

Управление в социально-экономических системах

- © 2025 г. СИНЬБИНЬ ЧЖАН, канд. техн. наук (xinbinzhang@hit.edu.cn)
(Харбинский политехнический университет, Харбин),
ЧЖО ЧЭНЬ, магистр (986052851@qq.com),
ХАОСЯН СУ, магистр (463099610@qq.com)
(Юго-Западный университет науки и технологий, Мянъян),
ЛИГО ТАНЬ, канд. техн. наук (tanliguo@hit.edu.cn)
(Харбинский политехнический университет, Харбин),
ХУНВЭЙ ЛЮ, канд. техн. наук (liuhongwei@swust.edu.cn),
МАНЬЛУ ЛЮ, канд. техн. наук (liumanlu@swust.edu.cn),
ЦЗЯНЬВЭНЬ ХО, канд. техн. наук (huojianwen2008@hotmail.com)
(Юго-Западный университет науки и технологий, Мянъян),
С.В. НОВИКОВА, д-р. техн. наук (SVNovikova@kai.ru)
(Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева)

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ГИБКОГО ЗМЕЕПОДОБНОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО ПОДХОДА¹

Предложена новая конструкция пневматического гибкого манипулятора на основе последовательно-параллельной композитной структуры. Гибкий скелет устройства создан по принципу сочленений позвоночника змеи. Смежные позвонки снабжены расположенными с двух сторон воздушными резервуарами-суставами, соединенными параллельно с позвоночником. Пневматический сустав может быть согнут влево или вправо в плоскости движения робота путем изменения давления в пневмокамере. Разработана кинематическая модель, позволяющая рассчитать положение рабочего органа в зависимости от углов изгиба сочленений манипулятора, которые, в свою очередь, рассчитываются исходя из давления в пневмокамерах-суставах. Для разработанной конструкции предложен способ расчета планируемой траектории манипулятора на основе решения обратных задач кинематики. Приведены несколько примеров расчета оптимальных траекторий движения, отвечающих различным требованиям задачи. Результаты натуральных экспериментов показывают, что разработанный гибкий змееподобный манипулятор точно следует заранее спланированной траектории и демонстрирует широкие возможности перемещения на плоскости.

¹ Работа выполнена при поддержке Фонда Ключевой лаборатории робототехники для особых условий провинции Сычуань (21kftk04) и Фонда естественных наук провинции Хэйлуцзян (LN2023E037), Китай.

Ключевые слова: змееподобный манипулятор, гибкий манипулятор, мягкий манипулятор, пневматический привод, синтез системы планирования траектории, обратная задача кинематики, эмпирический подход, движение в ограниченном пространстве.

DOI: 10.31857/S0005231025090055, **EDN:** VMXHTP

1. Введение

С развитием наукоемких технологий конструкции изделий и устройств становятся, с одной стороны, все более сложными, а с другой – все более компактными. В результате их сборка, техническое обслуживание и другие операции часто должны выполняться в ограниченном пространстве сложной конфигурации. Для автоматизации рутинных процессов обслуживания подобных агрегатов требуется оборудование, способное подстраиваться под топологию пространства, избегать препятствия и выполнять функции обслуживания, не повреждая основную конструкцию.

Традиционные жесткие манипуляторы, например промышленные манипуляционные роботы, как правило, обладают способностью движения для удовлетворения разнообразных требований к конечной позе лишь в открытых пространствах. Однако относительно небольшое количество их сочленений и, соответственно, степеней свободы, существенно ограничивают их возможности при движении в узком ограниченном пространстве. Одним из способов решения данной проблемы является применение избыточных континуальных манипуляторов, которые обладают возможностями изгибаться при движении и обходить имеющиеся препятствия [1–7]. Например, в [1] представлен многозвенный кабельно-приводной манипулятор для автомобильной краскопультной установки, повышающий возможности движений манипулятора и его способность избегания препятствий. В [2, 3] использованы линейные или гибридные приводы воздушных шлангов для создания серии гибких манипуляторов, имитирующих хобот слона. В [4, 5] разработана серия гибких манипуляторов, способных обходить препятствия и достигать определенной точки в ограниченном пространстве. Континуальные манипуляторы повышают способность движения в трехмерном пространстве за счет увеличения степени свободы своих сочленений. Однако увеличение степеней свободы приводит к росту размеров и веса приводного механизма из-за использования дополнительных шлангов и кабелей, повышению сложности кинематических вычислений, что в свою очередь повышает сложность управления и вычислительные затраты. Все это в совокупности ограничивает их применение на практике. Кроме того, компоненты таких манипуляторов полностью состоят из жестких материалов, из-за чего могут возникнуть проблемы безопасности при их взаимодействии с окружающей средой.

В последние годы благодаря появлению новых пластичных материалов появляются так называемые мягкие манипуляторы, способные без труда проникать в сложные и узкие пространства за счет возможности активного и

пассивного изменения геометрической формы. При этом высокая податливость позволяет им безопасно контактировать с элементами окружающего пространства, в случае столкновений нанося минимальный ущерб как элементам среды, так и самим роботам. Мягкие манипуляторы имеют перспективы применения в промышленной сборке, уборке сельскохозяйственной продукции, малоинвазивной хирургии, бытовом обслуживании и других областях.

Мягкие манипуляторы часто имитируют бионические стратегии, наблюдаемые в природе. Например, в [8] используется имитация хобота слона, в [9] – движения червя, в [10–12] авторы имитируют способы фиксации выюнковых растений, в [13] – движение щупальцев осьминога и др. Подобные манипуляторы в качестве структурной опоры используют воздушные подушки, пневматические мышцы, пружины и др. и приводятся в действие с помощью пневматических приводов, сплавов с памятью формы или электроактивных полимеров [14–17]. Уникальные свойства мягких манипуляторов привлекают все большее внимание исследователей, стремящихся преодолеть ограничения существующих конструкций как жестких, так и гибких манипуляторов [18–27]. В качестве примера мягких манипуляторов можно привести континуальный манипулятор OctArm [18], который приводится в движение пневматическими мышцами и устанавливается на гусеничный мобильный робот. В [19] разработан мягкий манипулятор, использующий сотовую пневматическую сетку, которая обеспечивает стабильное управление движением и высокую грузоподъемность. В [20] авторы разработали мягкий манипулятор с использованием искусственных пневматических мышц, который имитирует движение хобота слона и обладает гибкими возможностями пространственного перемещения. В [21] описан мягкий манипулятор с жидкостными приводами, а авторы [22] собрали многосуставной мягкий манипулятор, в котором используются модули всенаправленного изгиба и кручения для эффективного перемещения в пространстве. В [23] предложен мягкий манипулятор для малоинвазивной хирургии, в котором всенаправленное изгибающее движение достигается за счет трех пневматических модулей. В [24] разработан самоорганизующийся мягкий манипулятор, созданный на основе биологических механизмов, таких как нейроны, пыльцевые трубки и толстостенные клетки тканей. Самоорганизующийся манипулятор, по описанию авторов, способен менять форму в зависимости от условий окружающей среды. В [25] разработан трехсуставной мягкий манипулятор, пригодный для работы под водой и позволяющий осуществлять точный захват предметов с помощью механизма противодействия изгибу и вытягиванию. В [26] предложен модульный мягкий робот-запястье с гидравлическим приводом, состоящий из вращающегося и изгибающегося модулей, способный выполнять тонкие и точные манипуляции в сложных условиях глубоководной среды. В [27] разработан мягкий манипулятор с сухожильным приводом, используя три модуля на основе шаблонов Креслинга, который может переключаться между двумя стабильными состояниями: гибкими суставами с низкой жесткостью на изгиб и жесткими звеньями с высокой жесткостью.

Несмотря на многочисленные исследования, посвященные мягким манипуляторам, эти работы все еще находятся в стадии становления, а их практическое применение сопряжено со многими трудностями. Одна из проблем заключается в том, что низкая жесткость мягких роботизированных систем снижает их управляемость и стабильность движения под действием гравитационных и инерционных сил, хотя их легко изменяемая геометрия и высокая пластичность позволяют им адаптироваться к сложным и узким пространствам. Одним из подходов к решению этой проблемы является разработка механизмов с изменяемой жесткостью, что может быть достигнуто за счет использования материалов с регулируемой жесткостью, таких как сплавы с низкой температурой плавления [28], или механизмов заклинивания [29, 30]. Другой подход заключается во внедрении гибких конструкций из твердых материалов для повышения жесткости робота в целом [31]. Первый подход позволяет изменять пластичность и геометрическую форму робота путем регулировки жесткости, однако использование механизмов с переменной жесткостью влияет не только на гибкость, присущую манипулятору, но и значительно усложняет конструкцию и управление. При втором подходе часть возможностей по изменению геометрии мягкого манипулятора будет потеряна.

В данной статье реализован второй подход к повышению управляемости и стабильности мягких манипуляторов. Разработан плоский гибкий змееподобный мягкий манипулятор, вдохновленный строением тела змеи, для движения в узком пространстве с препятствиями. Благодаря использованию жестко-гибкой композитной структуры несущей конструкции (позвоночника), манипулятор демонстрирует хорошую способность к изменению геометрической формы с одновременной стабильностью движения и простотой управления.

Для спроектированного змееподобного манипулятора необходимо разработать алгоритм расчета траектории, соответствующий особенностям движения предложенной конструкции. В настоящее время наибольшее распространение к планированию траектории манипуляторов получил подход, основанный на решении обратной задачи кинематики (Inverse Kinematics). Этот подход применяется как для жестких [32–34], так и мягких многозвенных манипуляторов [21, 35]. При этом обратная задача кинематики решается с использованием различных стратегий: в [33] расчет траектории опирается на решение кинематических дифференциальных уравнений, а в [32] решение предложено искать аналитически, без использования производных. Широкое распространение сегодня получают эвристические подходы. Так, в алгоритме FABRIK (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics) [36] координаты узлов многозвенного манипулятора вычисляются путем повторяющихся линейных сдвигов в сторону целевого положения рабочего органа. Алгоритмы расчета траектории без использования обратной кинематической задачи также описаны в литературе. Так, в [37] для расчета траектории используется специфическая модификация генетического алгоритма, в [38] авторы предлагают ис-

пользовать для планирования траектории аппарат нечеткой логики, а в [39] – гибридные нейро-нечеткие сети. Необходимо отметить, что подобные подходы, как правило, требуют больше вычислительных ресурсов и сложнее в реализации, чем алгоритмы, основанные на решении обратных кинематических задач. Предложенный в данной статье алгоритм расчета траектории базируется на обратном-кинематическом подходе. Кинематическая модель движения робота построена на основе сочетания теории и экспериментов. Прямая задача кинематики гибкого манипулятора формируется на основе результатов предварительно проведенных натуральных экспериментов, что позволяет адаптировать алгоритм под конкретный манипулятор с высокой точностью. Решение обратной задачи получено аналитически. Проведены натурные эксперименты по проверке подвижности гибкого манипулятора с предложенным алгоритмом планирования траектории, которые подтвердили его высокую эффективность при обходе препятствий.

2. Проектирование и сборка гибкого робота

Богатый диапазон движений и маневренность змей в сложной узкой среде можно объяснить уникальным строением их тела. В общем случае тело змеи представляет собой композитную структуру, состоящую как из жестких, так и гибких элементов. Надежной опорой тела является центральный позвоночник, покрытый мягкой мышечной тканью. Позвоночник змеи состоит из сотен позвонков, расположенных последовательно. Манипулируя мышцами в различных направлениях, соседние позвонки могут совершать горизонтальные колебания до 10 градусов и вертикальные до 3 градусов [40]. Хотя угол сгибания одного сустава ограничен, змея может осуществлять сильные изгибы всего тела за счет накопления множества сгибаний в отдельных суставах. Исходя из этого, манипулятор должен иметь аналогичную жестко-гибкую композитную структуру, состоящую из плоского гибкого позвоночника и приводных воздушных резервуаров.

