

УДК 62

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗГИБНОЙ ФОРМЫ МЯГКИХ ПАЛЬЦЕВ
ВАКУУМНОГО СХВАТА ДЛЯ РОБОТИЗАЦИИ ДАРКСТОРОВ**

Шашкова Д.Ю.*магистрант**МГТУ им. Н.Э. Баумана**Москва, Россия***Бошляков А.А.***к.т.н., доцент**МГТУ им. Н.Э. Баумана**Москва, Россия***Аннотация**

В работе рассматривается формирование изгиба мягких пальцев вакуумного схвата для захвата продуктовых упаковок при роботизации сборки заказов в условиях даркстора. Цель исследования заключается в выборе и обосновании такого способа изгиба, который обеспечивал бы надёжный контакт вакуумных присосок с поверхностью объекта, позволяя компенсировать его ориентацию и возможные неровности поверхности при работе в ограниченном пространстве. В статье сформулированы требования к способу изгиба мягкого пальца с учётом особенностей даркстора. На основе анализа опубликованных экспериментальных исследований выполнено сравнение пневматического, температурного и тросового способов. Показано, что пневматический изгиб обладает высокой адаптивностью, но требует сложной пневмообвязки и чувствителен к режимам нагружения, температурный изгиб ограничен низким быстродействием, а наиболее подходящим для условий даркстора является тросовый привод, характеризующийся компактностью и однозначным управлением формой. В качестве итогового решения предложена концепция мягкого пальца с разделением зон изгиба и вакуумных каналов, маршрутизацией

троса в защитной оболочке, использованием направляющих втулок и вращательного барабанного привода, что позволяет обеспечить управляемый изгиб и снизить износ материала в процессе работы.

Ключевые слова: вакуумный схват, даркстор, автоматизация складов, изгиб мягкого пальца, тросовый изгиб.

PROVIDING A BENDING SHAPE FOR THE SOFT FINGERS OF A VACUUM GRIP FOR ROBOTIZATION OF DARKSTORES

Shashkova D.Y.

Master's Student

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Boshlyakov A.A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract

The paper discusses the formation of a soft finger bend in a vacuum gripper for capturing food packages during the robotization of order assembly in a darkstore. The purpose of the study is to choose and substantiate such a bending method that would provide reliable contact of vacuum suction cups with the surface of the object, allowing to compensate for its orientation and possible unevenness of the surface when working in a limited space. The article formulated requirements for the soft finger bending method, taking into account the features of darkstore. Based on the analysis of published experimental studies, a comparison of pneumatic, temperature and cable

methods is performed. It has been shown that pneumatic bending has high adaptability, but requires complex pneumatic wiring and is sensitive to loading modes, temperature bending is limited by low speed, and the most suitable for darkstore conditions is a cable drive, characterized by compactness and unambiguous shape control. As a final solution, the concept of a soft finger is proposed with the separation of bending zones and vacuum channels, cable routing in a protective shell, the use of guide bushings and a rotary drum drive, which allows for controlled bending and reduces material wear during operation.

Keywords: vacuum gripper, dark store, warehouse automation, soft finger bending, tendon-driven bending

Даркстор представляет собой формат склада, ориентированный на работу только с онлайн-заказами. Его структура предполагает хранение товаров на стеллажах, установленных рядами, что напоминает устройство обычного супермаркета. Главное отличие состоит в том, что на дарксторе не учитывается ориентация покупателя в помещении и не предполагается наглядное размещение ассортимента. Всё пространство оптимизировано под быструю сборку товаров: узкие проходы, товары по типам плотно уложены в картонные коробки.

Процесс комплектации представляет собой повтор одних и тех же действий за короткое время: сотрудник ходит между стеллажами и отбирает нужные позиции, после чего заказ упаковывают и передают в службу доставки. Именно скорость и повторяемость этих операций определяют эффективность работы даркстора, что говорит о необходимости автоматизации сборки заказа.

