

Принцип построения интеллектуального самоперемещающегося адаптивного протеза верхней конечности на основе параллельного робота «Октаэдральный додекапод»

Аннотация

Представлена новая концепция интеллектуального самоперемещающегося адаптивного протеза верхней конечности, построенного на основе робота-манипулятора параллельной структуры в виде октаэдрального додекапода. Описаны конструктивные принципы, позволяющие обеспечить его самоперемещение и самоустановку на культю независимо от уровня ампутации, высокую удельную жесткость, а также надежное схватывание предметов независимо от их неметрической формы, размеров и физических свойств материала изготовления. Показаны примеры возможного применения на физических моделях протеза.

Введение

На протяжении многих веков протезирование кисти/руки проходило этапы эволюции, развития и инноваций, и в настоящее время известно множество различных типов протеза верхней конечности (ВК). Выбор протеза зависит от уровня ампутации и потребностей пациента. Здесь все они могут быть объединены в следующие основные группы [1]-[6]:

- 1) пассивные протезы, к которым относятся статические или регулируемые косметические протезы (рис. 1а), а также протезные инструменты (рис. 1б) для удержания предмета при отсутствии пальца, кисти или предплечья [1], [3];
- 2) активные тяговые протезы [1], [5], [6], которые закрепляют на теле пациента и приводят в действие при помощи троса (рис. 1в);
- 3) протезы, использующие миотонический, биоэлектрический и контактный методы управления (рис. 1г) [1], [5], [6] с использованием объемного изменения мышц, биоэлектрического и мышечного компонентов, а также воздействие на элемент управления, например переключатель.

Несмотря на большое разнообразие протезов ВК, создание интеллектуального и универсального протеза остается слож-

ной проблемой. При этом выявлены некоторые общие проблемы создания интеллектуальных протезов ВК и их частей, которые приведены ниже:

- 1) самоперемещение протеза ВК внутри помещения к пациенту;
- 2) высокая жесткость и низкий вес конструкции протеза;
- 3) самоустановка протеза на культю независимо от уровня ампутации;
- 4) надежное схватывание разнообразных предметов независимо от их геометрической формы, размеров и физических свойств материала изготовления.

Первая проблема может быть решена, например, при помощи мобильного манипулятора-помощника [7], способного автономно схватывать и доставлять пользователю предметы самой разнообразной формы, включая протезы ВК, лежащие на поверхностях доступного уровня (рис. 1д).

Вторая проблема может быть решена, например, путем построения корпусных силовых и миоэлектрических типов протезов рук на базе пространственных параллельных механизмов. При этом пространственные параллельные механизмы могут быть использованы при протезировании, например, руки [8], а также предплечья (рис. 1е) [9] и предплечья с большим пальцем (рис. 1ж) [10].