Весь змееподобный манипулятор разделяется на шесть гибких секторов-суставов для независимого управления, при этом каждый гибкий сустав последовательно соединен с остальными, как показано на рис. 1. Каждый сектор-сустав, в свою очередь, состоит из шести последовательно соединенных небольших воздушных резервуаров-позвонков. Позвонки объединены в сустав с помощью плоских гибких шарниров, позволяющих сектору изгибаться в пределах плоскости сустава, при этом ограничивая продольный изгиб. Кроме того, на внешней стороне шарнира закреплены высокопрочные тросы. Их количество увеличивается от хвоста к голове, тем самым усиливая общую продольную прочность гибких суставов.

Между позвонками с обеих сторон расположены две пневмокамеры, выполняющие роль мышц для движения. Каждая пневмокамера содержит шесть внутренних воздушных резервуаров, что соответствует работе шести позвонков. Под действием изменения давления воздуха внутри пневмокамер

a

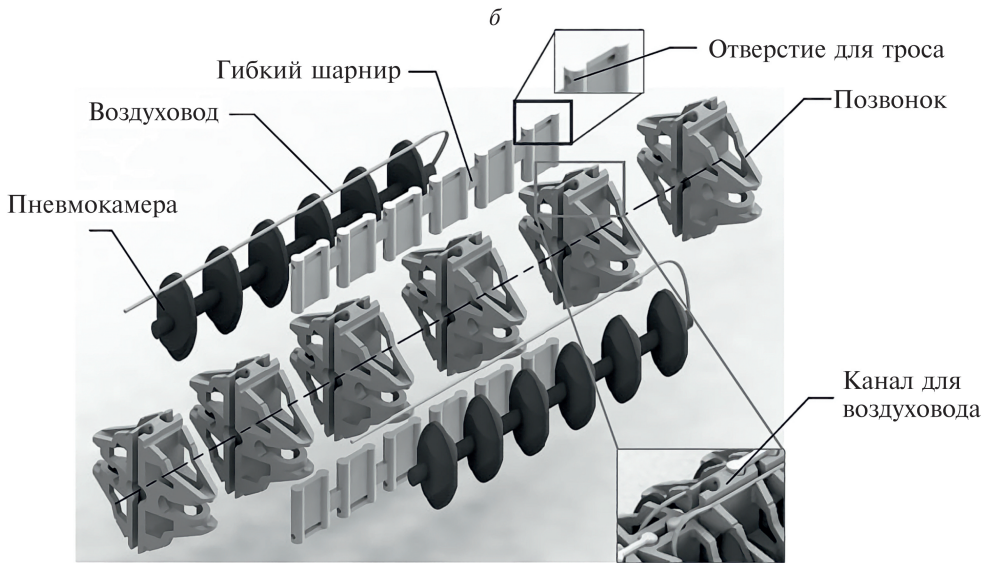


Рис. 1. Гибкий манипулятор в форме змеи: *a* – общий вид, *б* – структура гибкого сустава.

с обеих сторон конструкции они расширяются и удлиняются, тем самым регулируя угол изгиба всего гибкого сустава.

Для упрощения конструкции, за исключением конечного гибкого сустава, нижняя («брюшная») и верхняя («спинная») поверхности позвонков снабжены канавками. Глубина канавок увеличивается по мере продвижения от головы к хвосту робота, в результате чего манипулятор приобретает коническую биоинспирированную форму, напоминающую щупальце осьминога.

Для снижения веса и стоимости робота его позвоночник и гибкие шарниры изготавливались способом 3D-печати с использованием полилактидной кислоты (PLA) и термопластичного полиуретана (TPU) соответственно. Воздушные резервуары изготовлены с использованием силиконовой резины (Е640), известной своей высокой эластичностью, прочностью на разрыв и удлинением до 470%. Воздушные резервуары изготавливались методом литья из силикона. Матрица для формовки резервуаров состоит из двух частей. Литье осуществляется путем вставки железного стержня в верхнюю полость для создания двух половин резервуара. Вакуумная сушильная печь создает пониженное давление для предотвращения образования пузырей внутри литых резервуаров в процессе их изготовления. Готовый змееподобный манипулятор состоит из 6 секторов-суставов. Общая длина робота составляет 900 мм, вес около 2 кг.

3. Построение траектории перемещения змееподобного манипулятора на основе эмпирического подхода

В данном разделе разрабатывается модель, позволяющая управлять положением конечного эффектора (рабочего органа) манипулятора в двумерном пространстве. Будем считать, что эффектор располагается на «голове» робота. Прямая кинематическая модель гибкого змееподобного манипулятора при этом включает в себя два основных компонента: зависимость положения конечного эффектора от угла изгиба каждого гибкого сустава и зависимость углов изгиба механических суставов от давления в управляющих пневмокамерах.

3.1. Зависимость положения конечного эффектора манипулятора от угла изгиба суставов

Модель движения отдельного сектора-сустава гибкого змееподобного манипулятора иллюстрирует рис. 2. Здесь представлена упрощенная модель с постоянной кривизной, в результате чего получается плавная непрерывная

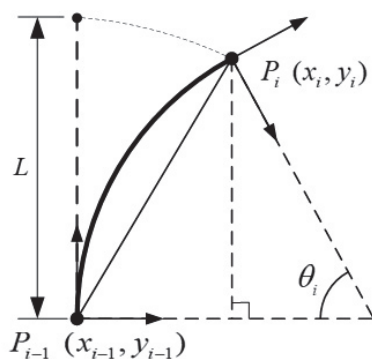


Рис. 2. Изгиб одного гибкого сустава.

кривая. Форма кривой определяется двумя переменными, связанными с гибким суставом: длиной сустава (L) и углом изгиба (θ_i).

На основе кинематической модели, представленной на рис. 2, можно определить матрицу преобразования T из начальной системы координат $P_{i-1}(x_{i-1}y_{i-1})$ в конечную систему координат $P_i(x_iy_i)$. Матрица T , таким образом, будет представлять собой кинематическое отображение из пространства положений суставов робота в пространство положения робота во внешнем пространстве. Начальная система координат $P_{i-1}(x_{i-1}y_{i-1})$ преобразуется в $P_i(x_iy_i)$ путем однократного смещения и однократного вращения:

1. Система координат $P_{i-1}(x_{i-1}y_{i-1})$ смещается вдоль двух координатных осей для перемещения точки P_{i-1} в точку P_i . На основе геометрических отношений получаем матрицу смещения

$$(1) \quad \text{Trans} \left(\frac{L}{\theta_i}(1 - \cos \theta_i), \frac{L}{\theta_i} \sin \theta_i \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{L(1 - \cos \theta_i)}{\theta_i} \\ 0 & 1 & \frac{L \sin \theta_i}{\theta_i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

2. Система координат вращается вокруг оси z на угол θ_i , матрица вращения имеет вид

$$(2) \quad \text{Rot}(z_i, \theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Перемножив эти две матрицы, получаем матрицу преобразования от начальной к конечной системе координат для одного сустава в виде

$$(3) \quad \begin{aligned} {}^{i-1}T_i &= \text{Trans} \left(\frac{L}{\theta_i}(1 - \cos \theta_i), \frac{L}{\theta_i} \sin \theta_i \right) \times \text{Rot}(z_i, \theta_i) = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & -\frac{L(\cos \theta_i - 1)}{\theta_i} \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & \frac{L \sin \theta_i}{\theta_i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Так как манипулятор состоит из нескольких последовательно соединенных суставов с одной степенью свободы изгиба, то положение концевой эффектора зависит от угла изгиба каждого сустава. Если все суставы используют модель постоянной кривизны круговой дуги, то в соответствии с формулой преобразования координат (3) можно получить однородную матрицу преобразования от системы координат сустава $P_n(x_n, y_n)$ к базовой системе координат $P_0(x_0, y_0)$ для n сегментов:

$$(4) \quad {}^0T_n = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times \dots \times {}^{n-2}T_{n-1} \times {}^{n-1}T_n.$$

Кроме того, если манипулятор установлен на ползуне, который может перемещаться вдоль оси y , то матрица однородных преобразований из неподвижной системы координат в базовую систему координат имеет следующий вид:

$$(5) \quad {}^bT_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & y_b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

В уравнении параметр y_b представляет собой расстояние, на которое перемещается ползун. Умножение матрицы bT_0 на матрицу преобразований bT_n дает матрицу однородных преобразований от неподвижного конца манипулятора к концевому эффектору манипулятора:

$$(6) \quad {}^bT_n = {}^bT_0 \times {}^0T_n \quad (n = 6).$$

При этом векторы положения и направления концевого эффектора задаются соотношениями

$$(7) \quad \begin{cases} P_n = {}^bT_n [0 \ 0 \ 1]^T, \\ D_n = {}^bT_n [0 \ 0 \ 1]^T - P_n. \end{cases}$$

3.2. Зависимость угла изгиба сустава от давления в управляющих пневмокамерах

При постоянной нагрузке существует однозначная зависимость между деформацией управляющих пневмокамер и давлением внутри них. В процессе работы угол изгиба сустава зависит от следующих факторов: давление, прикладываемое к воздушным резервуарам с обеих сторон позвоночника; физические характеристики расширения резервуаров; структура соединительных шарниров. Различное давление и разная степень расширения резервуаров в разных секторах-суставах приводит к различным углам изгиба. Уникальные характеристики изгиба каждого сустава гибкого змееподобного манипулятора определялись в ходе физических экспериментов.

Гистерезис – это свойство систем, мгновенный отклик которых на приложенные к ним воздействия зависит в том числе и от их текущего состояния. Гистерезис наблюдается в тех случаях, когда состояние системы в данный момент времени определяется внешними условиями не только в тот же, но и в предшествующие моменты времени. Для рассматриваемой задачи это означает, что на деформацию пневмокамеры влияют ее исторические состояния. Если в совместном движении участвуют две приводные пневмокамеры, то зависимость усложняется и решение задачи расчета угла изгиба сустава становится затруднительным. Поэтому в разработанном гибком манипуляторе используется метод управления одной пневмокамерой, который описывается следующим образом:

1) при увеличении угла изгиба сустава с одной стороны давление в пневмокамере с противоположной стороны увеличивается;

2) при уменьшении угла изгиба сустава с одной стороны пневмокамера с противоположной стороны разгерметизируется и сжимается.

Это означает, что одна пневмокамера приводит к одностороннему изгибу сустава. Этот метод управления устанавливает прямую зависимость между углом изгиба сустава и давлением в управляющей пневмокамере, что упрощает расчеты и облегчает последующее планирование траектории манипулятора.

Установка состоит из микроконтроллера STM32 для регулирования клапана, обеспечивающего управление давлением в воздушных камерах для вызова изгиба в змееподобном манипуляторе. На первом позвонке каждого сегмента установлен датчик угла изгиба высокой точности WT61C для измерения угла изгиба сустава. Эксперименты проводились при накачивании пневмокамеры с одной стороны, в то время как противоположная сторона оставалась ненагруженной. Диапазон давления воздуха устанавливался от 0 до 0,064 МПа. Было проведено несколько экспериментов, полученные кривые аппроксимировались полиномом четвертой степени. В результате были получены соотношения «давление–угол изгиба» для всех шести суставов, как показано на рис. 3. Результаты экспериментов с двумя зеркально расположенными пневмокамерами одного и того же сустава практически идентичны, поэтому в данной статье представлены результаты только для одной стороны робота. Расхождение между аппроксимирующей зависимостью «давление–угол изгиба» и фактическими экспериментальными значениями составляет менее 5%, отражая кинематические характеристики сустава с высокой точностью. Полученные кривые служат основой для решения прямых и обратных задач кинематики робота при расчете положения концевой эффектора манипулятора в зависимости от угла изгиба суставов.

