

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

УДК 621.825.65

РАЗРАБОТКА ИСКУССТВЕННОГО СУСТАВА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ*

И.А. ЗАХАРОВ¹, И.Н. УСТЮГОВА², Т.С. ПОПОВА³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматике. E-mail: z.a.k.h.a.r.o.v@yandex.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматике. E-mail: ustyugova.irina@mail.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры автоматике. E-mail: tanuaporova14@yandex.ru

В данной статье описывается процесс разработки наиболее эффективной для применения в робототехнике конструкции искусственного шарового шарнирного сустава. Критерием эффективности является отношение числа степеней свобод к энергозатратам на движение. Приводится анализ существующих искусственных и естественных суставов, а именно: суставов млекопитающих, эндопротезов и применяемых в робототехнике различных типов шарниров (одноосных, двуосных). В результате анализа были выявлены достоинства и недостатки существующих конструкций. Было решено создать такой сустав, который сочетал бы в себе основные преимущества всех рассмотренных вариантов. За основу был взят эндопротез, применяемый в медицине. Медицинский сустав обладает наибольшей подвижностью и имеет три степени свободы. Такие эндопротезы изготавливаются из дорогостоящих материалов, поэтому экономически нецелесообразно использовать их в робототехнике. Чтобы минимизировать затраты, для производства деталей использовалась технология послойной 3D-печати ABS-пластиком. Для обеспечения износостойкости пластиковых деталей в процессе эксплуатации сустава было решено заполнить сустав веществом, подобным синовиальной жидкости. Разработанный прототип обладает высокой подвижностью и простотой актуации, что делает его пригодным для выполнения широкого круга задач.

Ключевые слова: искусственный сустав, робототехника, 3D-печать, степень свободы, робот, android, эндопротез, шарнир, кардан, штифт

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-21-32

* Статья получена 23 октября 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

В наше время робототехника развивается стремительными темпами. Роботы способны лучше человека справиться с монотонной работой и работой, где нужна точность, выносливость, терпение. Они могут помогать человеку в быту: уже существуют роботы-уборщики и роботы-секретари. Кроме того, механические помощники могут сохранить немало жизней, заменяя человека при проведении опасных работ.

Конструкция и внешний вид робота могут сильно отличаться в зависимости от функций, которые он выполняет. Особый интерес представляют животноподобные роботы и человекоподобные андройды. Создание таких роботов – очень сложный процесс, потому что трудно наделить механическое устройство свойствами живого существа.

Движения роботов не такие плавные, а в качестве суставов обычно используются шарниры, которые ограничивают движение конечности робота только по одной оси и обладают всего одной степенью свободы. Есть и другие виды суставов, обеспечивающие движение конечности по двум осям и имеющие две-три степени свободы. Но такие суставы применяются не так часто из-за сложности конструкции.

Целью работы является анализ существующих искусственных и естественных суставов, а также разработка наиболее эффективной для применения в робототехнике конструкции сустава, пригодной для выполнения широкого круга задач. Критерием эффективности является отношение числа степеней свобод к энергозатратам на движение.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СУСТАВОВ

1.1. СУСТАВЫ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Для начала было решено изучить строение суставов млекопитающих. Они различны по строению и предназначению.

Самый распространенный тип суставов в организме – синовиальный (сустав, в котором окончания костей сходятся в капсуле, заполненной синовиальной жидкостью).

Суставные окончания костей покрыты упругим тонким слоем гладкого вещества – гиалиновым хрящом, который предотвращает трение костей, а синовиальная жидкость выполняет функцию смазки, защищая хрящи от стирания и износа. Синовиальная жидкость также служит амортизатором. Основным компонентом синовиальной жидкости является гиалуроновая кислота. Она позволяет суставам выполнять свои функции в полном объеме [6].

Синовиальные суставы, в свою очередь, можно разделить на несколько обобщенных подвидов (см. таблицу).