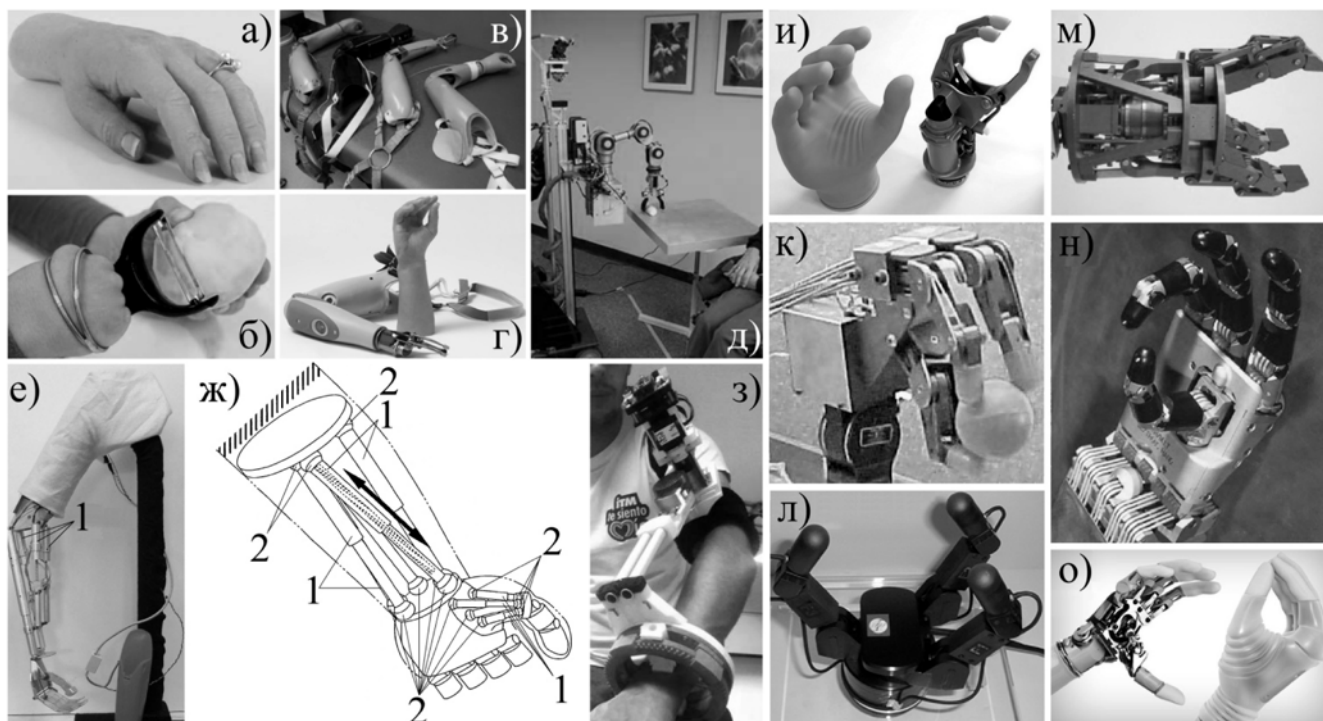


Рис. 1. Основные типы протезов ВК: пассивный статический косметический протез (а); упругое протезное устройство (б); активный тяговый протез (в); миоэлектрический протез (г); мобильный манипулятор-помощник (д); протезы предплечья с механизмами параллельной структуры (е, ж, 1 – линейный привод, 2 – шаровая опора); механизм крепления экзоскелета к предплечью (з); протезы кисти с двумя (и), тремя (к, л, м), четырьмя (н) и пятью (о) активными пальцами (пояснения в тексте)

Третья проблема может быть решена, например, при помощи механизма автоматической регулировки размеров устройства крепления протеза к ВК подобно креплению экзоскелета к предплечью (рис. 1з). Механизм выполнен в виде фиксируемого на запястье кольцевого двухрукачкового зажимного устройства, преобразующего вращательное движение кольца в радиальное перемещение двух оппозитных упоров фиксации механизма на запястье [11].

Четвертая проблема в настоящее время решается при помощи различных антропоморфных протезов (рис. 1) с одним (е, ж) [9], [10], двумя (г, и) [1], [12], тремя (к, л, м) [1], [2], четырьмя (н) [2] и пятью (о) [1] активными пальцами. Однако ни один из них не способен автоматизировать надежное схватывание разнообразных объектов независимо от их геометрической формы, размеров и физических свойств материала изготовления. Особенно в том случае, когда размеры предметов больше размеров кисти протеза.

Таким образом, решение названных четырех проблем одним устройством является актуальным и перспективным направлением в области интеллектуальной медицинской инженерии.

Цель работы – разработка новой концепции интеллектуального самоперемещающегося адаптивного протеза (ИСАП) ВК, способного самоперемещаться по поверхности помещения и доставлять предметы пациенту, самоустанавливаться на его культю независимо от уровня ампутации ВК, обладать, благодаря параллельной структуре, высокой удельной жесткостью, а также обеспечивать надежное схватывание одного или нескольких предметов независимо от их геометрической формы, размеров и физических свойств материала изготовления.