Как видно из рис. 3, при одинаковых уровнях давления воздуха угол изгиба сустава в процессе нагнетания воздуха меньше по сравнению с процессом выкачивания. Максимальное угловое запаздывание составляет около 5 градусов, что свидетельствует о гистерезисных характеристиках пневмокамеры. Более того, из-за структурных отличий между гибкими суставами наблюдаются небольшие различия в соответствующих углах изгиба при одинаковом давлении воздуха с максимальным отклонением около 3 градусов.

Исходя из этого, при решении прямой (обратной) задачи кинематики между давлением воздуха и углом изгиба сустава необходимо сначала определить значение давления воздуха (угла изгиба сустава) на предыдущем сочленении, выбрать одну из двух кривых экспериментальных функций подгонки (для нагнетания либо для выкачивания воздуха) и затем получить решение.

Рабочее пространство робота включает пространство, которое может быть охвачено базисной точкой запястья (последнего звена) змееподобного манипулятора с установленным на нем концевым эффектором. Рабочее пространство является ключевым критерием для оценки динамической производительности манипулятора. Исходя из анализа предыдущего раздела диапазон

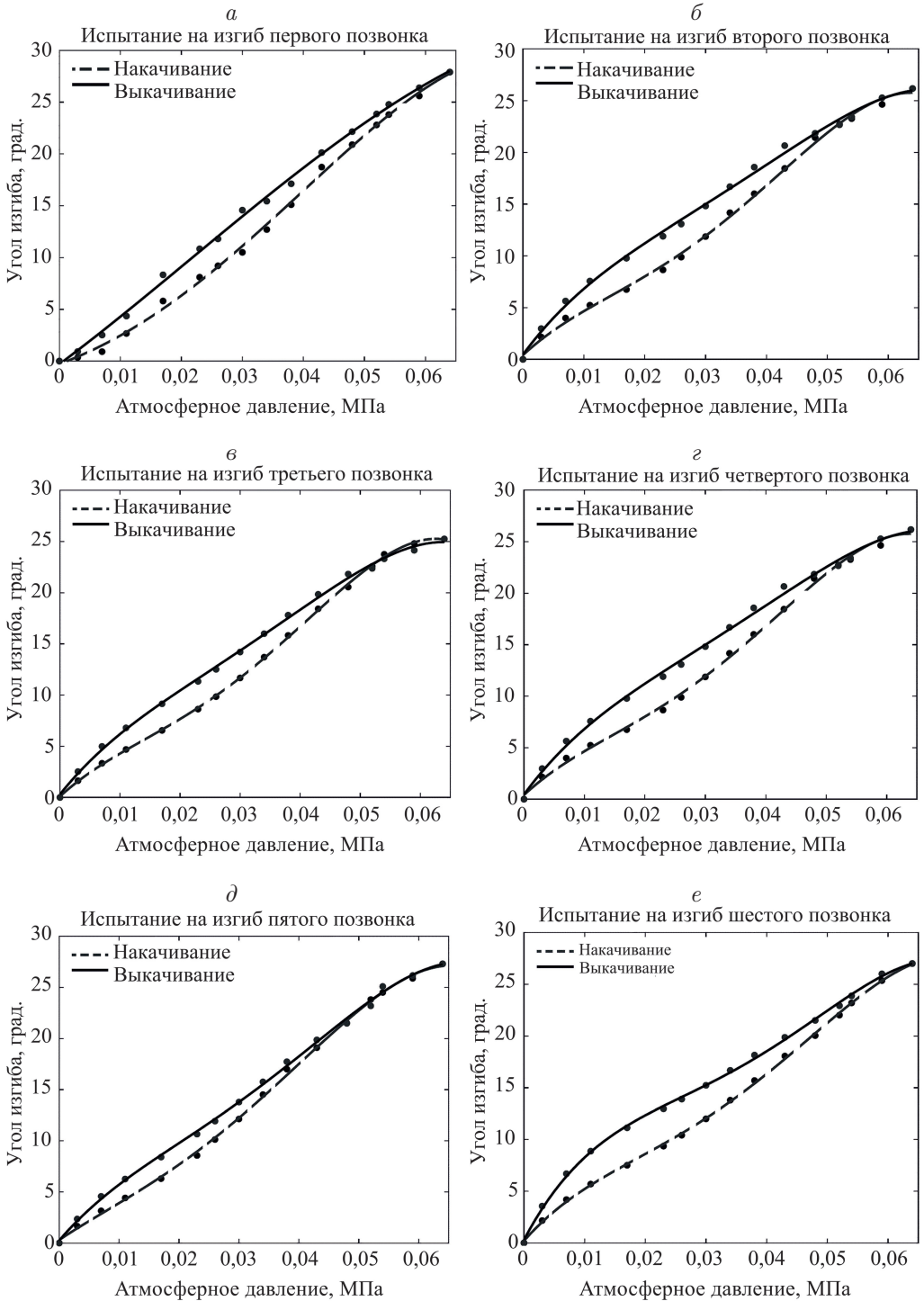


Рис. 3. Отображение зависимости между углами изгиба суставов и давлением в управляющей пневмокамере.

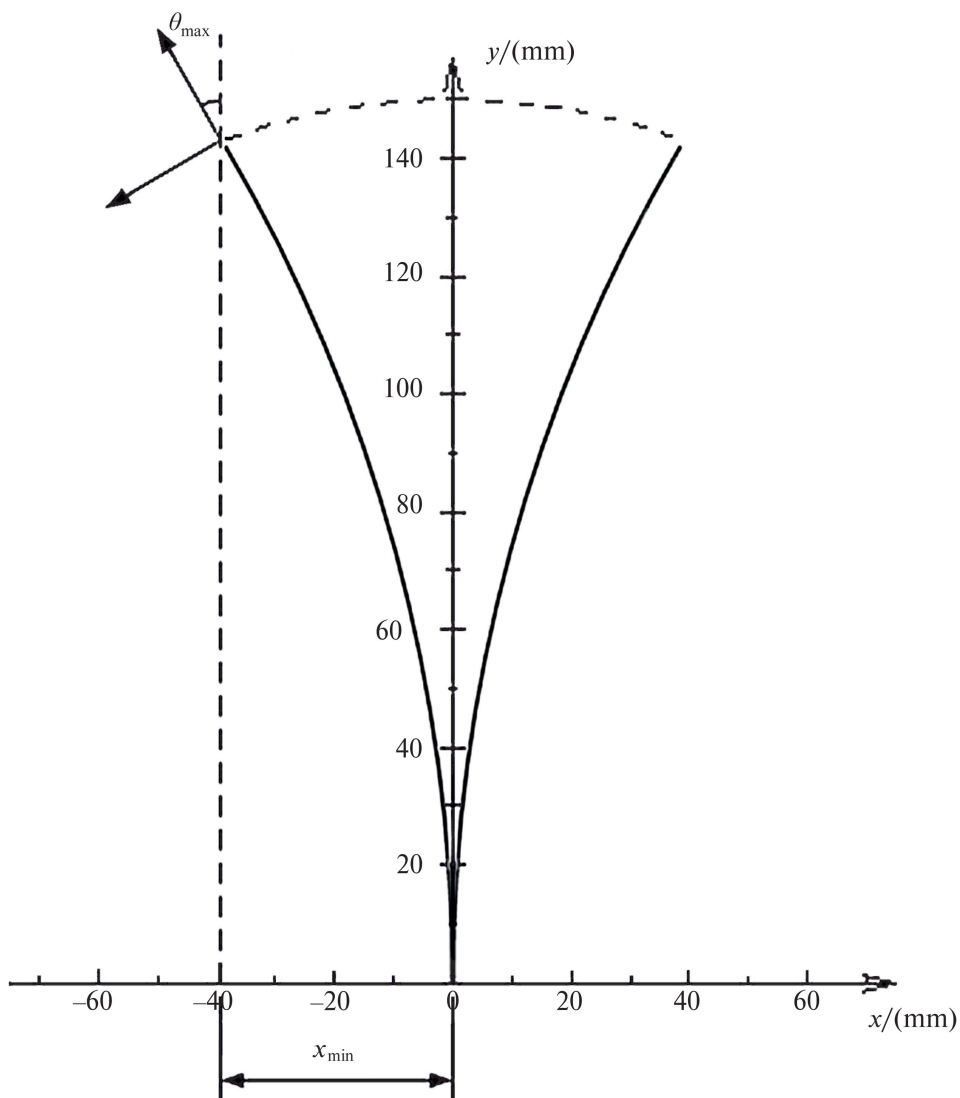


Рис. 4. Диапазон достижимости конечного сустава.

вращения гибких суставов составляет $[-30^\circ, 30^\circ]$, достижимый диапазон для конечного позвонка последнего сустава (головы) показан на рис. 4. Для моделирования рабочего пространства робота, перемещающегося на подвижном ползуне, был применен метод Монте-Карло с диапазоном для перемещения ползуна 1000 мм. В каждом диапазоне генерировалось 20 000 наборов случайных чисел для расчета положения концевой эффектора с использованием уравнений прямой кинематики. Результирующее рабочее пространство демонстрирует рис. 5.

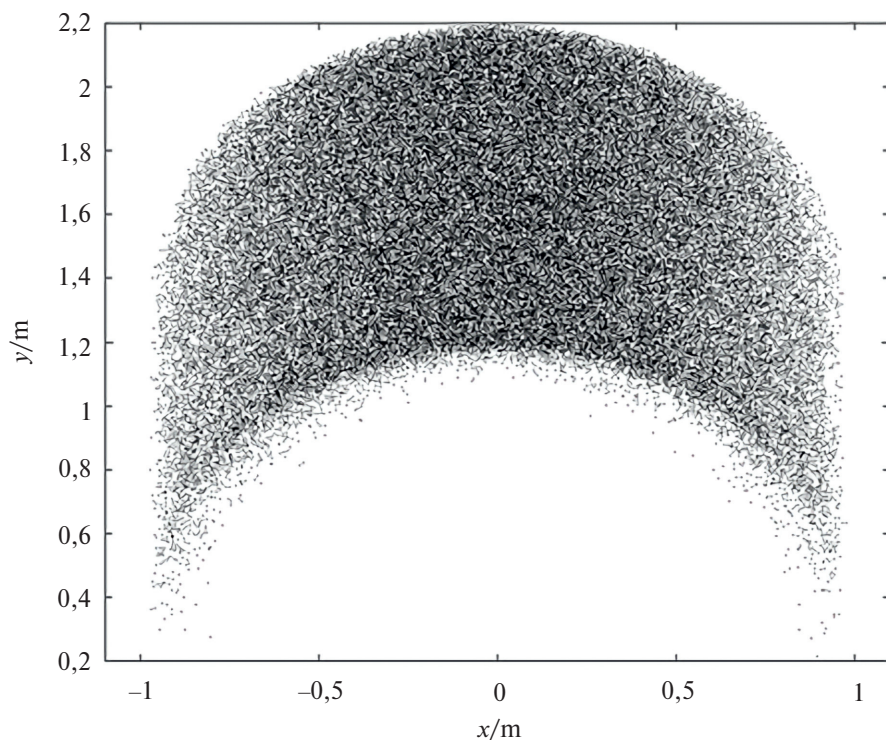


Рис. 5. Рабочее пространство гибкого змееподобного манипулятора.

