

УДК 004.896

Симбиотический подход к массажной робототехнике: концепция и перспективы

С.Н. Саяпин

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Symbiotic approach to massage robotics: concept and prospects

S.N. Sayarin

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Непрерывно возрастающий интерес к массажу, являющемуся одним из самых эффективных немедикаментозных методов лечения травм и заболеваний, привел к возникновению в мире дефицита профессиональных массажистов и массажных кабинетов. Показано, что помимо малоэффективных интенсивного и экстенсивного путей решения проблемы, перспективным является направление по созданию роботизированных массажных комплексов. Однако существующие и перспективные роботизированные массажные комплексы являются коллаборационными и имеют большие значения массогабаритных характеристик и потребляемой мощности. Это делает проблематичным их применение в условиях ограниченного пространства и энергопитания, таких как орбитальная и полярная станции, судовые помещения, полевые условия труда и др. Предложен новый симбиотический подход к созданию массажной робототехники, направленный на решение поставленной проблемы. На примерах, концепций массажных роботов «Триангель» и «Октаэдральный додекапод», разработанных специалистами Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, показана перспективность симбиотического подхода к созданию роботизированных массажных комплексов.

EDN: BQCXDQ**Ключевые слова:** массажная робототехника, коллаборационные массажные роботы, симбиотический подход

The interest to massage is constantly growing, as it is one of the most effective drug-free methods in treating injuries and diseases. This interest led to a shortage of professional massage therapists and massage parlors around the world. The paper shows that in addition to ineffective intensive and extensive ways to solve the problem, an approach to creating the robotic massage systems becomes promising. However, the existing and promising robotic massage systems are collaborative and are characterized by large weight, size and high power consumption. This makes their implementation rather problematic in limited space and power supply, such as orbital and polar stations, ship premises, field working conditions, etc. A new symbiotic approach to creation of the massage robotics is proposed aimed at solving this problem. Using examples of the Triangle and Octahedral Dodecapod massage robot concepts designed and developed by specialists from the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science, the paper demonstrates the prospects of symbiotic approach to creation of the robotic massage systems.

EDN: BQCXDQ**Keywords:** massage robotics, collaborative massage robots, symbiotic approach

Массаж, применяемый с древних времен, считается одним из самых эффективных немедикаментозных методов лечения и профилактики травм и заболеваний [1]. Этим обусловлена растущая потребность в массаже и его бурное развитие в мире и, как следствие, дефицит профессиональных массажистов и массажных кабинетов [2]. В результате возрастает физическая и психологическая нагрузка на массажиста и снижается пропускная способность массажных кабинетов.

Проблему можно решить тремя путями: интенсивным — повышением нагрузки на массажиста и использованием аппаратных средств (что ограничено физической выносливостью массажиста); экстенсивным — увеличением количества квалифицированных массажистов (что ограничено значительным временем обучения и приобретением практического опыта); максимальной роботизацией процесса массажа.

Третий путь является наиболее перспективным, так как не требует увеличения нагрузки на массажистов и их количества. Роботизация процесса массажа позволяет одному квалифицированному специалисту одновременно обслуживать несколько роботизированных массажных систем и проводить мониторинг про-

цесса массажа в режиме реального времени. Для этих целей создают коллаборативных роботов (коботов), предназначенных для совместной работы с человеком [3–5].

Так, в январе 2022 г. в Лас-Вегасе прошла выставка CES (Consumer Electronics Show), где был представлен автономный двурукий роботизированный массажный комплекс (РМК) MR-01 (рис. 1, а–в) с семиосевой подвижностью каждой руки компании Massage Robotics (США) [6]. На сегодняшний день он является самым продвинутым среди подобных комплексов. РМК, оснащенный искусственным интеллектом, подключен к системе Google Cloud Platform, понимает речь на английском и китайском языках и может по желанию клиента изменять движения.