Структура такого склада ограничивает применение стандартных решений. Плотная расстановка стеллажей, хранение товаров в картонных коробках с небольшим межполочным пространством накладывают рамки на габариты робота. Сами объекты захвата представляет собой продукты, упакованные в легко деформируемый ламинированный картон, что предъявляет требования к деликатности взаимодействия. Первый типовой подход к автоматизации заключается в доставке товаров к человеку через системы автоматизированного

хранения и транспортировки. Такой способ предполагает специализированное устройство склада, большое число конвейеров и выделенное пространство для движения, что требует полного изменения структуры даркстора. Второй подход подразумевает работу промышленного манипулятора в зоне, свободной от хранения, что трудно реализовать в узких проходах. Также такие роботы в основном оснащены клещевыми захватами, из-за чего возникнут трудности с обеспечением деликатного взаимодействия. Эти проблемы определяют необходимость разработки специализированного решения под структуру даркстора с учетом свойств объектов захвата.

Для решения этой задачи предполагается концепция системы, работающей непосредственно на полках стеллажей. Рабочий орган представляет собой вакуумный схват с четырьмя мягкими пальцами, который перемещается вдоль полки по направляющим. На нижних гранях каждого пальца располагаются две гофрированные присоски, что определено исходя из массогабаритных параметров ассортимента и условия стабильности захвата. Вакуумный схват обеспечивает удержание за счёт перепада давления в зоне контакта, реализуя деликатное взаимодействие с объектом. Использование пальцев из мягкого эластомера дополнительно снижает контактные напряжения и минимизирует риск повреждения легко деформируемой упаковки.

Схват должен обеспечивать надежный контакт присоски с поверхностью объекта в условиях небольших загрязнений, деформаций упаковки и различной ориентации. Для компенсации отклонений позиционирования, обусловленных пыльной или деформированной поверхностью товара, были выбраны гофрированные присоски, ход которых составляет 4 мм. В процессе комплектации заказа товары могут смещаться и менять ориентацию в пределах коробки. Так, например, при захвате одного изделия соседнее оказывается наклоненным или частично перекрытым, поэтому необходимо учитывать различные сценарии ориентации объектов. Для адаптации к положению товара в конструкции предусмотрен изгиб мягкого пальца, поэтому важным этапом в

проектировании является именно выбор способа изгиба, отвечающего условиям сборки заказа и в целом даркстора.

Схват взаимодействует с большим количеством позиций одного типа, поэтому одним из требований становится повторяемость и предсказуемость изгиба. Это обусловлено необходимостью осуществлять стабильное качество контакта, так как надежное удержание объекта будет только тогда, когда обеспечено равномерное прижатие и герметичность. Палец должен принимать воспроизводимую форму при одинаковой команде управления, обеспечивая повторяемость траектории кончика и положения присосок в рабочих циклах. Смещение профиля изгиба вдоль пальца или возникновение локального перегиба приводит к потере стабильности системы. Присоски касаются объекта под разными углами, контакт становится неплотным.

При этом изгиб должен формироваться достаточно быстро в рамках рабочего цикла и иметь простое управление. Зависимость формы пальца от управляющего воздействия должна быть однозначной: увеличение сигнала должно приводить к росту изгиба, а уменьшение — к его снижению. Недопустимы неожиданные скачки, смена режимов деформации и выраженные задержки отклика. Требуется минимизация гистерезиса, так как расхождение траекторий изменения формы при увеличении и уменьшении воздействия ухудшает повторяемость захвата и усложняет настройку системы.

Для обеспечения надёжности при циклической работе изгиб не должен создавать постоянную концентрацию деформаций в локальной зоне, так как это приводит к быстрому усталостному износу материала. Деформация должна распределяться по заданной области, чтобы геометрические переходы не вызывали надрывы в процессе работы.

Также необходимо, чтобы способ изгиба отвечал эксплуатационным требованиям. Он должен иметь компактную конструкцию для размещения в межполочном пространстве, устойчиво работать в условиях наличия пыли, быть

совместимым с материалом пальца и подходит для работы с товарами в легкодеформируемой картонной упаковке.

Таким образом, для выбора способа изгиба требуется проанализировать основные подходы, используемые для мягких пальцев: пневматический, тросовый и температурный. Сравнение будет проводиться на основе экспериментальных данных исследований с учетом сформулированных критериев.

Пневматический изгиб мягких пальцев реализуется через изменение формы внутренних камер. При подаче давления стенки деформируются, вследствие чего возникает изгибающий момент за счет заранее заданной асимметрии по толщине, материалу или геометрии.