Классификация суставов по форме суставных поверхностей и числу осей вращения [7]

| Осность сустава | Сустав по форме суставной поверхности | Число видов движения | Реализуемая ось | Реализуемое движение |
|-----------------|--|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Одноосные | Цилиндрический | 1 | Вертикальная | Вращение |
| | Блоковидный | 2 | Фронтальная | Сгибание, разгибание |
| | Улитковый (разновидность блоковидного) | | | |
| Двухосные | Эллипсоидный | 5 | Фронтальная | Сгибание, разгибание |
| | Седловидный | | Сагиттальная | Отведение, приведение |
| | | | Переход с оси на ось | Круговое движение |
| | Мышелковый | 3 | Фронтальная | Сгибание, разгибание |
| | | | Вертикальная | Вращение |
| Многоосные | Шаровидный | 6 | Фронтальная | Сгибание, разгибание |
| | Чашеобразный (разновидность шаровидного) | | Сагиттальная | Отведение, приведение |
| | | | Переход с оси на ось | Круговое движение |
| | Плоский | | Вертикальная | Вращение |

Шаровидный сустав – это самое подвижное сочленение в организме человека, которое обеспечивает возможность выполнять разнообразные движения верхней конечностью. Примерами такого сустава могут послужить плечевой и тазобедренный суставы. Движения в них возможны по всем трем осям. Рассмотрим строение такого сустава на примере плечевого.

Верхняя часть кости плеча заканчивается круглой головкой, имеющей шаровидную форму. Напротив нее находится лопатка, входящая в состав поя-

са верхних конечностей. Ее плоскость, обращенная к плечевой кости, имеет углубление, которое в точности повторяет форму шаровидного образования плеча. Это углубление называется суставной впадиной, но ее размер почти в четыре раза меньше, чем диаметр головки плеча (рис. 1).

Строение плечевого сустава таково, что при любых движениях в нем суставная впадина лопатки всегда оказывается напротив головки плеча, во многом это обеспечивается и вращательными движениями самой лопатки.

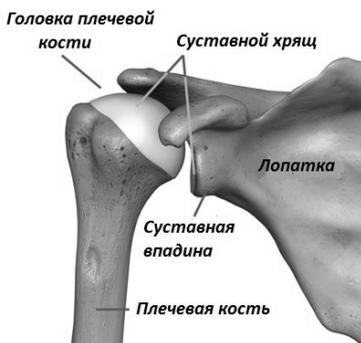


Рис. 1. Строение плечевого сустава

1.2. МЕДИЦИНСКИЕ ЭНДОПРОТЕЗЫ

В настоящее время возможно заменять практически все виды суставов: тазобедренный, коленный, локтевой, плечевой, голеностопный и лучезапястный, а также суставы пальцев ног и рук, межпозвоночные диски.

Чтобы искусственные суставы хорошо приживались и функционировали в теле человека, они должны быть схожи с человеческими.

Рассмотрим, как устроены некоторые из них.

Шаровидный эндопротез состоит из круглой головки и вогнутой впадины, в которой головка вращается, позволяя осуществить движение. Обычно протез состоит из ножки, головки, чашки и вкладыша (рис. 2). Для их производства используют разные материалы: металл, керамику и полиэтилен соответственно [5].

Шарнирный эндопротез устроен по-другому. Например, для коленного сустава он состоит из трех основных частей: большеберцовый компонент заменяет верхнюю поверхность голени. Бедренный компонент заменяет нижнюю поверхность бедра и углубление, в которое входит коленная чашечка. Надколенный компонент заменяет поверхность надколенника, где он

скользит в углублении на бедре. Части сустава изготавливаются из металла и полиэтилена (рис. 3).



Рис. 2. Шаровидный сустав



Рис. 3. Шарнирный сустав

Медицинские эндопротезы очень схожи с суставами млекопитающих, но их применение в робототехнике не целесообразно с экономической точки зрения, так как они производятся из дорогостоящих материалов по сложной технологии. К тому же выбор материала для эндопротезов ограничен, потому что нужно подобрать такой материал, который мог бы «прижиться» в теле человека.

1.3. ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РОБОТОТЕХНИКЕ ШАРНИРЫ

В робототехнике используются другие технологии.

Самым простым суставом является одноосный сустав с использованием штифта в конструкции.

Штифт плотно вставляется в отверстие, проходящее через обе детали, предотвращая их взаимное смещение. Это позволяет обеспечить движение, но только по одной оси.



Рис. 4. Одноосный сустав с использованием штифта

Благодаря простоте и малым затратам на его изготовление такой тип сустава (рис. 4) часто используют в роботостроении.

Собрав конструкцию, состоящую из двух деталей со штифтами, можно получить сустав, движение которого будет обеспечено по двум осям. Такая конструкция называется кардан.

Кардан – механизм, передающий крутящий момент между валами, пересекающимися в центре карданной передачи и имеющий возможность взаимного углового перемещения (рис. 5) [8]. Используется, когда трудно обеспечить соосность вращающихся элементов.