Другим примером современного РМК является реабилитационный робот ROBERT немецкой компании KUKA (рис. 1, г) для массажа верхних и нижних конечностей (МВНК), включающий в себя соответствующий массажный инструмент (рабочий орган), стыкуемый с выходным звеном однорукого медицинского робота Lbr Med компании KUKA [7]. Робот Lbr Med оснащен интеллектуальной системой управления и обладает семиосевой подвижностью, которая в сочетании с чувствительными

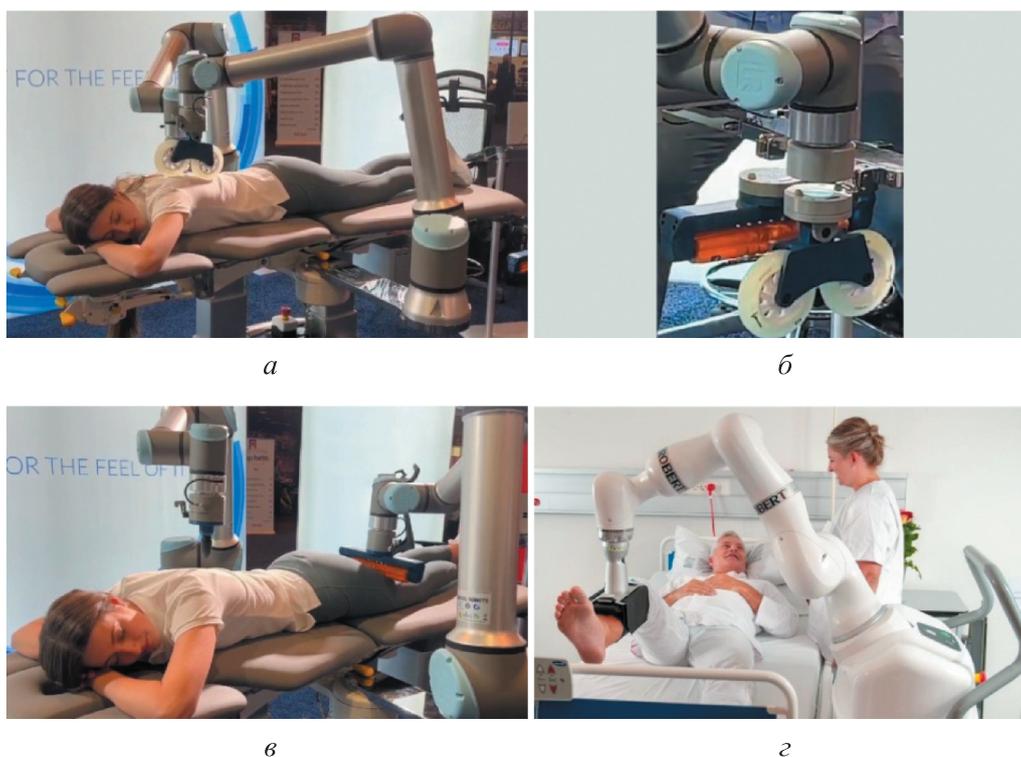


Рис. 1. Внешний вид современных РМК:
а–в — двурукого массажного робота MR-01 с разными рабочими органами;
г — однорукого реабилитационного робота ROBERT

датчиками обеспечивает ему прецизионные движения рабочего органа.

Высокая степень гибкости, чувствительности, прецизионности и простота интеграции в различные медицинские изделия обуславливают широкое применение реабилитационного робота ROBERT в медицине, включая общий массаж частей тела и скользящий баночный массаж спины и груди.

Перед проведением массажа в автономном режиме медсестра вручную выполняет требуемые массажные движения. При этом робот ROBERT запоминает их и после окончания обучающих движений делает их автономно в соответствии с заданными режимами. В случае резких движений или любых внешних силовых воздействий робот немедленно останавливается по условиям безопасности.

Приведенные примеры являются классическими образцами коллаборационных одно- и двуруких манипуляционных РМК, поэтому их недостатки присущи и другим подобным РМК. При проведении массажа пациент должен занимать фиксированное относительно массажного стола или кровати положение тела. Другим недостатком служит ограниченность практического применения РМК, связанная с большими значениями массогабаритных характеристик и потребляемой мощности.

В связи с этим подобные РМК нельзя использовать в условиях ограниченного пространства и энергопитания (таких как орбитальная и полярная станции, судовые помещения, полевые условия труда и др.), что ограничивает выполнение приказа Минтруда России от 29.10.2021 г. № 771н «Об утверждении Примерного перечня ежегодно реализуемых работодателем мероприятий по улучшению условий и охраны труда, ликвидации или снижению уровней профессиональных рисков либо недопущению повышения их уровней».

Для решения этой проблемы в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) предложен симбиотический подход к созданию РМК.