В исследовании [1] пневматический изгиб был реализован следующим образом: при подаче положительного давления в рабочие камеры, палец изгибается в сторону более жёсткого слоя за счет несимметрического расширения камер. Авторы провели испытания, направленные на установление влияния параметров давления на результат изгиба. Для анализа именно изгибающей пневматики давление в вакуумной камере удерживали на уровне -100кПа. Результаты эксперимента выявили, что для поверхностей с большим радиусом кривизны, включая практически плоские, захвату достаточно небольшого положительного давления, так как такой контакт не требует значительной кривизны. При этом сила захвата возрастала с увеличением радиуса поверхности. Для поверхностей с малым радиусом кривизны была выявлена другая закономерность: по мере увеличения положительного давления росли угол изгиба, площадь контакта и удерживающая сила. Однако этот рост имеет предел. Для плоских и слабо изогнутых поверхностей чрезмерное положительное давление вызывало потерю устойчивости мягкого пальца, из-за чего фактический контакт ухудшался, и сила захвата снижалась. На основании эксперимента авторы получили следующий вывод: эффективный захват возможен только при согласовании давления с геометрией поверхности, причём

рост давления не гарантирует улучшения захвата, поскольку после достижения определённого уровня начинается потеря устойчивости и ухудшение прилегания.

В статье [2] пневматический изгиб реализован наоборот за счёт подачи отрицательного давления. Верхняя часть исполнительного органа образована рядом ромбовидных камер, соединённых пневмолинией. Когда в камеры подают отрицательное давление, они совместно схлопываются. Длина средней части пальца изменяется, в то время как длина нижнего ограничивающего слоя почти не меняется, что и создаёт изгиб. Направление задаётся заранее геометрией конструкции: при одном диапазоне углов камер палец изгибается по часовой стрелке, при другом — против часовой стрелки. Авторы проводили эксперимент по оценке изгиба двух исполнительных органов с внутренними углами камер 76° и 104° . В камеры подавалось различное отрицательное давление и измерялся угол изгиба. Полученная зависимость угла изгиба от давления оказалась нелинейной. Для варианта со значением 76° угол изгиба почти достигал максимума уже при вакууме около 55 кПа, тогда как для варианта 104° угол постепенно выходил на насыщение, поскольку камеры деформировались труднее. Конкретные максимальные экспериментальные значения составили 127.7° для пальца с углом 76° и 171.5° с углом 104° . Также в статье приводится оценка влияния геометрических параметров на изгиб: внутренний угол камеры, ширина камеры, толщина стенок и количество камер. На основании этих результатов авторы сделали вывод, что внутренний угол камер является критическим параметром для направления и устойчивости изгиба, область около 90° нежелательна, а увеличение числа камер в большей степени удлиняет рабочую дугу и суммарный поворот, чем сильно меняет локальную кривизну каждого участка.

В исследовании [3] также используется положительное давление, но уже реализован двунаправленный изгиб за счёт наличия камер с двух сторон пальца. Авторы провели тесты для проверки изгиба при различных значениях давления.

Давление в каждой камере изменяли от 60 кПа до 160 кПа. Для нижней камеры деформация возрастала с 0,4–0,7 см при 60 кПа до 1,9 см при 160 кПа, что соответствовало изгибу в положительном направлении. Для верхней камеры наблюдалась аналогичная по величине, но противоположная по знаку деформация: от –0,4...–0,8 см при 60 кПа до –2,0...–2,5 см при 160 кПа, что подтвердило возможность изгиба в противоположную сторону с сопоставимой эффективностью.

Для условий даркстора пневматический изгиб мягких пальцев обладает рядом преимуществ. Он обеспечивает податливый контакт с объектом и позволяет пальцу адаптироваться к различным формам упаковки без жёсткого удара, что важно при работе с товарами в коробках. Анализ трёх рассмотренных исследований показывает, что кривизной пальца можно управлять через давление и геометрию камер, благодаря чему один исполнительный орган способен работать с объектами разного радиуса кривизны. В исследованиях с положительным давлением установлено, что при корректном подборе давления увеличиваются угол изгиба, площадь контакта и удерживающая сила, что позволяет охватывать поверхности сложной формы. В двунаправленном исполнении дополнительно доказана возможность изгиба в обе стороны при сопоставимой эффективности, что особенно ценно для даркстора, где товар часто приходится захватывать в ограниченном пространстве между соседними упаковками. В целом это означает, что пневматический изгиб хорошо подходит для захвата широкого ассортимента, безопасного контакта с товаром и работы в условиях, где нужна геометрическая приспособляемость пальца.