3.3. Расчет углов изгиба последовательности суставов

Для решения обратной задачи кинематики по расчету потребного изгиба каждого сустава использовался прием равного изгиба суставов и компенсации линейного направления. Для перемещения конечного эффектора на величину x_l в направлении x (перпендикулярно направлению ползуна) и величину y_l в направлении y (вдоль направления ползуна) соответственно необходимо выполнить следующие шаги:

- 1) рассчитать требуемое смещение одного сустава в направлении x делением величины общего смещения x_l на общее количество суставов;
- 2) рассчитать угол изгиба сустава исходя из полученной величины смещения по оси x ;
- 3) рассчитать смещение одного сустава по оси y при изгибе на рассчитанную на предыдущем шаге величину;
- 4) рассчитать общее смещение конечного эффектора при изгибе по оси y путем умножения смещения одного сустава на их общее количество;
- 5) рассчитать разницу между смещением эффектора вследствие изгиба и требуемым смещением y_l ;
- 6) переместить направляющий ползун на полученное значение, компенсируя недостаток смещения робота по оси y .

4. Планирование траектории на базе эмпирической модели

4.1. Планирование на основе отслеживания положения концевого эффектора

С учетом большого количества суставов в пневматическом гибком манипуляторе индивидуальное планирование траектории с избеганием препятствий для каждого положения каждого сустава значительно снизит эффективность расчетов обратной кинематики. В данной работе применена стратегия слежения за головой, когда отслеживается только траектория конечного позвонка последнего сустава. Это значительно повышает эффективность планирования траектории, сохраняя гибкость манипулятора.

Для разработанного гибкого змееподобного манипулятора основной проблемой при использовании стратегии слежения за головой является определение фактической траектории движения рабочего органа. По сути, это позиция гибкого змееподобного манипулятора при достижении рабочей цели. При этом должны быть выполнены следующие условия:

1. Максимальная кривизна траектории должна быть меньше кривизны, соответствующей максимальному углу сгибания сустава.

2. Направляющий ползун должен являться касательной к траектории первого сустава манипулятора, а конец траектории должен достигать целевой точки.

3. Общая длина траектории является целым числом, кратным длине сустава.

4. Траектория не должна пересекать препятствия.

Исходя из этих требований, в данной статье рассматривается построение траекторий движения конечных эффекторов для трех различных сценариев задач.

4.1.1. Достижение указанной позиции и ориентации концевого эффектора

На основе моделирования и анализа из предыдущих разделов становится очевидно, что существует связь между положением конечных точек гибких секторов-суставов и углами изгибов суставов. При решении обратной задачи кинематики через интерполяцию пути существует вероятность столкнуться с точками, где решение отсутствует. Для преодоления данной проблемы в статье используется геометрический метод поиска пригодных путей, как показано на рис. 6. Метод состоит в следующем.

1. Поскольку целевая точка и направление движения определены заранее, целевую точку T можно принять в качестве начальной точки, а направление, противоположное целевому направлению $(-y_e)$, – в качестве начального направления. Поиск пути выполняется в обратном порядке, начиная с конечного эффектора и продвигаясь к основанию робота.

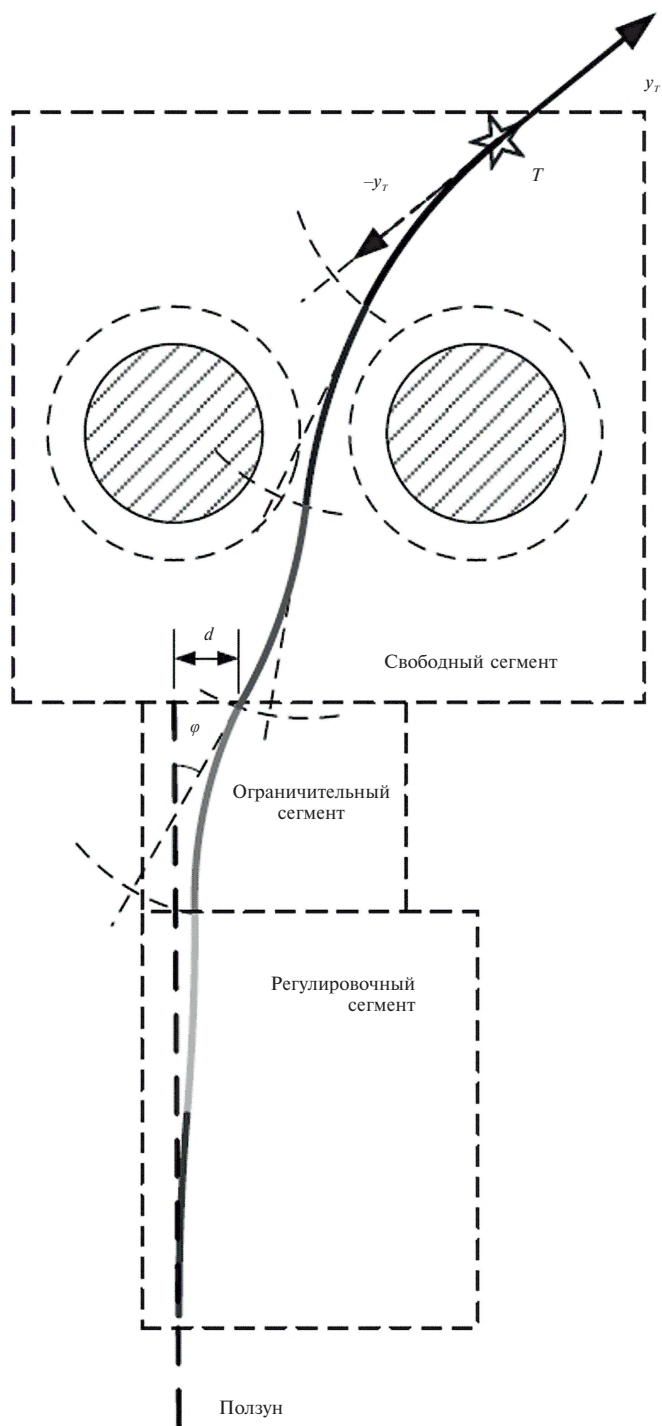


Рис. 6. Метод поиска траектории робота для заданной позиции и направления конечного эффектора.

2. Направление обратного движения y (см. рис. 4) выбирается как направление, противоположное y_T (см. рис. 6). Это позволяет определить рабочее пространство для концевой позвонка первого от головы сектора-сустава. В этой области определяется соответствующая позиция для создания эскиза первого сегмента гибкого сустава. Положение конечной точки для следующего сустава рассчитывается как решение следующей эмпирической оптимизационной задачи, состоящей из этапов А–D:

А. Конечная точка сустава не пересекается с препятствиями, т.е.

$$(8) \quad P_1 \notin R_0.$$

Здесь: R_0 – запрещенная область (множество точек модели препятствий). На рис. 6 примером запрещенной области являются две окружности R_1 и R_2 .

В. Расстояние d от конечной точки до линии направляющего ползуна должно быть минимально.

С. Если в результате применения двух вышеназванных принципов расстояние d между конечной точкой и линией направляющей оказывается больше, чем $2x_{\max}$, критерий оптимальности B меняется на D .

Д. Угол φ между направлением конца позвонка и линией направляющей должен быть минимальным.

3. Позиции последующих сегментов-суставов определяются аналогичным образом при движении от конца к основанию каждого сустава. Выбор кривых для отображения позиций суставов осуществляется с учетом приближения к прямой линии – направляющей движения ползуна без столкновений с препятствиями. Данные сегменты здесь названы «свободными сегментами» (см. рис. 6).

Для того чтобы последующие суставы могли достичь направляющей подвижного ползуна, на котором крепится основание всего робота, и при этом направляющая располагалась по касательной к первому позвонку сустава-основания, последний сустав свободного сегмента должен удовлетворять следующим условиям:

1) продолжение направления основания последнего сустава должно пересекаться с направляющей;

2) расстояние d от точки основания до линии направляющего ползуна должно быть не больше x_{\max} ;

3) угол φ между направлением основания сустава и направляющей ползуна должен быть не больше θ_{\max} .

Если эти условия не могут быть выполнены, то возникает необходимость перерасчета углов сочленений для суставов свободного сегмента. Если требование к расстоянию d не может быть выполнено, приемлемого решения не существует. Если требование к углу отклонения φ не может быть выполнено, ограничение на угол отклонения следует ввести в оптимизационную задачу при перепланировании, чтобы гарантировать, что конец сегмента находится

достаточно близко к направляющей, и при этом удовлетворяет требованию по максимальному отклонению угла.

Следующий участок назовем «ограничительный сегмент». Он состоит из одного гибкого сустава. Угол его изгиба ограничивается углом φ , при этом направление его основания параллельно направляющей.

Последний участок назовем «регулируемый сегмент». Он включает в себя два сустава. Задав углы этих двух суставов равными по величине, но противоположными по направлению, можно добиться того, что ориентация первого сустава останется неизменной при изменении расстояния от направляющей. В качестве угла изгиба необходимо выбрать угол, обеспечивающий прохождение первого позвонка первого сустава робота по касательной к направляющей. На этом поиск траектории движения концевой эффектора завершен.

В данном методе поиска траектории критичным является использование трех первых суставов для начальной ориентации робота, так как это минимальное количество, способное обеспечить правильное положение манипулятора относительно направляющей ползуна. Следовательно, лишь три сустава свободного сегмента способны обходить препятствия. Поэтому при данных условиях разработанный гибкий змееподобный манипулятор не может выполнять сложные маневры по обходу препятствий.

4.1.2. Подгонка под заданную траекторию

Метод подгонки положения суставов под заданную траекторию аналогичен предыдущему сценарию. Для свободного сегмента непосредственно выбираются те концы суставов, которые пересекаются с заданной траекторией. Метод подгонки, по сути, выстраивает суставы свободного сегмента по траектории. Поэтому фактическая траектория может иметь достаточно большую погрешность по сравнению с запланированной. Для сложных кривых, если конец свободного сегмента не удовлетворяет требованиям, указанным выше, подгонка траектории может оказаться недостижимой.

4.1.3. Достижение указанной позиции концевой эффектора

Описанные выше методы планирования траектории для достижения целевой точки имеют ограничения в сохранении гибкости манипулятора и способности к адаптации к окружающей среде. Это обуславливает необходимость разработки нового метода поиска траектории концевой эффектора.

В соответствии с ранее описанными этапами планирования траектории, очевидно, что основной проблемой является достижение такого положения для первого сустава всего робота, чтобы направляющая ползуна являлась касательной к кривой сустава в точке крепления робота. Во многих случаях для этого требуется не менее трех сочленений. Учитывая нефиксированную ориентацию конца каждого сегмента, планирование достижения заданного положения, начиная с направляющей, можно производить от основания к

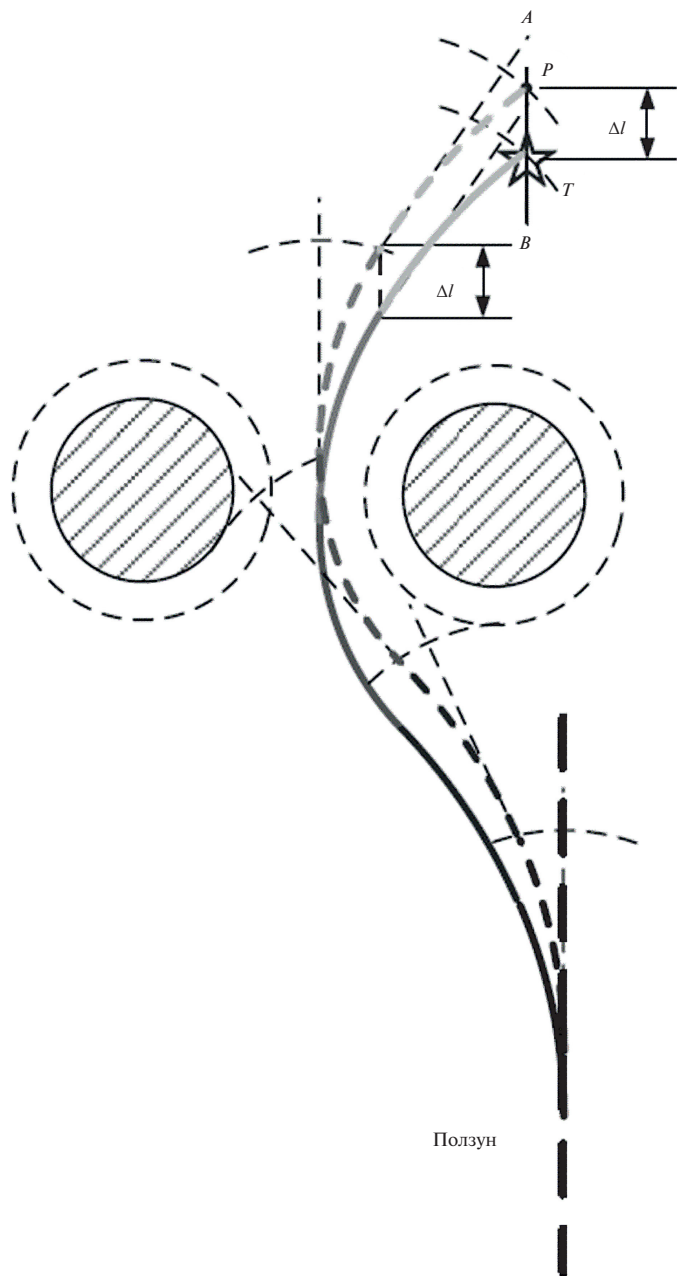


Рис. 7. Метод поиска траектории робота по допустимым областям.