Описание устройства и функционирования ИСАП ВК

Для достижения поставленной цели в ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН разработана принципиально новая концепция ИСАП ВК, построенная на основе пространственного механизма параллельной структуры [13]. Следует отметить, что к настоящему времени в ИМАШ РАН накоплен богатый и многолетний научный и инженерный опыт в области анализа и синтеза механизмов параллель-

ной структуры различного функционального назначения, многие из которых внедрены и использованы в экономике Российской Федерации [14]. Ниже дано описание концепции построения и принципы функционирования ИСАП ВК.

ИСАП ВК выполнен на основе адаптивного мобильного пространственного реабилитационного робота-манипулятора в виде октаэдрального додекапода [15], который в исходном положении представляет собой октаэдральный модуль (ОМ) ABCDEF 1 (здесь и далее номера позиций соответствуют позициям на рис. 2). Концы ребер-стержней ОМ1 шарнирно соединены в вершинах 2 посредством сферических или эквивалентных им шарниров [13]. Каждый из стержней снабжен линейным приводом (ЛП) 3 с осевыми датчиками силы (ОДС) 4, относительного перемещения (ОДОП) 5 и относительной скорости (ОДОС) 6. ЛП 3 выполнен с возможностью изменения своей длины по управляющим командам от системы управления (СУ) 7, включающей в себя нейрокомпьютер 8 с соответствующим программно-алгоритмическим обеспечением (ПАО) 9 и цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) 10. При этом одна из граней ОМ 1, например ABC, выполнена стыковочной и снабжена трехупорным упругим схватом, каждый из упоров которого представляет собой упругую пластину 11 с электродом 12 (рис. 2). При этом электроды 12 установлены на контактной поверхности пластин 11 с возможностью механического и электрического соединения с соответствующими электродами 13, расположенными на контактной поверхности гильзы культи 14. На гильзе культи 14 установлен датчик пространственного положения (ДПП) 15, который через беспроводное соединение глобальной системы позиционирования типа ГЛОНАСС 16 или GPS связан с нейрокомпьютером 8. Пациент связан с СУ 7 через средства формирования волевых команд, включающие в себя имплантированный в его мозг чип 17, датчик обнаружения изменений потенциала нервной системы (на рис. 2 условно не показан), датчик обнаружения движения мышц (на рис. 2 условно не показан), датчик звуковых колебаний 18, а также их комбинации. При этом чип 17 и датчики обнаружения изменений потенциала нервной системы и движения электрически связаны с СУ 7 через электроды 13 и 12 и аналого-цифровые преобразователи (АЦП) 19, а дат-