Одновременно для даркстора у такого принципа есть и важные недостатки. Главный из них состоит в том, что эффективность изгиба сильно зависит от точного согласования давления с геометрией объекта. Как показало первое исследование, увеличение давления полезно лишь до определённого предела: при чрезмерном давлении на плоских и слабо изогнутых поверхностях возникает потеря устойчивости, контакт ухудшается, и сила захвата снижается. Это

особенно проблемно для даркстора, где форма, размер и жёсткость упаковки постоянно меняются, а значит, универсальный режим давления подобрать трудно. Второй недостаток связан с нелинейностью и конструктивной чувствительностью таких приводов: во второй статье показано, что направление и устойчивость изгиба критически зависят от внутреннего угла камер, а область около 90° вообще приводит к неустойчивому волнообразному схлопыванию. Также пневматика требует подключения к внешнему источнику давления или разрежения, наличия клапанов и трубок, что увеличивает количество линий в зоне схвата. При четырёх пальцах компоновка занимает много пространства из-за роста числа подключений и элементов управления. Также возможен конфликт ресурсов: в вакуумном схвате разрежение служит основным источником удержания, а пневматический привод изгиба тоже управляет воздушными потоками. Это обуславливает необходимость в развитой пневмообвязке и точной настройке режимов работы, чтобы исключить взаимное влияние контуров и обеспечить стабильность вакуумного захвата.

Другой вариант изгиба мягкого пальца осуществляется за счёт нагрева или охлаждения материала, меняющего свои механические свойства и создающего разность деформаций или жесткости в конструкции.

В статье [4] конструкция пальца представляет собой трёхслойную полимерную структуру. Верхний приводной слой выполнен из силикона, в который встроена нихромовая проволока и внедрён этанол в качестве рабочей среды фазового перехода. При подаче постоянного напряжения происходит нагрев проволоки, вызывающий переход этанола из жидкого состояния в парообразное. Резкое увеличение объёма верхнего слоя приводит к изгибу пальца. Средний слой изготовлен из термопластичного полиуретана с температурой плавления около 60°C , что позволяет изменять жёсткость материала при нагреве и облегчать деформацию. Авторы провели исследование зависимости механических свойств слоя TPU от температуры. Испытания проводились при нагреве от 20° до 70° . Результаты показали, что при начальных

значениях 19.89°C модуль хранения TPU составлял 44,84 МПа, затем с ростом температуры он постепенно снижался, а при 63.85°C начиналось плавление. Минимальное значение этого параметра достигало 0,42 МПа. После прекращения нагрева и охлаждения модуль снова возрастал и к комнатной температуре достигал 7,20 МПа. Модуль потерь также уменьшался: с 2,03 МПа при комнатной температуре до 0,16 МПа при 64.06°C , с минимумом около 0,13 МПа. Дополнительные испытания на растяжение показали, что модуль Юнга TPU при повышении температуры от 20° до 70°C уменьшался последовательно с 2; 1,8; 1,2; 0,6; 0,05 до 0,048 МПа. Эти результаты прямо подтвердили, что при нагреве средний слой резко теряет жёсткость и тем самым облегчает температурный изгиб пальца.

Далее авторы провели тестирование непосредственного изгиба во времени. При подаче постоянного напряжения 24,92 В и тока 1,085 А авторы фиксировали деформацию во времени. Фотографии снимались каждые 25 с, спустя которые палец лишь слегка расширялся, поскольку TPU ещё оставался достаточно жёстким. Через 50 с расширение становилось заметным, и палец начинал изгибаться вниз. Через 75 с достигалось максимальное расширение и максимальный изгиб. Важный результат этого эксперимента состоит в том, что после отключения питания верхний слой начинал восстанавливать форму, в то время как слой TPU сохранял податливость в течение некоторого времени. Это обеспечивало удержание положения изгиба до полного охлаждения и затвердевания полимера. Однако быстрое действие системы оказалось низким: время активации составляло 1–2 минуты, а время восстановления формы — 2–3 минуты.