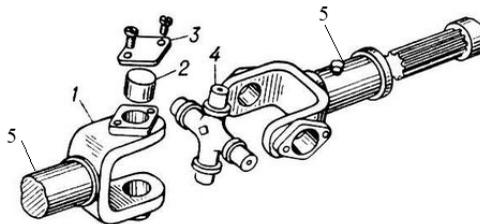


Рис. 5. Кардан:

1 – вилка; 2 – опора для цапф крестовины;
3 – крышка; 4 – крестовина; 5 – вал

С развитием робототехники нашлось применение и кардану, уже не только в качестве вращающейся вокруг продольных осей трансмиссии, но и в виде непосредственных частей суставов робота.

Вследствие анализа существующих искусственных суставов были выявлены следующие недостатки.

Шарнирные суставы ограничены в движении по одной оси, поэтому у них мало степеней свободы. Конечно, этого может быть достаточно для решения простых задач. Например, данный метод может быть использован для обеспечения движения фаланг пальцев робота, локтевого и коленного суставов. Однако для выполнения более сложных функций требуются суставы, обладающие большим количеством степеней свободы.

Сустав с использованием кардана (рис. 5) решает данную задачу, но и эта конструкция не лишена недостатков. Так, для вращения конечности вокруг продольной оси (с целью обеспечения третьей степени свободы) необходимо вращать сразу оба вала. Такая усложненная форма системы и большое количество входящих в нее деталей порождают дополнительные риски ошибок в проектировании, изготовлении и сборке.

Карданная передача имеет еще один существенный недостаток – несинхронность вращения валов (если один вал вращается равномерно, то другой – нет), повышающуюся при увеличении угла между валами [8].

Таким образом, кардан может быть недостаточно эффективен для применения в качестве элемента кинематических цепей манипуляционного механизма.

На основании вышеизложенного было принято решение разработать адаптированную под нужды робототехники конструкцию искусственного сустава. Сустав должен обладать высокой подвижностью и обеспечивать возможность независимого относительного движения каждого звена в составе многозвенного манипулятора. Это позволит упростить и удешевить процедуру передачи энергии от привода к ведомому звену.

2. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ

В результате анализа было решено взять за основу шаровидный эндопротез. Такой механизм обеспечивает максимальную среди рассмотренных аналогов свободу движений. При этом он лишен описанных недостатков кардана: поворот вокруг продольной оси, в отличие от карданного механизма, в шаровидном суставе может быть реализован без вращения всех частей сустава, т. е. отсутствует необходимость вращения внешнего шара вместе с внутренним. Простейшие шарообразные формы и сведенное к минимуму

число соединений могут позволить организовать быстрое изготовление и сборку.

Как уже было сказано ранее, готовые эндопротезы нецелесообразно использовать в робототехнике, так как они изготовлены из дорогостоящих материалов – металла и керамики. Помимо этого, существует прямая связь между энергозатратами на движение робота и его массой. Поэтому для создания роботов используют в основном легкие составные части, чтобы снизить издержки на его эксплуатацию. Исходя из этого было решено заменить керамику и металл на пластик. Он легкий и экономически выгоден.

С помощью программных средств 3D-моделирования были разработаны виртуальные модели прототипов деталей конструкции (рис. 6).

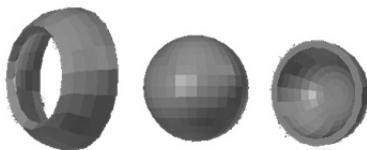


Рис. 6. Составные части сустава

Сустав состоит из внешнего и внутреннего шаров. Внутренний шар соединяется с конечностью.

Диаметр отверстия на внешнем шаре может быть изменен для того, чтобы увеличить или уменьшить амплитуду движения. При этом диаметр отверстия не должен быть больше, чем диаметр внутреннего шара. Также может быть изменена и форма отверстия. Если нужно ограничить движение по одной оси, то лучше сделать отверстие в виде щели (рис. 7).

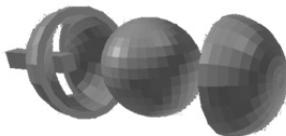


Рис. 7. Конструкция с отверстием в виде щели

Для изготовления разработанных деталей использовалась технология послойной 3D-печати ABS-пластиком, при которой расплавленный пластик слой за слоем, начиная с нижнего, автоматически выдавливается из экструдера на рабочую поверхность. Для этого виртуальная 3D-модель предварительно разделяется программой на слои в процессе слайсинга.