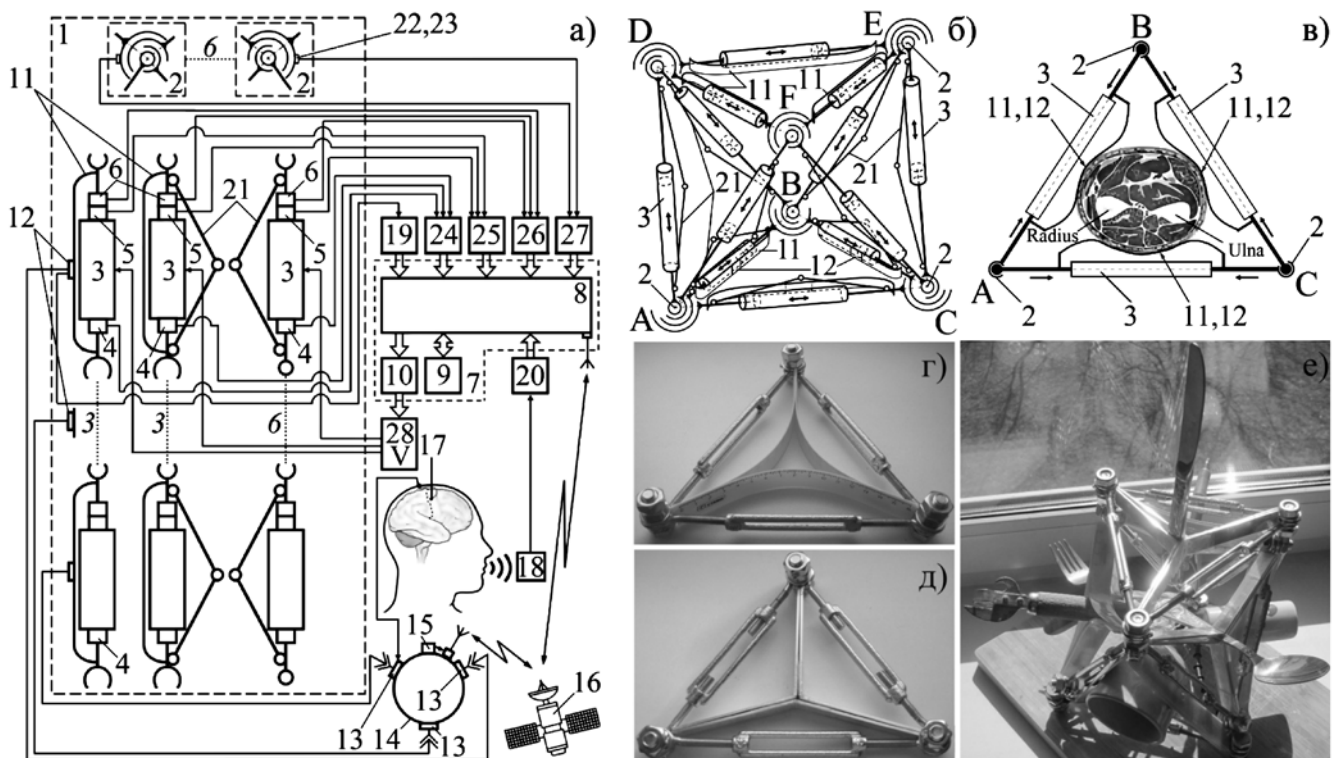


Рис. 2. Структурная (а) и кинематическая (б) схемы ИСАП ВК; фиксация стыковочной грани ABC на предплечье (в); физические модели граней с упругим (г) и жестким (д) схватами; пример схватывания гранями физической модели ИСАП ВК различных предметов (пояснения в тексте)

чик звуковых колебаний 18 – через звуковые волны голосовых команд пациента и АЦП 20.

Концы упругой пластины 11 жестко соединены с концами соответствующего ЛП 3 и установлены с начальным прогибом в сторону центра грани (рис. 2б). Остальные грани ОМ 1 снабжены трехупорными упругими схватами без электродов и жесткими схватами в виде трех шарнирных двухзвеньев 21, наружные концы которых шарнирно соединены с концами соответствующего ЛП 3. Каждая из вершин 2 снабжена ДПП 22, совмещенным с датчиком ускорений (ДУ) 23. Входы СУ 7 через шины данных подключены соответственно к выходам АЦП 24, 25, 26 и 27, а выходы СУ 7 – к соответствующим входам ПАО 9 и последовательно соединенных ЦАП 10, усилителей мощности 28 и ЛП 3. Ниже приведено описание функционирования ИСАП ВК.

Схватывание предметов и гильзы культы 14 происходит с заданным сжимающим усилием путем уменьшения длин соответствующих ЛП 3 и прекращается либо по сигналам от ОДС 4, либо по голосовой команде пациента, например «СТОП». На рис. 2в-е показаны примеры схватывания и фиксации различных предметов при помощи упругих и жестких схватов. На рис. 3 показаны примеры манипуляций с физической моделью ИСАП ВК: фиксация ножа жестким схватом и его перемещение плечом с предплечьем (а), а также линейными приводами боковых граней (б). При помощи ОДОП 5, ДПП 15 и 22 осуществляется контроль позиционирования схватываемого предмета в пространстве, а при помощи ОДС 4, ОДОС 6 и ДУ 23 – скорости и ускорения движений схватов. При этом сигналы от датчиков поступают на входы АЦП 19, 20, 24-27 и через шину данных – в нейрокомпьютер 8, в котором, после обработки с использованием ПАО 9, формируются управляющие команды, поступающие через ЦАП 10 и усилители мощности 28 на ЛП 3.