По результатам опытов в качестве достоинства такого метода изгиба можно выделить, что размягчение слоя TPU повышает податливость пальца, улучшая адаптацию к геометрии и шероховатости поверхности. После частичного охлаждения система способна удерживать сформированное состояние. Однако существенным недостатком остаётся низкое быстрое действие,

обусловленное инерционностью теплопередачи, особенно в фазе охлаждения. Также наличие нагревательных элементов в ограниченной зоне в непосредственной близости с товарами нежелательно.

В случае тросового изгиба форма мягкого пальца изменяется за счет изменения длины или натяжения одного или нескольких тросов, проложенных вдоль гибкого каркаса. При подтягивании троса одна сторона конструкции укорачивается относительно другой, и звено изгибается по заранее заданной траектории.

В статье [5] изгиб реализован за счет трёх тросов, встроенных в тело щупальца. Конструкция выполнена с мягкой наружной оболочкой и более жёстким внутренним ядром, которое работает как упругий элемент для обеспечения восстановления формы после снятия нагрузки. Три троса уложены по-разному и обеспечивают три базовых режима движения: изгиб вокруг оси X, изгиб вокруг оси Y и скручивание. Жёлтый трос, отвечающий за скручивание, проходит по кривой траектории: от нижней левой стороны вдоль щупальца до середины, после чего меняет направление и выходит к верхнему правому краю. Зелёный и красный тросы проходят вдоль тела продольно.

На первом этапе испытаний авторы проверили основные режимы изгиба в ограниченном пространстве. По отдельности натягивался каждый трос и снималось усилие как функция перемещения. Полученные значения показали, что при натяжении жёлтого троса максимальное усилие составляло $13 \pm 0,5$ Н при перемещении троса 8 см. При натяжении красного троса формировался изгиб с максимальным усилием 6 ± 1 Н при перемещении 3,5 см. При натяжении зелёного троса возникал изгиб с максимальным усилием $15 \pm 0,9$ Н при перемещении 8 см.

Далее авторы провели испытания по возможности захвата объектов разной формы: цилиндрического, небольшого объекта неправильной формы, плоского объекта и пружины. Щупальце подносили к объекту разными траекториями, меняя комбинации тросовых движений и затем включая присоски. Было

показано, что система способна захватывать все выбранные объекты, подстраивая стратегию под их форму, но при этом осуществить надёжное извлечение без присосок возможно было только для цилиндра. Для пружины с внутренним диаметром 55 мм мягкое щупальце сначала входило внутрь полости, затем за счёт деформации подстраивалось под форму объекта и формировало механическое зацепление. При боковом захвате группа мембранных присосок могла удерживать до 0,15 кг каждая, подстраиваясь как к плоским, так и к цилиндрическим поверхностям.

По результатам экспериментов авторы пришли к выводу, что тросовый изгиб в сочетании с мягким телом даёт высокую адаптивность в ограниченном пространстве. Само мягкое тело с тросовым приводом уже даёт возможность адаптировать захват под разную форму объектов, но максимальная эффективность была достигнута в сочетании с присосками, которые увеличили силу удержания в 1.4 раза. При этом авторы указывают, что в ограниченном канале движение щупальца сильно зависит от взаимодействия со стенками трубы и с самим объектом, так как внешние силы могут вызывать непредсказуемое поведение без дополнительных датчиков положения тросов, усилия натяжения и корректности прикрепления присосок. Также важно учесть, что при многократной циклической нагрузке трение троса о мягкое тело будет создавать локальные напряжения и постепенный износ силикона. В работе для решения этой проблемы авторы использовали тефлоновую оболочку для тросов.

Наиболее подходящим вариантом для даркстора на основе анализа исследований является тросовый привод. В таком способе изгиб формируется механически управляемым натяжением или изменением длины, благодаря чему палец можно спроектировать компактным, а приводную часть вынести из зоны непосредственного контакта с товарами. Также тросовый изгиб имеет однозначную линейную зависимость между формой пальца и ходом троса, что позволяет точно получать требуемое положение. Пневматический же изгиб слишком чувствителен к согласованию режима работы с формой конкретного

объекта и требует развитой системы подачи давления, клапанов и трубок, которая усложняет компоновку схвата. При большом числе пальцев это увеличивает габариты, число линий и риск взаимного влияния контуров, особенно если вакуум уже используется для удержания. Основное ограничение температурного изгиба связано с его низким быстродействием, вызванного циклами нагрева и охлаждения.