Полученные детали после абразивной обработки срачивались вместе при нагреве их кромки выше температуры плавления.

Изначальная идея предусматривала использование в конструкции сустава нескольких внутренних разнонаправленных групп пружинных амортизаторов, чтобы предотвратить движение конечности без приложения усилия. Однако в процессе реализации от них было решено отказаться в пользу более простого и экономичного решения, прообразом которого послужила синовиальная жидкость суставов. В качестве заполнителя внутренней суставной полости (пространства между внешним и внутренним шаром) использовался низкомолекулярный силиконовый каучук, который способен обеспечить необходимый баланс упругости и эластичности.

В процессе эксплуатации прототипа был выявлен следующий недостаток: со временем силиконовый каучук начинает «скатываться» и выпадать из полости сустава. Это приводит к расшатыванию конечности, заключенной в сустав. Данную проблему можно устранить, используя аналог синовиальной сумки, роль которой может выполнить слой полиэтилена.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность:

– профессору кафедры автоматики А.А. Воеводе за стимулирование студентов к научно-инновационной деятельности, а также полезное обсуждение полученных результатов;

– магистру кафедры ССОД П.О. Бекетову за обучение основам 3D-печати и предоставленный 3D-принтер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была спроектирована эффективная для применения в робототехнике конструкция многоосного шарнира, который выполняет роль сустава. Методом послойной 3D-печати был изготовлен первый прототип.

Разработанный сустав обладает высокой подвижностью и простотой актуации. Для того чтобы пластиковые детали не деформировались в результате трения друг о друга, используется амортизирующая жидкость (силиконовый каучук). В будущем планируется модернизировать данную конструкцию, внедрив аналог синовиальной сумки, что позволит увеличить надежность и долговечность механизма.

В перспективе применяемые и развиваемые авторами технологичные конструктивные решения могут позволить добиться успехов в качественном развитии робототехники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степени свободы (механика) [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Степени_свободы_\(механика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Степени_свободы_(механика)) (дата обращения: 10.11.2017).
2. *Корендяев А.И., Саламанора Б.Л., Тывес Л.И.* Теоретические основы робототехники. В 2 кн. Кн. 2. – М.: Наука, 2006. – 376 с.
3. *Максимов А.Л., Горбач Е.Н., Каминский А.В.* Анализ причин асептической нестабильности эндопротеза тазобедренного сустава компании «Алтимед» // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5.
4. Асептическая нестабильность эндопротеза [Электронный ресурс]. – URL: <https://femurhead.ru/asepticheskaya-nestabilnost-endoproteza/> (дата обращения: 18.11.2017).
5. Эндопротезирование суставов [Электронный ресурс]. – URL: <http://present5.com/endoprotezirovanie-sustavov-protez-iskusstvennoe-prisposoblenie/> (дата обращения: 14.11.2017).
6. *Курепина М.М., Ожигова А.П., Никитина А.А.* Анатомия человека. – М.: Владос, 2010. – 383 с.
7. *Гайворонский И.В., Ничипорук Г.И., Гайворонский А.И.* Анатомия и физиология человека: учебник. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2011. – 496 с.
8. *Бекурин М.* Карданная передача [Электронный ресурс]. – URL: <http://inoschool.ru/item/208-17-kardannaya-peredacha> (дата обращения: 25.11.2017).
9. Суставы скелета человека [Электронный ресурс]. – URL: http://house-massage.ru/sustavy_skeleta_cheloveka.html (дата обращения: 19.11.2017).
10. *Булгаков А.Г., Воробьев В.А.* Промышленные роботы: кинематика, динамика, контроль и управление. – М.: Солон-Пресс, 2007. – 488 с.
11. *Глазков В.А., Яхричев В.В.* Основы робототехники. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 31 с.
12. *Бекетов П.О.* Разработка роботизированной искусственной кисти с помощью технологии 3d прототипирования / науч. рук. В.И. Гужов // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 1–5 декабря 2015 г.: в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 6. – С. 43–44.