Установка ИСАП ВК на гильзу культы 14 и управление пространственным перемещением его элементов осуществляются путем контроля всех длин между вершинами 2 при помощи ОДОП 5, ДПП 15 и 22, а также СУ 7 и средств формирования волевых команд пациента. Перед установкой ОМ 1 на гильзу культы 14 пациента устанавливают беспроводное соединение между СУ 7 и средствами формирования волевых команд пациента, включающими в себя имплантированный в его мозг чип 17, датчик обнаружения изменений потенциала нервной системы (на рис. 2 условно не показан) и датчик обнаружения движения мышц (на рис. 2 условно не показан) и датчик звуковых колебаний 18 (рис. 2). После этого в СУ 7 вводят образцы голосовых команд пользователя с характеристиками схватываемых предметов, планировку помещения и координаты предметов пользования, включая устройство беспроводной зарядки источника питания, связывают их с базовой системой координат и самоустанавливают ОМ 1 на гильзу культы 14 ВК. Затем культу с гильзой 14 подводят к стыковочной грани и подают голосовую команду СУ 1 на схватывание гильзы 14. При этом в режиме реального времени по беспроводному соединению в СУ 7 от ДПП 15 гильзы культы 14 ВК поступают ее пространственные координаты относительно базовой системы координат, которые анализируют и формируют управляющие команды к ЛП 3. В результате согласованного изменения длин стержней AD, AF, BD, BE, CF и CE с соответствующими ЛП 3 происходит совмещение плоскости стыковочного упругого схвата грани ABC со стыковочной плоскостью гильзы культы 14. После этого ЛП 3 отключают, уменьшают длины ЛП 3 стержней АВ, ВС и СА стыковочного упругого схвата ОМ 1 и производят схватывание гильзы культы 14 ВК упругими упорами с заданными усилиями, которые определяют по показаниям ОДС 4. Затем ЛП 3 стыковочной грани ABC отключают и приступают к эксплуатации ОМ 1, при которой используют все свободные схваты. При этом перед схватыванием предмета выбирают плоскость контакта с предметом, организуют согласованное движение культы 14 ВК и ЛП 3 до совмещения плоскости контакта охватываемого предмета с внутренней поверхностью схвата, а охватываемого предмета – с наружной поверхностью вершин 2 соответствующей грани схвата. Усилие фиксации схватываемого предмета определяют по показаниям ОДС 4. После этого ЛП 3 отключают и вычисляют координаты вершин 2 относительно базовой системы координат. При этом перед схватыванием предмета голосовой командой называют характеристики предмета (например, «мягкий предмет», «твердый предмет», «хрупкий предмет» и т. д.), а при голосовом управлении схватом называют его обозначение (например, DEF, DBA, DEB, BCE, CEF, ACF, ADF или «схват 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7»). Далее совершают требуемое пространственное манипулирование предметом путем согласованных движений гильзы культы 14 ВК и изменения длины стержней свободных граней ОМ 1. После установки предмета на выбранное место согласованно увеличивают длины стержней грани схвата до момента расфиксации предмета, о которой судят по показаниям его ОДС 4 и ОДОП 5, и продолжают эксплуатацию ОМ 1.

