Оваль, В.К. Морфологическое исследование двух лицевых мышц человека: круговой мышцы глаза и сморщивающей мышцы лица. *Клин. Анат.* 12, 1–11 (1999).

25. Цю Ю. и др. Искусственные мышцы из диэлектрического эластомера: инновации в материалах и исследования устройств. *Акк. хим. Рез.* 52, 316–325 (2019).

26. Ли Дж. и др. Фототермические актуаторы: фототермические биморфные актуаторы со встроенным охладителем для легких мельниц, переключателей частоты и мягких роботов. *Адв. Функц. Матер.* 29, 1808995 (2019).

27. Цзя Т. и др. Чувствительная к влаге умная пряжа и текстиль из самобалансированного шелка. *волокна мышц.* *Адв. Функц. Матер.* 29, 1808241 (2019).

28. Пелрин Р. и др. Высокоскоростные эластомеры с электроприводом и большей деформацией. чем 100%. *Наука* 287, 836–839 (2000).

29. Лю З.С. и др. Мягкие ползающие роботы из соматочувствительной пленки, приводимые в движение искусственными мышцами для переноски грузов и передвижения по пересеченной местности. *Матер. Гориз.* 8, 1783–1794 (2021).

30. Нгуен, Коннектикут и др. Диэлектрические эластомерные приводы с несколькими степенями свободы для мягко печатаемых шестиногих роботов. *Датчики Исполнительные устройства А Физ.* 267, 505–516 (2017).

31. Ху, Т., Лу, Х. и Лю, Дж. Мягкий робот, похожий на доймового червя, с мультимодальным передвижением с использованием привода из диэлектрического эластомера с акриловым стержнем. *Адв. Интел. Сист.* 5, 2200209 (2023).

32. Ли, ВБ и др. Быстро катящийся мягкий робот, приводимый в движение диэлектрическим эластомером. *ИИЗР/АСМЕ Пер. Мехатроника.* 23, 1630–1640 (2018).

33. Ван С. и др. Мягкий робот-плаватель, работающий в стиле брасса и приводимый в действие диэлектрическими эластомерами. *Умный Мэтр. Структура.* 28, 045006 (2019).

34. Бейнс Р. и др. Роботизированные переходы в нескольких средах посредством адаптивной морфогенез. *Природа* 610, 283–289 (2022).

35. Чон С. и др. Мягкий микроробот с магнитным управлением, управляющий проводником в трехмерной фантомной сосудистой сети. *Мягкий робот.* 6, 54–68 (2019).

36. Гу, Г.Я. и др. Мягкие роботы, лазающие по стенам. *наук. Робот.* 3, eaat2874 (2018).

37. Зе, QJ и др. Мягкий робот-гусеничный робот-оригами. *наук. Адв.* 8, eabm7834 (2022 г.).

38. Грир, Дж.Д. и др. Мягкий, управляемый робот непрерывного действия, который растет за счет наконечника расширение. *Мягкий робот.* 6, 95–108 (2019).

39. Шинтаке Дж. и др. Универсальные мягкие захваты с собственной электроадгезией на основе многофункциональных полимерных приводов. *Адв. Матер.* 28, 231–238 (2016).

40. Манти М. и др. Мягкий роботизированный захват на основе биотехнологий, обеспечивающий адаптируемость и эффективность. хватательный. *Мягкий робот.* 2, 107–116 (2015).

41. Роджерс, CR и др. Сравнительная микроанатомия круговой мышцы рта шимпанзе и человека: эволюционное расхождение функции губ. *Дж. Анат.* 214, 36–44 (2009).