концу сегмента, что увеличивает количество свободных суставов и упрощает процесс планирования траектории.

Пусть для основания каждого сегмента определены допустимые области расположения точки основания. Тогда шаги планирования выглядят следующим образом (см. рис. 7).

1. Обозначим целевую точку траектории символом T . Через точку T проводится прямая AB параллельно направляющей ползуна.

2. На расстоянии, не большем чем длина сустава L от прямой AB , выбирается точка из допустимой области в качестве временной точки начала траектории изгиба последнего сустава.

3. Определяется область достижимости для конца первого сустава из временной начальной точки.

4. Рассчитывается положение конечной точки сустава в области достижимости на основании построения оптимизационной задачи $A-D$, при этом расстояние d заменяется на расстояние между конечной и целевой точками.

5. Расчеты для последующих суставов повторяются аналогичным образом, продвигаясь в направлении конца каждого сустава. Когда конец сустава находится близко к целевой точке ($d \leq 2L$), критерий оптимальности B меняется на D : угол φ между конечным направлением и линией, соединяющей конечную точку и целевую точку, должен быть минимальным.

После завершения работы алгоритма будет получена траектория изгиба суставов робота, обеспечивающая достижение альтернативной целевой точки P . Расстояние между альтернативной P и реальной T целевыми точками вдоль прямой AB составляет Δl . Для достижения истинной целевой точки необходимо сдвинуть всю кривую траектории на величину Δl вдоль направления AB . Если после сдвига траектория пересеклась с моделями препятствий, то требуется спланировать траекторию заново с выбором на каждом шаге иных точек из допустимых областей в качестве временных точек основания суставов. Если пересечения отсутствуют, планирование считается завершенным.

Данный метод по сравнению с предыдущими методами позволяет робототехническому манипулятору использовать больше суставов для непосредственного выполнения поставленных задач, когда все суставы используются для достижения целевой точки и избегания препятствий. Следовательно, гибкий робот может эффективно исполнять задачи в более сложных условиях, что приводит к увеличению процента успешно выполненных задач.

4.2. Планирование траектории на основе пассивного изменения геометрической формы

Учитывая ограниченность прилагаемой для деформации пневмокамер силы, отметим, что диапазон движения концевой эффектора манипулятора при активных изгибах суставов часто ограничен. В то же время змееподобный манипулятор обладает гибкостью и широкими возможностями пассивного изменения геометрической формы. При соприкосновении сегментов-суставов с препятствиями во внешней среде манипулятор может самостоятельно автономно обходить эти препятствия за счет собственной гибкости. Это позволяет манипулятору адаптироваться к разнообразным сложным задачам и условиям работы.

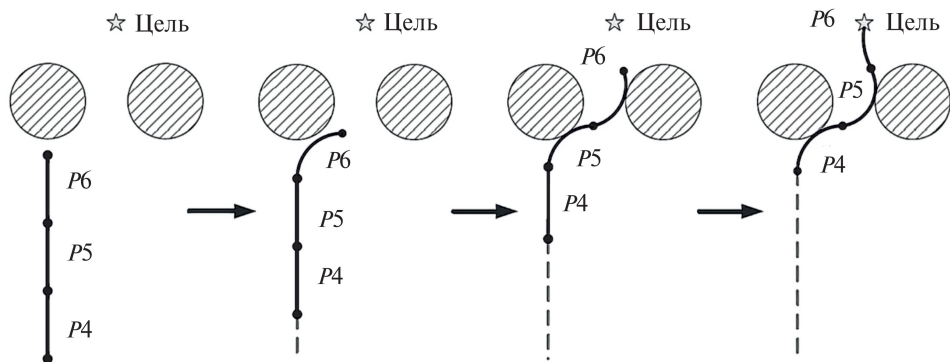


Рис. 8. Планирование траектории на основе пассивного изменения геометрической формы.

На примере, приведенном на рис. 8, во время движения гибкого манипулятора активное искривление потребовалось только для конечного сустава (головы). Остальные суставы изгибаются при контакте с препятствиями и завершают движение только за счет пассивного искривления.

Формула для расчета угла активного искривления последнего i -го соединения имеет вид

$$(9) \quad \theta_i = \frac{\|CP_{i-1}\|}{L} \times \arccos\left(\frac{FD_{i-1}}{\|F\| \times \|D_{i-1}\|}\right),$$

где C – точка контакта с препятствием, F – вектор касательной к контактной поверхности в базовой метке.

Эта стратегия эффективно использует гибкость змееподобного манипулятора, упрощает процесс планирования траектории и, соответственно, решение поставленной задачи, но может привести к частым столкновениям с элементами окружающей среды. Следовательно, такой подход эффективен в сценариях, где робототехнический манипулятор не вызывает повреждений при контакте с препятствием или где требования к безопасности относительно низки.

5. Эксперименты

5.1. Подготовка к эксперименту

Змееподобный манипулятор оснащен 12 приводными пневмокамерами для 6 суставов и 12 пропорциональными пневматическими клапанами управления, подключенными к компрессору. Робот установлен на линейном ползуне для обеспечения его выдвигания и втягивания посредством управления передвижением линейной подставки ползуна. На рис. 9 представлен состав системы управления робототехническим манипулятором. Персональный компьютер (PC) служит хостом для основной управляющей программы, написанной на языке C. Для передачи данных он взаимодействует с модулем микрокон-

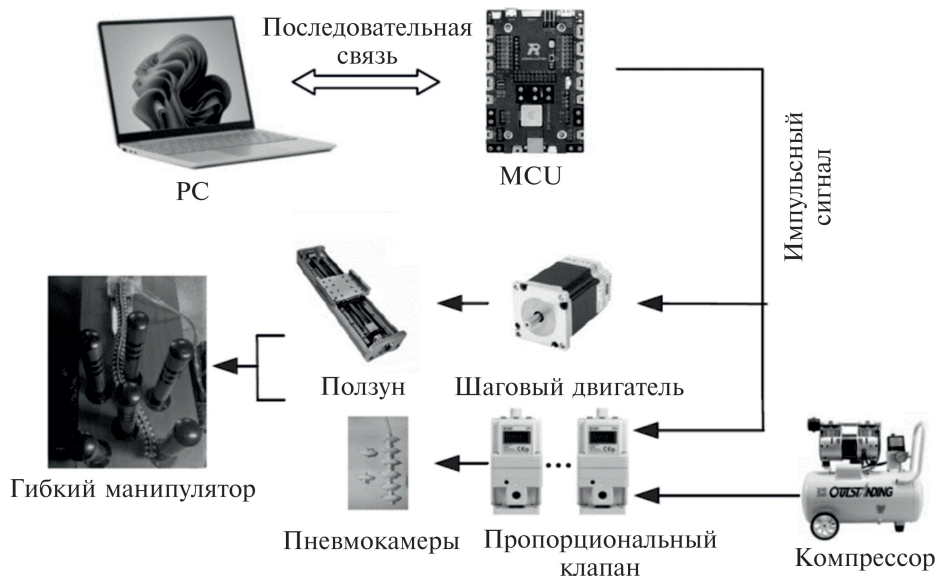


Рис. 9. Принципиальная диаграмма компоновки системы управления гибкого манипулятора.

троллера (MCU) по последовательному каналу связи. Исходя из заранее заданной стратегии движения манипулятора, компьютер рассчитывает углы изгиба каждого гибкого сустава в разные моменты времени и определяет перемещение линейной направляющей. Необходимые значения давления воздуха в 12 управляющих воздушных камерах определяются на основе зависимости между давлением воздуха и углами изгиба суставов. Затем MCU преобразует полученные расчетные значения в соответствующие электрические сигналы и передает их на пропорциональные клапаны и шаговые двигатели. В результате змееподобный манипулятор выполняет различные действия по перемещению и обходу препятствий.

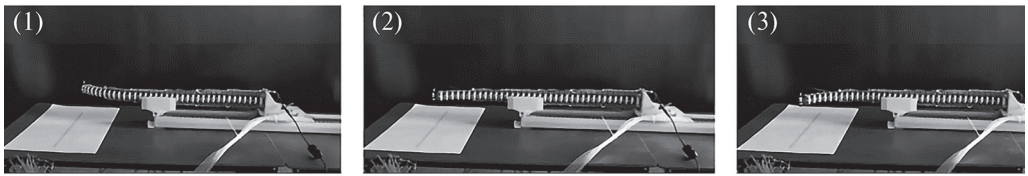
Были проведены две серии экспериментов: движение концевой эффектора вдоль заданной траектории без препятствий для исследования его производительности и движение концевой эффектора в заданную точку с препятствиями.

5.2. Эксперименты по движению по заданной траектории без препятствий

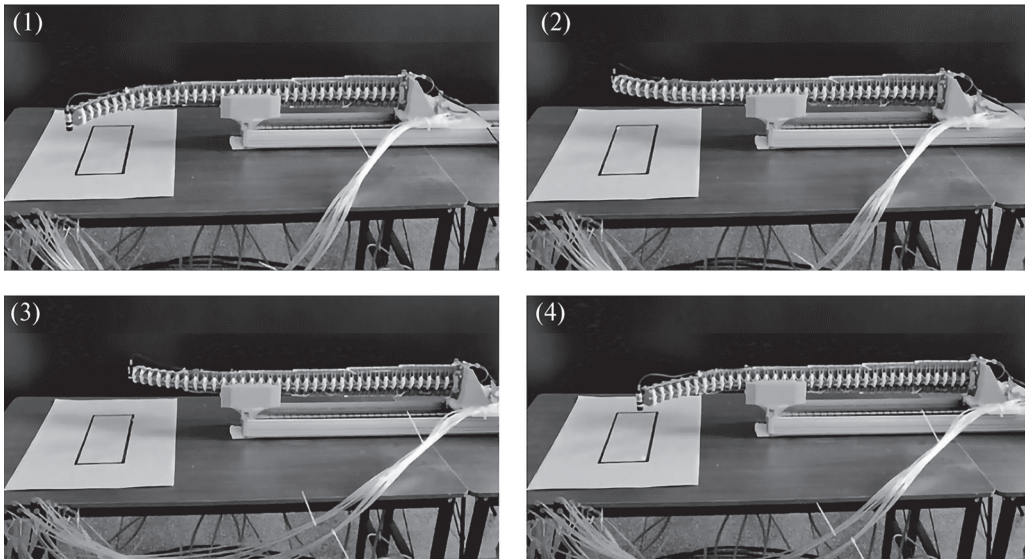
Эксперимент включает в себя создание определенных траекторий движения конечного эффектора для тестирования общей производительности гибкого змееподобного манипулятора, анализ возможностей его движения и оценку потенциального применения в двумерных операциях.