ых колебаний 18 (рис. 2). После этого в СУ 7 вводят образцы голосовых команд пользователя с характеристиками схватываемых предметов, планировку помещения и координаты предметов пользования, включая устройство беспроводной зарядки источника питания, связывают их с базовой системой координат и самоустанавливают ОМ 1 на гильзу культы 14 ВК. Затем культу с гильзой 14 подводят к стыковочной грани и подают голосовую команду СУ 1 на схватывание гильзы 14. При этом в режиме реального времени по беспроводному соединению в СУ 7 от ДПП 15 гильзы культы 14 ВК поступают ее пространственные координаты относительно базовой системы координат, которые анализируют и формируют управляющие команды к ЛП 3. В результате согласованного изменения длин стержней AD, AF, BD, BE, CF и CE с соответствующими ЛП 3 происходит совмещение плоскости стыковочного упругого схвата грани ABC со стыковочной плоскостью гильзы культы 14. После этого ЛП 3 отключают, уменьшают длины ЛП 3 стержней АВ, ВС и СА стыковочного упругого схвата ОМ 1 и производят схватывание гильзы культы 14 ВК упругими упорами с заданными усилиями, которые определяют по показаниям ОДС 4. Затем ЛП 3 стыковочной грани ABC отключают и приступают к эксплуатации ОМ 1, при которой используют все свободные схваты. При этом перед схватыванием предмета выбирают плоскость контакта с предметом, организуют согласованное движение культы 14 ВК и ЛП 3 до совмещения плоскости контакта охватываемого предмета с внутренней поверхностью схвата, а охватываемого предмета – с наружной поверхностью вершин 2 соответствующей грани схвата. Усилие фиксации схватываемого предмета определяют по показаниям ОДС 4. После этого ЛП 3 отключают и вычисляют координаты вершин 2 относительно базовой системы координат. При этом перед схватыванием предмета голосовой командой называют характеристики предмета (например, «мягкий предмет», «твердый предмет», «хрупкий предмет» и т. д.), а при голосовом управлении схватом называют его обозначение (например, DEF, DBA, DEB, BCE, CEF, ACF, ADF или «схват 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7»). Далее совершают требуемое пространственное манипулирование предметом путем согласованных движений гильзы культы 14 ВК и изменения длины стержней свободных граней ОМ 1. После установки предмета на выбранное место согласованно увеличивают длины стержней грани схвата до момента расфиксации предмета, о которой судят по показаниям его ОДС 4 и ОДОП 5, и продолжают эксплуатацию ОМ 1.