Цель исследования — разработка симбиотического подхода к созданию массажной робототехники, позволяющего конструировать автономные портативные носимые массажные роботы (МР) и, как следствие, уменьшить их массогабаритные параметры и энергопотребление по сравнению с таковыми современных РМК.

Симбиотический подход к созданию массажной робототехники и примеры его реализации. Суть предлагаемого симбиотического подхода (основанного на симбиозе от греческого слова «συμ-βίωσις» — сожительство, совместная жизнь) к созданию массажной робототехники в виде МР (носимых симбионтов) заключается в их объединении с массируемыми частями тела пациента (спиной, грудью, верхними или нижними конечностями и др. — несущими симбионтами) в единую систему с общей системой координат и обеспечении их независимого функционирования в процессе проведения автономного массажа.

Симбиотический подход позволяет создавать портативные носимые мобильные МР, с помощью которых пациент или группа пациентов получают возможность проводить автономный массаж частей тела и мониторинг состояния не только в медицинских учреждениях, но и в домашних и полевых условиях под присмотром, при необходимости, профессионального массажиста в режиме реального времени через Интернет.

Рассмотрим возможность реализации симбиотического подхода к созданию массажной робототехники на примере портативных носимых симбиотических самоперемещающихся МР, получивших названия «Триангель» [8, 9] и «Октаэдральный додекапод» [10, 11]. Эти МР выполнены на основе плоского и пространственного механизмов параллельной структуры, что обеспечивает им по сравнению с механизмами последовательной структуры (см. рис. 1) более высокие удельную жесткость, быстродействие и точность позиционирования выходного звена [12].

МР «Триангель» предназначен для автономного проведения скользящего баночного массажа (СБМ) на спине и груди пациента, который одновременно сочетает в себе воздействующие факторы массажа и вакуумных банок (ВБ). Последние можно установить как неподвижно, так и с возможностью совершения скользящих массажных движений ими без разгерметизации и отрыва от тела (рис. 2, а) [1].

МР «Триангель» не требует присутствия массажиста, а управлять им можно как программно, так и через Интернет. Кроме того, проведение СБМ с помощью МР «Триангель» возможно при движениях пациента и не зависит от его пространственного положения.

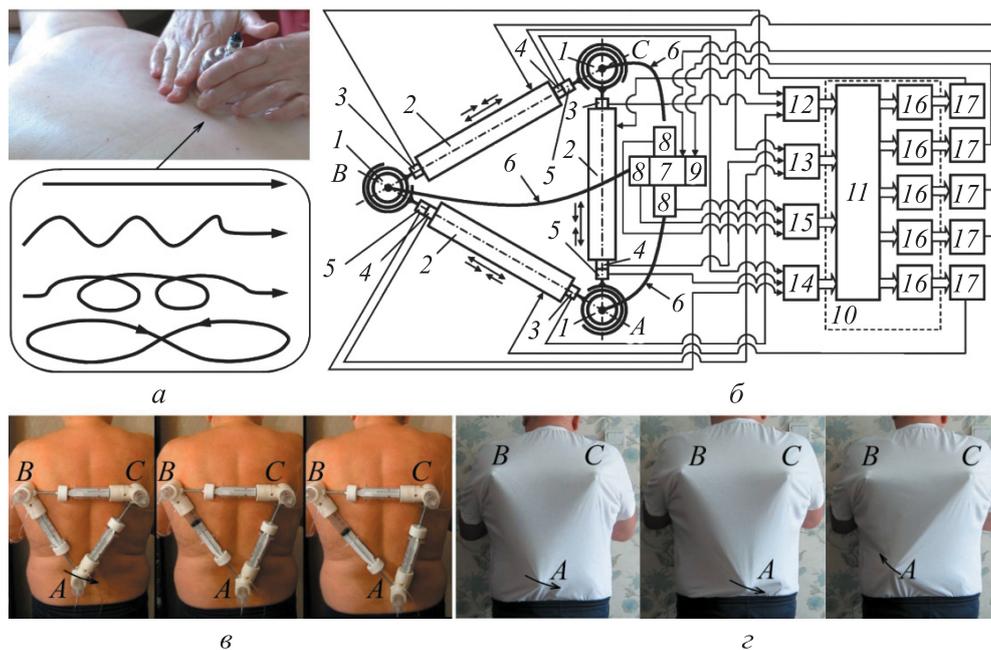


Рис. 2. МР «Триангель»: а — установка ВВ и траектории ее движения при СБМ; б — структурная схема МР; в и з — фрагмент выполнения СБМ прототипом МР на спине пациента и дугообразные движения ВВ А при голом торсе и под футболкой соответственно