Для работы в условиях даркстора концепция изгиба будет построена следующим образом. Мягкий палец разделен на две зоны по высоте: верхняя часть выполнена в виде последовательности трапеций, через которые проходит трос, а в нижнем основании размещаются только вакуумные трубки. Такое расположение применяется для исключения взаимных перегибов. Изгиб задаётся по модели постоянной кривизны за счет укорочения троса относительно нейтральной линии пальца. Для безопасности трос помещается внутри тонкостенной оболочки, которая непрерывно проходит через всю систему трапеций. Вход троса в зону изгиба и выход к кончику представляют собой наиболее нагруженные участки, поэтому они дополнительно защищены направляющими втулками со скруглёнными кромками, чтобы снизить локальные напряжения и износ материала. Выбор вращательного барабана в качестве типа привода обусловлен малым требуемым ходом троса и компактностью, что позволяет разместить четыре независимых привода на общем фланце. Схема крепления сделана двухсторонней. На одном конце, внутри пальца, трос фиксируется через обжимную металлическую втулку, после чего конец вводится в жёсткую направляющую втулку, интегрированную в тело пальца при формовании, а её полость заполняется компаундом. За счёт этого нагрузка передаётся не в силикон напрямую, а через жёсткий узел, что предотвращает локальное смятие и надрыв мягкого материала. С другой стороны трос закрепляется на барабане, установленном на валу сервопривода: в теле барабана выполнено радиальное отверстие, куда заводится конец троса и фиксируется зажимной втулкой. Далее от барабана трос идёт через

направляющее ушко, которое задаёт правильный угол входа в палец и убирает боковую нагрузку с вала сервопривода.

Таким образом, проведенный анализ показал, что наиболее подходящим для условий даркстора является тросовый способ изгиба, так как он в наибольшей степени отвечает требованиям компактности, предсказуемости формы и совместимости с вакуумной системой удержания. На этой основе в статье предложена конструкция мягкого пальца с разделением каналов изгиба и вакуумных магистралей, защитной маршрутизацией троса, локальным усилением наиболее нагруженных участков и барабанным приводом, что создаёт основу для моделирования предложенной концепции изгиба пальца для оценки повторяемости, долговечности тросового узла и устойчивости вакуумного контакта при различной ориентации объектов.

Библиографический список:

1. Sun T., Chen W., Li J. [et al.] A versatile and high-load soft gripper enabled by vacuum-assisted bio-inspired interfacial adhesion // *Smart Materials and Structures*. – 2024. – Vol. 33, no. 1. – Art. 015034. – DOI 10.1088/1361-665X/ad1427.
2. Xiao W., Xie C., Xiao Y. [et al.] A new vacuum-powered soft bending actuator with programmable variable curvatures // *Materials & Design*. – 2025. – Vol. 250. – Art. 113641. – DOI 10.1016/j.matdes.2025.113641.
3. Dsilva D. W., Mathias K. A., Hiremath S. Investigation of uni- and bi-directional soft pneumatic actuators and its implication using rapid prototyping // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2025. – Vol. 10, no. 9. – P. 6049–6070. – DOI 10.1007/s40964-025-00951-7.
4. Li X., Shi Q., Wei H. [et al.] Soft Gripper with Electro-Thermally Driven Artificial Fingers Made of Tri-Layer Polymers and a Dry Adhesive Surface // *Biomimetics*. – 2022. – Vol. 7, no. 4. – Art. 167. – DOI 10.3390/biomimetics7040167.
5. Mazzolai B., Mondini A., Tramacere F. [et al.] Octopus-Inspired Soft Arm with Suction Cups for Enhanced Grasping Tasks in Confined Environments // *Advanced Intelligent Systems*. – 2019. – Vol. 1, no. 6. – Art. 1900041. – DOI 10.1002/aisy.201900041.