В данных экспериментах было протестировано движение по трем траекториям: прямая линия, прямоугольник и окружность.

a Отслеживание линейной траектории движения манипулятора



б Отслеживание составной линейной траектории манипулятора в виде прямоугольника



в Отслеживание круговой траектории манипулятора

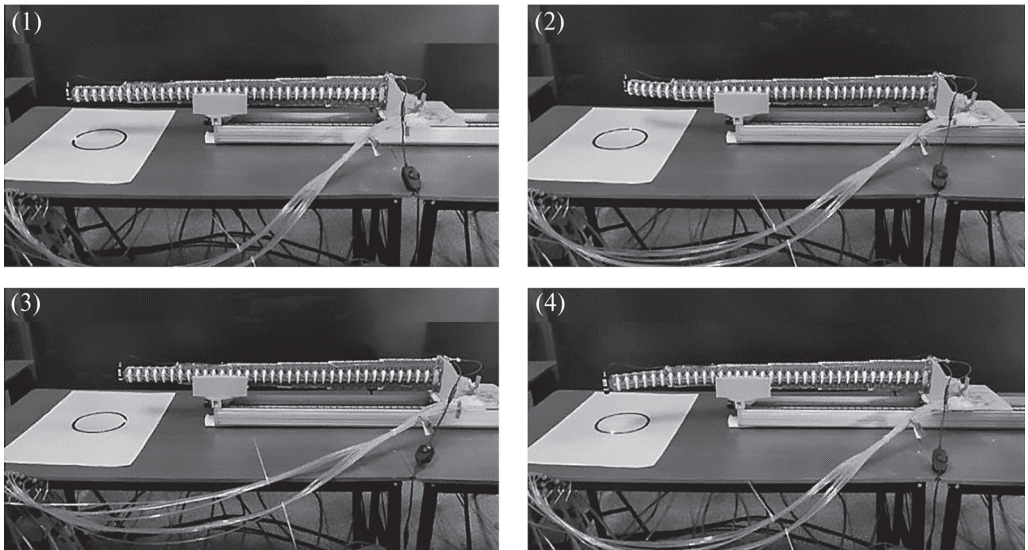


Рис. 10. Результаты эксперимента по управлению движением конечного эф- фектора без препятствий по заданной траектории.

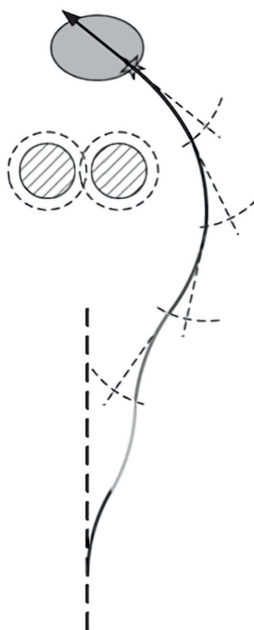
На конечный сустав манипулятора устанавливается лазер для отслеживания траектории движения конечного эффектора и расчета ошибки между реальной и заданной траекториями. Рисунок 10 демонстрирует ход трех экспериментов без препятствий: *а* – отслеживание линейной траектории, *б* – отслеживание составной линейной траектории в виде прямоугольника, *в* – отслеживание круговой траектории. Ошибка определялась как отклонение заданной траектории от реальной в конечный момент времени (конечная точка прямой линии, угол прямоугольника и конечная точка круга). В результате максимальное отклонение конечной позиции мягкого манипулятора не превышает 1%, а отклонение угла сустава в реальном эксперименте от расчетного не превышает 2%, что подтверждает высокую эффективность и точность движения гибкого змееподобного манипулятора при перемещении в двухмерном пространстве.

5.3. Эксперименты по активному избеганию препятствий на основе отслеживания положения конечного эффектора

Эксперимент по избеганию препятствий, изображенный на рис. 11, включает в себя два параллельно установленных опорных столба в качестве препятствий, а эффектор представляет собой стальную иглу, прикрепленную к



а – сцена эксперимента



б – планирование траектории конечного эффектора при заданном положении и ориентации



в – планирование траектории конечного эффектора при заданном положении

Рис. 11. Эксперимент по активному избеганию препятствий.

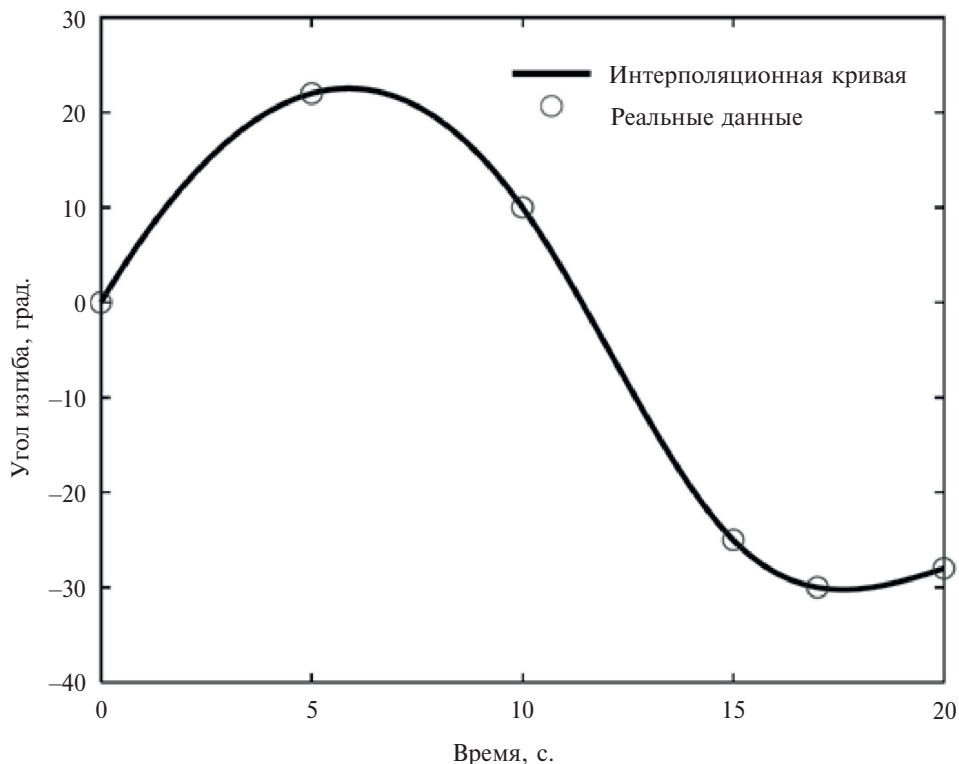


Рис. 12. Расчет траектории изменения угла конечного сустава во время огибания препятствия.

последнему позвонку манипулятора. Целью является воздушный шарик, расположенный позади препятствий. На основе предложенного ранее алгоритма планирования пути эффектор манипулятора должен обойти препятствия, чтобы достичь положения шарика и проколоть его.

Заданная экспериментальная сцена соответствует описанным ранее сценариям задач. На основе методов планирования траектории конечного эффектора, описанных в предыдущих разделах, построены траектории, изображенные на рис. 11.

Анализируя построенные траектории, можно сделать вывод, что при использовании метода с достижением заданного положения и ориентации требуется более длинный направляющий ползун и задействовано большее количество суставов. Так как в данном эксперименте нет строгих требований к положению конечного эффектора, была выбрана траектория, соответствующая методу достижения заданного положения.

Скорость подачи движущегося ползуна установлена на уровне 25 мм/с, время, необходимое для огибания препятствий, установлено в 20 секунд. Для расчета изменения во времени кривизны конечного сустава, несущего эффектор, применена интерполяция кубическим сплайном по четырем рассчитанным угловым положениям конечного эффектора, как показано на рис. 12.

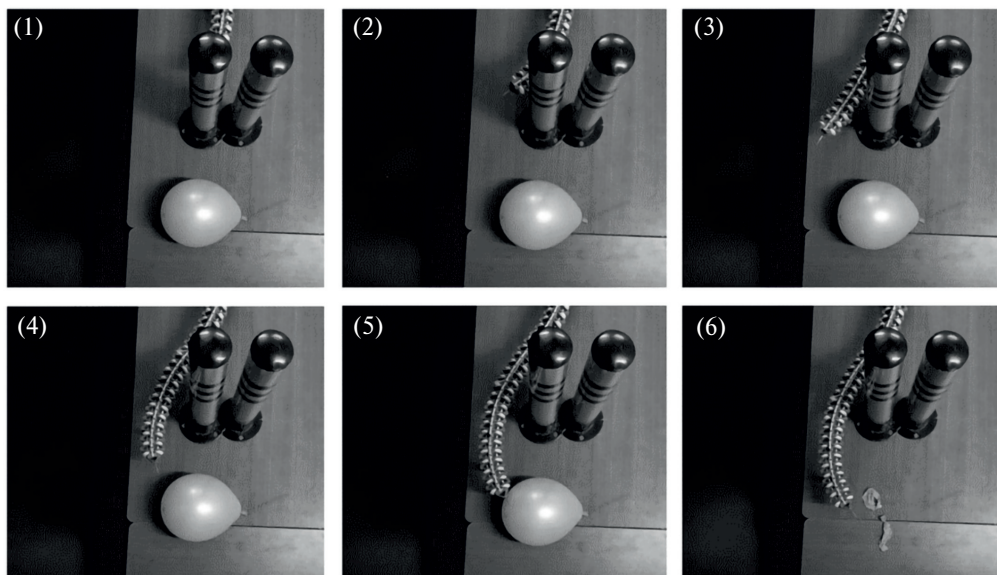


Рис. 13. Эксперимент по движению гибкого змееподобного манипулятора за счет активного изменения геометрической формы с обходом одного препятствия.

На 17-й секунде была добавлена дополнительная точка 30° , чтобы предотвратить превышение допустимого изгиба сустава.

Избегание препятствий гибким манипулятором достигается на основе полученной кривой изменения угла конечного сустава с использованием кинематической модели и стратегии отслеживания конечного эффектора. Рисунок 13 демонстрирует вид экспериментальной установки для движения за счет активного изменения геометрической формы гибкого манипулятора в процессе избегания препятствий. Манипулятор изначально располагается перед препятствием, перемещается вокруг препятствия, огибая его справа по ходу движения, и прокалывает воздушный шар, расположенный позади препятствия. Видно, что змееподобный манипулятор успешно завершил движение, обогнув препятствия по predetermined траектории, с отклонениями углов суставов от расчетных не более чем на 5%.