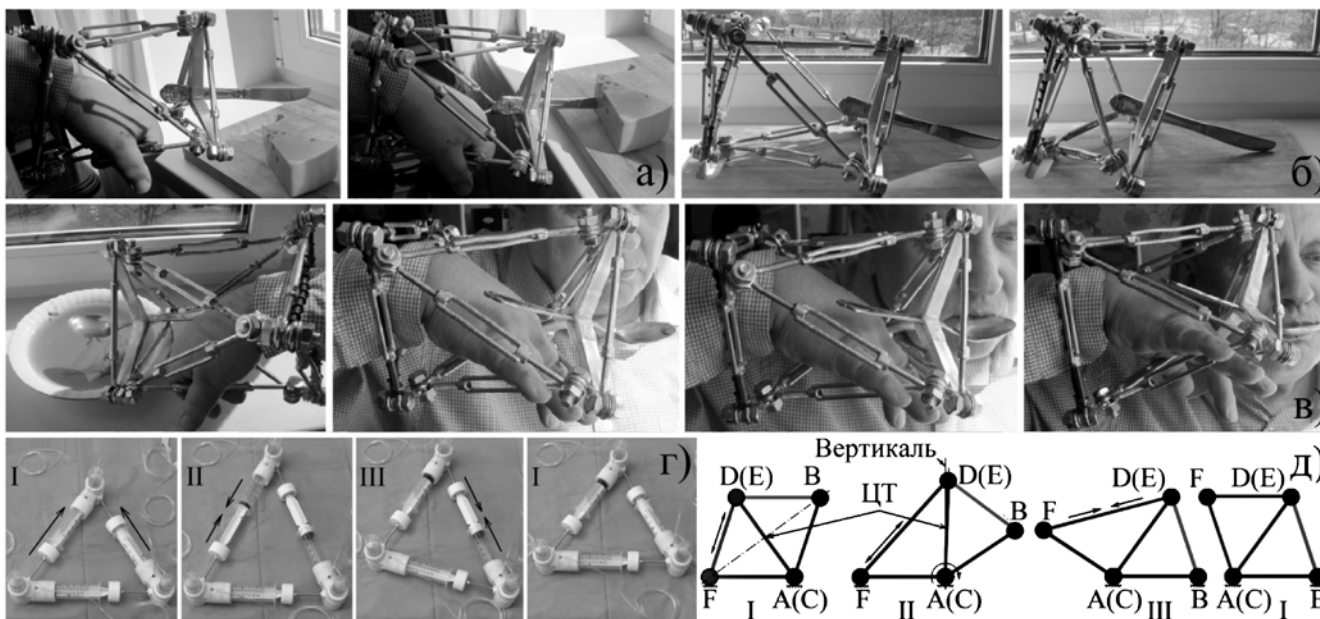


Рис. 3. Манипуляции с физической моделью ИСАП ВК: фиксация ножа жестким схватом и его перемещение плечом с предплечьем (а) и линейными приводами боковых граней (б); фиксация ложки жестким схватом и ее перемещение с жидкостью (в); перемещение физической модели грани ОМ ползанием по-пластунски (в); перемещение ОМ перекачиванием (г) (пояснения в тексте)

После окончания эксплуатации ОМ 1 пациент подает голосовые команды на освобождение гильзы культы 14 от стыковочного схвата АВС и подзарядку источника питания ОМ 1. При этом длины стержней стыковочной грани АВС увеличивают и, после расфиксации с гильзой культы 14, выключают соответствующие ЛП 3 и устанавливают контакт одной из граней ОМ 1 с поверхностью перемещения. Далее уменьшают длины всех стержней ОМ 1 до минимальных значений и ЛП 3 выключают. После этого по показаниям ДПП 22 определяют пространственные координаты вершин 2 относительно базовой системы координат, сравнивают их с пространственными координатами устройства беспроводной зарядки источника питания, формируют траекторию следования, которую при необходимости разбивают на повороты и прямолинейные участки, а также алгоритм управляющих команд на соответствующие ЛП 3. Затем согласованно изменяют длины ЛП 3 и организуют ползающее движение ОМ 1 по-пластунски по намеченной траектории следования подобно перемещению по поверхности физической модели ее грани (рис. 3з). При этом на начальном этапе (рис. 3з, этап I) стержни контактируемой с поверхностью грани ОМ 1 имеют минимальную длину. Затем включают ЛП 3 смежных стержней с общей вершиной 2, близлежащей к конечному пункту траектории или точке ее поворота к следующему прямолинейному участку, увеличивают их длину и, после перемещения вершины 2 вдоль намеченной траектории на величину заданного шага, контролируемого по показаниям ОДОП 5 этих стержней, ЛП 3 выключают (рис. 3з, этап II). После этого включают ЛП 3 одного из названных смежных стержней, уменьшают его длину на заданную величину, контролируемую по показаниям ОДОП 5, и выключают данный ЛП 3 (рис. 3з, этап III). Далее включают ЛП 3 второго из названных смежных стержней, уменьшают его длину, как и у первого смежного стержня, на такую же заданную величину, контролируемую по показаниям ОДОП 5, выключают данный ЛП 3 и контактируемая с поверхностью грань ОМ 1 вновь принимает исходное положение, как и на начальном этапе, но уже перемещенная вдоль траектории на величину заданного шага (рис. 3з, этап I). После этого алгоритм прямолинейного движения ОМ 1 повторяют и обеспечивают его перемещение до конечного пункта маршрута или до точки поворота к следующему прямолинейному участку, после чего алгоритм поворота и прямолинейного движения повторяют. Затем все ЛП 3 выключают, заряжают источник питания ИСАП ВК и включают режим ожидания команд, которые пациент передает СУ 7 через средства формирования волевых команд пациента.