Захаров Илья Александрович, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. E-mail: z.a.k.h.a.r.o.v@yandex.ru

Устюгова Ирина Николаевна, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. E-mail: ustugova.irina@mail.ru

Попова Татьяна Сергеевна, студент кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. E-mail: tanyapopova14@yandex.ru

The development of a joint, is most effective for use in robotics*

I.A. Zakharov¹, I.N. Ustyugova², T.S. Popova³

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: z.a.k.h.a.r.o.v@yandex.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: ustyugova.irina@mail.ru

³ Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the automation department. E-mail: tanyapopova14@yandex.ru

This article describes the development process most effective for use in the construction of the robot accusation machine of the hinge joint. Criteria of efficiency is the ratio of the number of step to freedom energy movement. The analysis of various artificial and natural joints is given, namely: joints of mammals, endoprostheses and various types of hinges (uniaxial, biaxial) used in robotics. As a result of the analysis, advantages and disadvantages of all designs were revealed. It was decided to create a joint that would combine the main advantages of all the options considered. The endoprosthesis used in medicine was taken as a basis. The medical joint has the greatest mobility and has 3 degrees of freedom. Such endoprostheses are made of expensive materials, so it is economically inexpedient to use them in robotics. 3D printing with ABS plastic. To ensure the wear resistance of plastic parts during the operation of the joint, it was decided to fill the joint with a synovial fluid. The developed prototype has a high mobility and ease of actualy, which makes it suitable for a wide range of tasks.

Keywords: artificial joint, robotics, 3D printing, degree of freedom, robot, android, endoprosthesis, hinge, cardan, pin

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-21-32

REFERENCES

1. *Stepeni svobody (mekhanika)* [Degrees of freedom (mechanics)]. *Vikipediya: svobodnaya entsiklopediya* [Wikipedia: the free encyclopedia]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Stepeni_svobody_\(mekhanika\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Stepeni_svobody_(mekhanika)) (accessed 10.11.2017).

2. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. *Teoreticheskie osnovy robototekhniki*. V 2 kn. Kn. 2 [Theoretical basis of robotics. In 2 bk. Bk. 2]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 376 p.

* Received 23 October 2017.

3. Maksimov A.L., Gorbach E.N., Kaminskii A.V. Analiz prichin aseptichestskoi nestabil'nosti endoproteza tazobedrennogo sustava kompanii "Altimed" [Analysis of the causes aseptic instability of "Altimed" company hip endoprosthesis]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no. 5.

4. *Asepticheskaya nestabil'nost' endoproteza* [Aseptic instability of the endoprosthesis]. Available at: <https://femurhead.ru/asepticheskaya-nestabilnost-endoproteza/> (accessed 18.11.2017).

5. Endoprotezirovanie sustavov [Endoprosthesis of joints]. Available at: <http://present5.com/endoprotezirovanie-sustavov-protez-iskusstvennoe-prisposoblenie/> (accessed 14.11.2017).

6. Kurepina M.M., Ozhigova A.P., Nikitina A.A. *Anatomiya cheloveka* [Human anatomy]. Moscow, Vldos Publ., 2010. 383 p.

7. Gaivoronskii I.V., Nichiporuk G.I., Gaivoronskii A.I. *Anatomiya i fiziologiya cheloveka* [Anatomy and physiology of man]. 6th ed. Moscow, Akademiya Publ., 2011. 496 p.

8. Bekurin M. *Kardannaya peredacha* [Cardan transmission]. Available at: <http://inoschool.ru/item/208-17-kardannaya-peredacha> (accessed 25.11.2017).

9. *Sustavy skeleta cheloveka* [Joints of the human skeleton]. Available at: http://house-massage.ru/sustavy_skeleta_cheloveka.html (accessed 19.11.2017).

10. Bulgakov A.G., Vorob'ev V.A. *Promyshlennyye roboty: kinematika, dinamika, kontrol' i upravlenie* [Industrial robots: kinematics, dynamics, control and management]. Moscow, Solon-Press Publ., 2007. 488 p.

11. Glazkov V.A., Yakhrichev V.V. *Osnovy robototekhniki* [Basics of Robotics]. Vologda, VoGU Publ., 2014. 31 p.

12. Beketov P.O. [Development of a robotic artificial hand using 3D prototyping technology]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik nauchnykh trudov* [Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers]. Novosibirsk, 5–9 December 2015, pt. 6, pp. 43–44. (In Russian).

Для цитирования:

Захаров И.А., Устюгова И.Н., Попова Т.С. Разработка искусственного сустава для применения в робототехнике // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 4 (90). – С. 21–32.

For citation:

Zakharov I.A., Ustyugova I.N., Popova T.S. Razrabotka iskusstvennogo sustava dlya primeneniya v robototekhnike [The development of a joint, is most effective for use in robotics]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 4 (90), pp. 21–32.