5.4. Эксперимент по избеганию препятствий на основе пассивного изменения геометрической формы

Для сценариев избегания препятствий на основе пассивного изменения геометрической формы, предложенного выше, контроль требуется только для расчета траектории движения головного сустава с эффектором, чтобы гарантировать движение манипулятора в нужном направлении между препятствиями. На рис. 14 представлен ход эксперимента по движению мягкого манипулятора на основе пассивного изменения геометрической формы для об-

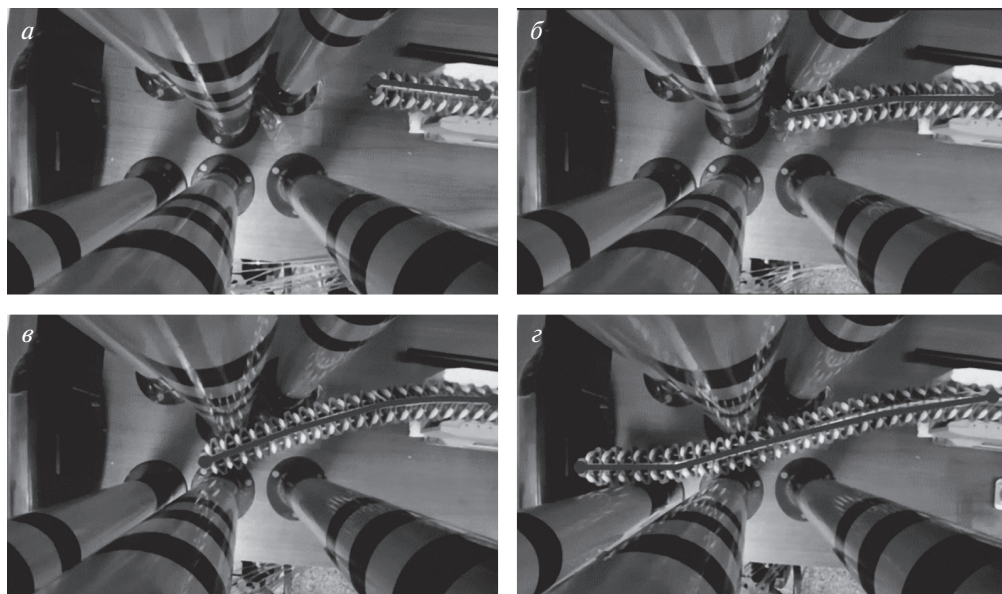


Рис. 14. Эксперимент по движению гибкого змееподобного манипулятора на основе пассивного изменения геометрической формы с обходом группы препятствий.

хода группы препятствий. Изменения углов изгибания суставов в процессе движения также проиллюстрированы на рис. 14. В результате эксперимента змееподобный манипулятор успешно завершил движение с обходом нескольких препятствий, и достиг установленной целевой позиции, используя свои активные и пассивные возможности по изменению геометрии.

6. Сравнительный анализ предложенного подхода с известными методами

В настоящем исследовании предложена оригинальная конструкция гибкого змееподобного манипулятора и методика построения системы планирования его траекторий на основе реальных экспериментов. Для анализа эффективности разработанной конструкции и соответствующей системы планирования траектории проведено сравнение предложенного подхода с известными конструкциями и методами расчета траекторий гибких манипуляторов.

6.1. Сравнение конструкций

Сравнение особенностей разработанной конструкции гибкого змееподобного манипулятора с известными аналогами представлено в табл. 1.

Как следует из табл. 1, представленная в данной работе конструкция гибкого змееподобного манипулятора обладает рядом преимуществ перед анало-

Таблица 1. Характеристики гибких манипуляторов различных конструкций

Тип манипулятора	Тип конструкции	Тип привода	Кол-во степеней свободы	Способ изменения геометрической формы	Способ крепления/перемещения	Метод расчета траектории
Промышленная роботизированная рука (KUKA LBR IIWA, Rozum PULSE и т.п.)	с постоянной жесткостью (высокая жесткость)	механический	3–7	активная	на стационарной подставке	Построение траектории на основе промышленных программ
Многозвеньевая роботизированная рука [1]	с постоянной жесткостью (средняя жесткость)	кабельный	5–20	активная	на стационарной подставке	Нет информации
Сверхмягкий манипулятор из жидкого эластомера [21]	с постоянной жесткостью (низкая жесткость)	гидравлический	15	пассивная/активная	на стационарном подвесе	Расчет траектории на основе отслеживания положения при помощи компьютерного зрения
Мягкий манипулятор на основе заклинивания [29]	с изменяемой жесткостью	затвердевающий под действием давления градулат	–	активная	на подвижном носителе/ползуне	Построение траектории на основе импульсных команд
Предложенная модель гибкого эмсеобразного манипулятора	с изменяемой жесткостью	пневматический	16	пассивная/активная	на ползуне	Расчет траектории на основе экспериментальных исследований

гами, в частности возможностью пассивного изменения геометрии, изменяемой жесткостью и большим количеством степеней свободы. Ключевой особенностью является специфический алгоритм расчета траектории, разрабатываемый на основе физических данных конкретного змееподобного манипулятора путем проведения серии экспериментов.

6.2. Сравнение подходов к построению траектории перемещения

Рассмотрим несколько подходов для планирования траектории, описанных в современной литературе.

– Планирование траектории многозвенного редундантного манипулятора на основе генетического алгоритма [37]: траектория манипулятора представляется координатами его узлов, конечный узел ассоциирован с концевым эффектором. Траектория должна обеспечить минимальное расхождение между положением концевого эффектора и целевой точкой. Траектория формируется как решение оптимизационной задачи, где целевой функцией выступает отклонение координат концевого эффектора от заданных координат цели, ограничениями выступают требования непересечения звеньев манипулятора с препятствиями и друг с другом и допустимости углов поворота звеньев. Оптимизация производится на основе генетического алгоритма, где траектории выступают в качестве хромосом, а координаты узлов в качестве генов. Алгоритм повторяется многократно для получения «генеалогического древа» – последовательности пригодных траекторий, переводящих манипулятор из заданного начального положения в конечное.

– Расчет траектории манипулятора на основе аналитического решения обратной задачи кинематики [32]: определяются углы поворотов трехзвенного манипулятора (плечо–предплечье–схват) исходя из требуемого положения последнего звена (схвата). Метод заключается в последовательном составлении и решении систем нелинейных уравнений, отражающих зависимости между углами поворотов последующего и предыдущего звеньев. За счет относительно простой конфигурации и ограничения по количеству звеньев задача имеет единственное решение.

– Расчет траектории многозвенного манипулятора на основе алгоритма FABRIK (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics) [36]: траектория многозвенного манипулятора рассчитывается согласно многократному повторению прямых и обратных итераций – проходов. Начальный узел считается жестко закрепленным, на последнем узле условно располагается концевой эффектор. На прямом проходе движение узлов осуществляется от концевого эффектора к начальному узлу. Последний узел, с концевым эффектором, перемещается на позицию, указанную в качестве цели. Затем каждый последующий узел передвигается в позицию, лежащую на прямой, соединяющей его и предыдущий, уже сдвинутый, узел, на расстояние, равное длине звена. В результате после того, как все узлы последовательно сдвинуты, начальный узел окажется смещенным относительно своей первоначальной позиции. Так

Таблица 2. Особенности методов построения траекторий для многозвенных манипуляторов

	Группа методов	Тип алгоритма	Кол-во звеньев манипулятора	Размерность рабочего пространства	Учет особенностей конкретного манипулятора	Обход препятствий	Перемещение конструкции
Расчет траектории на основе генетических алгоритмов	Случайный поиск	Однопроходный, итерационный	Не ограничено	3D	нет	да	требуется модификация алгоритма
Аналитический расчет траектории	Аналитическая модель	Однопроходный, без итераций	2–3	3D	частично	нет	нет
Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics (FABRIK)	Эвристический алгоритм	Двухпроходный, итерационный	Не ограничено	3D	нет	требуется модификация алгоритма	нет
Расчет траектории на базе эмпирического подхода	Эмпирический алгоритм	Двухпроходный, итерационный	Не ограничено	2D	да	да	да

как начальный узел считается неподвижным и его позиция не может изменяться, производится коррекция положения начального узла – он возвращается в начальную позицию. После чего осуществляется обратный проход – все узлы манипулятора вновь сдвигаются, но уже от начального к конечному узлу по тому же принципу, что и в прямом проходе. Прямой и обратный проходы повторяются до тех пор, пока конечной эффектор не окажется достаточно близко к заданной целевой позиции.

Сравнение характеристик рассмотренных методов, а также предложенного метода на базе эмпирического подхода приведено в табл. 2.

Предложенный метод, в отличие от других существующих методов построения траектории, ориентирован на конкретный манипулятор, так как расчет осуществляется на основе эмпирических данных, полученных в ходе экспериментов. Аналитический метод, также предполагающий расчеты для конкретного манипулятора, основан на теоретических, но не на практически измеренных характеристиках устройства. Предложенный алгоритм не предназначен для изменения положения манипулятора в трехмерном пространстве, однако способен учитывать перемещение начального узла за счет подвижного ползуна.

6.3. Сравнение вычислительных затрат

Для сравнения предложенного алгоритма с другими алгоритмами построения траекторий манипуляторов с точки зрения вычислительных затрат оценим вычислительную временную сложность для соответствующих алгоритмов. Вычислительная временная сложность оценивается функцией зависимости количества требуемых операций от размера входных данных n . В данном разделе приведены значения временной сложности при $n \rightarrow \infty$, т.е. асимптотической вычислительной временной сложности [41].

– *Оценка вычислительной сложности генетического алгоритма.* При обычном выборе способов преобразования (точечная мутация, односточный кроссовер, выбор по принципу рулетки) сложность генетических алгоритмов составляет $O(g(nt + nt + n))$, где g – количество поколений, n – размер популяции, t – размер особей. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма может быть оценена как $O(n^2)$.

– *Оценка вычислительной сложности метода аналитического расчета траектории.* Вычислительная сложность аналитического метода самая низкая. Так как алгоритм не предполагает итерационных вычислений, объем вычислений будет оставаться постоянным, и сложность составляет $O(1)$.

– *Оценка вычислительной сложности алгоритма Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics.* Алгоритм FABRIK состоит из внутреннего и внешнего циклов. На внутреннем цикле последовательно производятся прямой и обратный проходы алгоритма, каждый такой проход в вычислительном плане порождает дерево разбиения глубиной $\log n$. Следовательно, сложность внутреннего цикла с двойным проходом составляет $O(\log n + \log n)$,

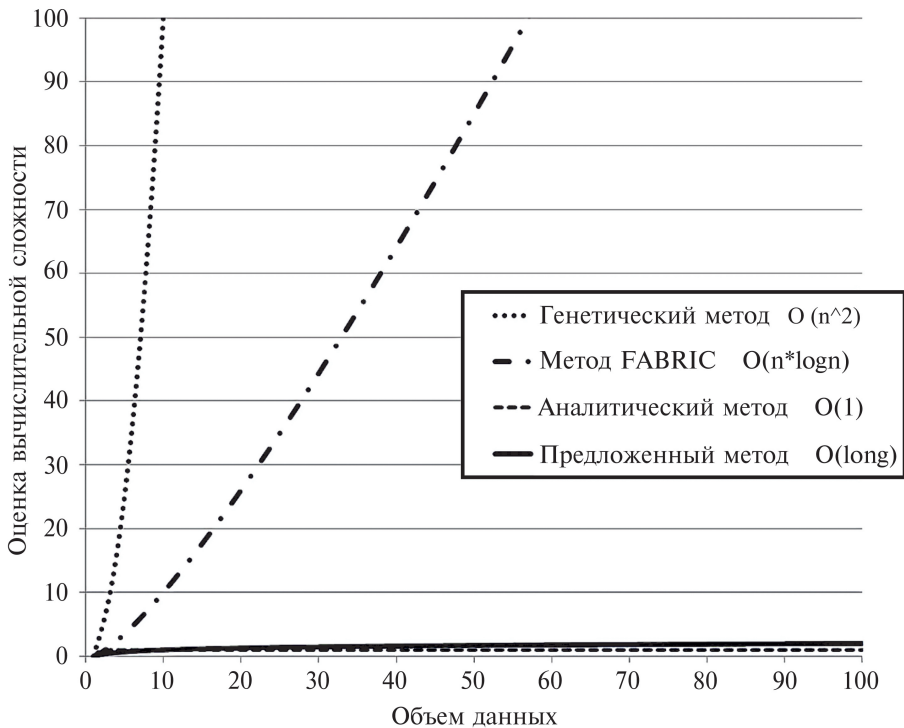


Рис. 15. Рост вычислительной сложности с увеличением объема данных для рассмотренных методов расчета траектории гибких манипуляторов.