В случае неровной контактируемой поверхности или наличия на ней препятствующих предметов с размерами, меньшими размеров внутренней поверхности граней ОМ 1 при минимальной длине их стержней, организуют перекатывающееся движение ОМ 1 по поверхности за счет смещения его центра тяжести (ЦТ) (рис. 3д и 4). При этом на начальном этапе I

все стержни ОМ 1 имеют одинаковую длину, а грань FАC является контактирующей с поверхностью (рис. 3д). На этапе II стержни FD и FE увеличивают до момента, пока ЦТ ОМ 1 не переместится вправо от вертикальной плоскости, проходящей через вершины А и С. В результате произойдет поворот ОМ 1 относительно оси АС и контактирующей станет грань АВС (этап III). Далее стержни FD и FE уменьшают до первоначальной длины и ОМ 1 принимает исходное положение (этап I). После этого алгоритм перемещения путем перекатывания ОМ 1 повторяют. На рис. 4 показан пример возможного перемещения ОМ 1 ABCDEF перекатыванием от места его локального расположения до культы ВК пациента и его самоустановка на ней.

В случае недостаточного рабочего хода ЛП 3 перекатывание ОМ 1 может быть организовано с использованием сил инерции. При этом длину соответствующих ЛП 3 согласованно увеличивают с заданным ускорением и выключают в конечный момент времени, определяемый при помощи ОДОП 5, ОДОС 6, ДПП 22 и ДУ 23. В результате, кроме момента силы тяжести, на ОМ 1 будут действовать моменты сил инерции, направленные в противоположную сторону, которые и обеспечат перекат ОМ 1 с одной грани на другую. После перекатывания выдвинутые стержни возвращают в исходное положение и соответствующие ЛП 3 выключают. Далее выбирают следующую ось поворота ОМ 1 и алгоритм перекатывающегося движения с использованием сил инерции повторяют. В случае необходимости преодоления препятствий или разноуровневых поверхностей организуют прыгающее движение ОМ 1 с использованием сил инерции подобно предыдущему случаю.

Практическая реализация ИСАП ВК возможна на основе существующих мехатронных и коммуникационных навигационных систем, применяемых в современной космической и робототехнике.

Заключение

Создание ИСАП ВК, способного самоперемещаться по поверхности помещения и доставлять предметы пациенту, самоустанавливаться на его культю независимо от уровня ампутации ВК, обладать благодаря параллельной структуре высокой удельной жесткостью, а также обеспечивать надежное схватывание одного или нескольких предметов независимо от их геометрической формы, размеров и физических свойств материала изготовления, является актуальным и перспективным направлением в области интеллектуальной медицинской инженерии.

Показана возможность организации связи пациента с системой управления ИСАП ВК через средства формирования волевых команд, включающие в себя имплантированный в мозг пациента чип, датчик обнаружения изменений потенциала нервной системы, датчик обнаружения движения мышц, датчик звуковых колебаний, а также их комбинации.

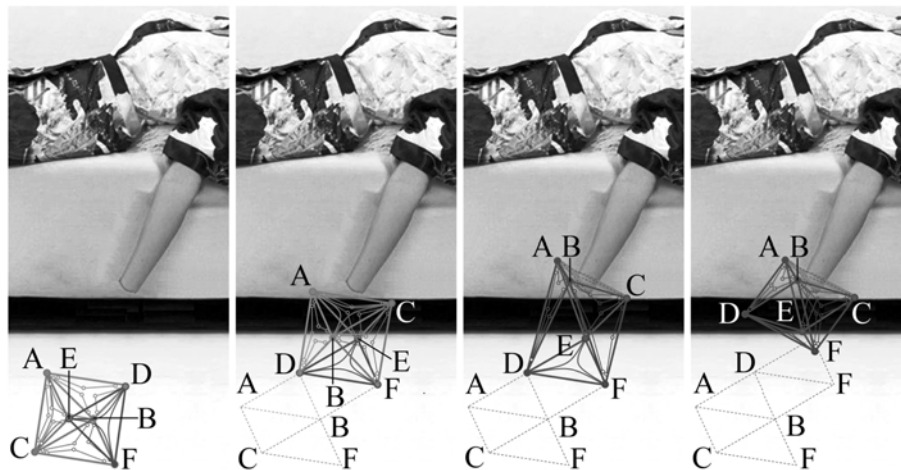


Рис. 4. Пример самоперемещения ОМ (ABCDEF) к пользователю и его самоустановка на культю через упругий схват АВС (пояснения в тексте)