что при $n \rightarrow \infty$ эквивалентно сложности $O(\log n)$. Внешний цикл алгоритма повторяет внутренний цикл число раз, пропорциональное объему входных данных n . Следовательно, вычислительная сложность оценивается как $O\left(\sum_{j=0}^n O(\log n)\right) = O(n \times \log n)$.

– Оценка вычислительной сложности алгоритма расчета траектории на базе эмпирического подхода. Предложенный алгоритм, в отличие от рассмотренного выше алгоритма FABRIC, состоит из единственного цикла. Внешний цикл отсутствует, так как конечное звено расположено на ползуне и может менять свое местоположение. Следовательно, сложность предложенного алгоритма составляет $O(\log n)$.

Графически сравнение оценок вычислительной сложности представлено на рис. 15.

7. Заключение

В данной статье на основе результатов международных исследований в области мягких роботов-манипуляторов представлены проектирование и разработка змееподобного гибкого манипулятора с 6, 13-ю степенями свободы на основе формы строения позвоночника змей. Общая конфигурация представляет собой последовательно-параллельную композитную структуру, управ-

ляемую 12 комплектами пневмокамер с обеих сторон манипулятора и линейной направляющей – ползуном. В работе выполнено кинематическое отображение пространства суставов манипулятора в рабочее пространство с помощью модели постоянной кривизны. На основе экспериментов была установлена зависимость между давлением воздуха в пневмокамере и углом изгиба сустава манипулятора. Для моделирования кинематики робота в направлении движения вперед был использован метод одностороннего движения по линейному ползуну.

Для удовлетворения требований практического инженерного применения гибкого манипулятора были разработаны методы планирования траектории для обхода препятствий. На основе подхода отслеживания положения концевой эффектора были предложены два метода расчета траектории движения робота. Также был проанализирован метод обхода препятствий на основе пассивного изменения геометрической формы мягкого робота. Проведенные физические эксперименты подтвердили реализуемость и корректность разработанных методов.

Сравнение предложенного подхода к проектированию гибкого манипулятора с известными проектными решениями продемонстрировало оригинальность разработанной конструкции. Преимуществом разработанного змееподобного гибкого манипулятора является возможность пассивного изменения его геометрической формы во время движения для обхода препятствий, а также изменяемая жесткость с большим количеством степеней свободы. Манипулятор предназначен для передвижения и работы на плоскости, что делает его применение предпочтительным в ряде практических задач. Разработанный для расчета траектории перемещения манипулятора алгоритм основан на экспериментальных измерениях характеристик пневматических камер-суставов, обеспечивающих сгибание–разгибание гибкого змееподобного манипулятора. Алгоритм имеет низкую вычислительную сложность, уступая лишь аналитическому моделированию, которое, в свою очередь, не может обеспечить широких возможностей по изменению траектории.

Планируется дальнейшее расширение исследований по конструированию и планированию траектории гибкого змееподобного манипулятора, а также по его управлению. В частности, будут исследованы методы управления роботом, позволяющие добиться переменной жесткости манипулятора. Также манипулятор может быть оснащен несколькими встроенными датчиками для отслеживания положения в реальном времени, что повысит скорость реакции и точность управления роботом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Larson O., Davidson C.* Flexible arm, particularly a robot arm: U.S. Patent No. 4393728. 19 Jul. 1983.
2. *Hannan M.W., Walker I.D.* Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots // *J. Robot.* 2003. No. 20(2). P. 45–63.

3. *McMahan W., Jones B., Walker I.D.* Design and implementation of a multi-section continuum robot: Air-Octor // 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2005. P. 2578–2585.
4. *Robert B.* Robots in the nuclear industry: a review of technologies and applications // *Indust. Robot: Int. J.* 2011. No. 38(2). P. 113–118.
5. *Rob B., Andrew G.* Nuclear snake-arm robots // *Indust. Robot: Int. J.* 2012. No. 39(1). P. 6–11.
6. *Camarillo D.B., Milne C.F., Carlson C.R., et al.* Mechanics Modeling of Tendon-Driven Continuum Manipulators // *IEEE Transactions on Robotics.* 2008. No. 24(6). P. 1262–1273.
7. *Xu W., Liu T., Li Y.* Kinematics, Dynamics, and Control of a Cable-Driven Hyper-Redundant Manipulator // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.* 2018. No. 23(4). P. 1693–1704.
8. *Rolf M., Steil J.* Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the bionic handling assistant // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.* IEEE Publ. 2012. P. 3440–3446.
9. *Yang G.Z., Bellingham J., Dupont P.E., et al.* The grand challenges of Science Robotics // *Sci. Robot.* 2018. No. 3(14). P. eaar7650.
10. *Dumais J., Forterre Y.* Vegetable Dynamicks: the role of water in plant movements // *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 2012. No. 44. P. 453–478.
11. *Argiolas A., Puleo G.L., Sinibaldi E., et al.* Osmolyte cooperation affects turgor dynamics in plants // *Sci. Rep.* 2016. No. 6. P. 30139.
12. *Chen Z.C., Yamaji N., Fujii-Kashino M., et al.* A cationchloride cotransporter gene is required for cell elongation and osmoregulation in rice // *Plant. Physiol.* 2016. No. 171. P. 494–507.
13. *Margheri L., Laschi C., Mazzolai B.* Soft manipulator inspired by the octopus: I. From biological functions to artificial requirements // *Bioinspir. Biomim.* 2012. No. 7(2). P. 1–12.
14. *Wirekoh J., Park Y.L.* Design of flat pneumatic artificial muscles // *Smart Materials and Structures.* 2017. No. 26(3). P. 035–009.
15. *Rodrigue H., Wang W., Han M.W., et al.* An overview of shape memory alloy-coupled actuators and robots // *Soft Robot.* 2017. No. 4. P. 3–15.
16. *Miriyev A., Stack K., Lipson H.* Soft material for soft actuators // *Nature Communications.* 2017. No. 8(1). P. 596–605.
17. *Mirvakili S.M., Sim D., Hunter I.W., et al.* Actuation of untethered pneumatic artificial muscles and soft robots using magnetically induced liquid-to-gas phase transitions // *Science Robotics.* 2020. No. 5(41). P. eaaz4239.
18. *Neppalli S., Jones B., McMahan W., et al.* OctArm – A soft robotic manipulator // 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2007. P. 2569–2569.
19. *Hao J., Wang Z., Jin Y., Chen X., Peijin L., Gan Y., Chen X.* Hierarchical control of soft manipulators towards unstructured interactions // *Int. J. Robot. Res.* 2021. No. 40. P. 0278364–92097936.
20. *Escande C., Chettibi T., Merzouki R., Coelen V., Pathak P.M.* Kinematic calibration of a multisection bionic manipulator // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.* 2015. No. 20(2). P. 663–674.

21. *Marchese A.D., Rus D.* Design, kinematics, and control of a soft spatial fluidic elastomer manipulator // *Int. J. Robot. Res.* 2015. No. 35(7). P. 840–869.
22. *Yan J., Zhang X., Xu B., Zhao J.* A new spiral-type inflatable pure torsional soft actuator // *Soft Robotics.* 2018. No. 5(5). P. 527–540.
23. *Thuruthel T.G., Shih B., Laschi C., Tolley M.T.* Soft robot perception using embedded soft sensors and recurrent neural networks // *Science Robotics.* 2019. No. 4(26). P. eaav1488.
24. *Greer J.D., Blumenschein L.H., Alterovitz R., Hawkes E.W., Okamura A.M.* Robust navigation of a soft growing robot by exploiting contact with the environment // *Int. J. Robot. Res.* 2020. No. 39(14). P. 1724–1738.
25. *Gong Z., Fang X., Chen X., Cheng J., Xie Z., Liu J., Wen L.* A soft manipulator for efficient delicate grasping in shallow water: Modeling, control, and real-world experiments // *Int. J. Robot. Res.* 2021. No. 40(1). P. 449–469.
26. *Kurumaya S., Phillips B.T., Becker K.P., Rosen M.H., Gruber D.F., Galloway K.C., Suzumori K., Wood R.J.* A modular soft robotic wrist for underwater manipulation // *Soft Robot.* 2018. No. 5. P. 399–409.
27. *Kaufmann J., Bhovad P., Li S.* Harnessing the multistability of kresling origami for reconfigurable articulation in soft manipulators // *Soft Robotics.* 2022. No. 9(2). P. 212–223.
28. *Schubert B.E., Floreano D.* Variable stiffness material based on rigid low-melting-point-alloy microstructures embedded in soft poly (dimethylsiloxane) (PDMS) // *Rsc. Adv.* 2013. No. 3(46). P. 24671–24679.
29. *Brown E., Rodenberg N., Amend J., et al.* Universal robotic gripper based on the jamming of granular material // *P. Natl. Acad. Sci.* 2010. No. 107(44). P. 18809–18814.
30. *Kim Y.J., Cheng S., Kim S., et al.* A novel layer jamming mechanism with tunable stiffness capability for minimally invasive surgery // *IEEE T. Robot.* 2013. No. 29(4). P. 1031–1042.
31. *Hao J., Wang Z., Jin Y., Chen X., Peijin L., Gan Y., Chen X.* Hierarchical control of soft manipulators towards unstructured interactions // *Int. J. Robot. Res.* 2021. No. 40. P. 027836492097936.
32. *Братчиков С.А., Абрамова Е.А., Федосов Ю.В.* Решение обратной задачи кинематики манипулятора // *Вестник – Томский государственный университет. Управление, вычислительная техника и информатика.* 2021. № 56. С. 4–11. <https://doi.org/10.17223/19988605-56-1>
33. *Молотков А.В., Челноков Ю.Н.* Решение обратной задачи кинематики робота-манипулятора «Пума» с использованием бикватернионной теории кинематического управления // *Математика. Механика.* 2002. № 4. С. 204–206.
34. *Анципорович П.П., Акулнич В.К., Дубовская Е.М.* Решение обратной задачи кинематики манипулятора // *Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник.* 2017. № 32. С. 306–309.
35. *Svinin M.M., Uchiyama M.* A new compensation scheme for the inverse kinematics tasks of flexible robot arms // *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* 1994. V. 1. P. 315–320. <https://doi.org/10.1109/ROBOT-1994-351276>

36. *Lamb M., Lee S., Billing E., Hogberg D., Yang J.* Forward and Backwards Reaching Inverse Kinematics (FABRIK) solver for DHM: A pilot study // Proceedings of the 7th International Digital Human Modeling Symposium (DHM 2022) and Iowa Virtual Human Summit. 2022. P. dhm.31772. <https://doi.org/10.17077/dhm-31772>
37. *Камильянов А.Р.* Планирование траекторий движения многозвенного манипулятора в сложном трехмерном рабочем пространстве на основе эволюционных методов // Дис. . . . канд. техн. наук. Уфа. 2007.
38. *Плотникова Н.В.* Управление манипуляционными роботами на основе нечеткой логики // Наука ЮУрГУ: материалы 62 науч. конф. 2010. Т. 2. С. 170–174.
39. *Рахим Ф.А.* Нейро-нечеткая структура планирования перемещения робота-манипулятора в режиме онлайн в неизвестной динамической среде // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2008. № 6. С. 41–49.
40. *Song T.L., Lu Y.P., Li Z.Y.* Structural design and research of the bionic snake-like robot // Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd. 2012. No. 538. P. 3034–3037.
41. *Oluwade B., Uwadia C., Ayeni J.* Asymptotic Time Complexity of an Algorithm for Finding the Error Pattern of a Uniform Digital Code // J. Sci. Res. Develop. 2001. No. 6. P. 127–134.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.А. Мунасьповым.

Поступила в редакцию 14.05.2024

После доработки 22.04.2025

Принята к публикации 29.04.2025