МР «Триангель» выполнен в виде активного треугольника *ABC* с ВВ 1 при его вершинах (рис. 2, б–з) [8, 9]. Параллельная структура активного треугольника *ABC*, образованная шарнирным соединением стержней, каждый из которых включает в себя линейный привод (ЛП) 2, датчики силы (ДС) 3, относительного перемещения (ДОП) 4 и относительной скорости (ДОС) 5, имеет три степени свободы и обеспечивает ему геометрическую неизменяемость при выключенных ЛП.

ВВ герметично соединены гибкими шлангами 6 с соответствующими каналами воздухо-распределителя (ВР) 7. Последний снабжен датчиками давления (ДД) 8 и вакуумным насосом (ВН) 9, которые электрически связаны с системой управления (СУ) 10 в виде нейрокомпьютера 11 с аналого-цифровыми (АЦП) и цифроаналоговыми (ЦАП) преобразователями.

Входы СУ через шины данных АЦП подключены к выходам АЦП 12, 13, 14, 15 соответственно ДС, ДОП, ДОС и ДД. Выходы СУ через ЦАП 16 и усилители мощности (УМ) 17 соединены с ЛП, клапанами ВР и ВН. СУ обеспечивает оперативный контроль и управление в режиме реального времени.

Для проведения СБМ пациент прикладывает ВВ к подготовленной поверхности спины или груди и фиксирует его путем их вакуумирова-

ния (см. рис. 2, в и з). После фиксации с поверхностью тела пациента образуется симбиоз космонавт — МР «Триангель», симбионты которого могут продолжать функционировать независимо друг от друга. Полученный симбиоз сохраняется независимо от движений пациента и его пространственной ориентации.

Давление в ВВ регулируется с помощью ВР, ДД и ВН по командам от СУ так, чтобы две ВН герметично фиксировались на теле неподвижно, а третья — подвижно. Далее осуществляют ввод в СУ индивидуальных данных пациента, которые включают в себя контуры массируемых участков тела, связанные с базовой системой координат симбиоза, координаты участков тела, недопустимые для СБМ, и координаты центров перемещаемых ВВ.

Траектории движения подвижной ВВ по поверхности тела при проведении СБМ показаны на рис. 2, а [1]. Геометрическая неизменяемость активного треугольника *ABC* позволяет определять координаты его вершин с ВВ и управлять ими путем измерения длин всех стержней посредством ДОП. Все ВВ в процессе СБМ поочередно становятся перемещаемыми и неподвижными.

МР «Триангель» также может осуществлять локальный вакуумный массаж путем циклического изменения давления в ВВ и массаж сдвига-

нием и растяжением мышечных тканей с помощью двух или трех неподвижных ВБ [1, 8, 9]. Для повышения комфортности поверх тела с МР «Триангель» может быть надета футболка (см. рис. 2, з).

Важной отличительной особенностью МР «Триангель» является способность наращиваться путем присоединения дополнительных ВБ и стержневых структур с линейными приводами и датчиками. В результате могут быть получены массажные поверхности, жилеты, нарукавники и чулки с изменяемыми геометрическими характеристиками, способные повысить эффективность баночного массажа.

Для определения геометрических, кинематических и динамических параметров МР «Триангель» в ИМАШ РАН изготовлен и испытан его полномасштабный пневматический прототип в виде треугольного механизма параллельной структуры с тремя степенями свободы (см. рис. 2, в) с применением девяти одноразовых шприцев вместимостью 60 мл: трех — в качестве пневматических ЛП (см. рис. 2, в и з) и шести — в качестве ВН (на рис. 2 не показаны). При этом три корпуса шприцев использованы как ВБ АВС, а эластичные трубки с роликовыми зажимами от стандартных инфузионных систем — как соединительные гибкие шланги.

При макетной апробации МР «Триангель» проведен СБМ, включавший в себя отсос воздуха из ВБ и вертикальное перемещение пневматического прототипа МР «Триангель» по массируемой спине (см. рис. 2, в и з). Пневматический прототип ВБ в виде корпуса шприца по геометрическим размерам полностью соответствовал реальной ВБ, применяемой при СБМ (см. рис. 2, а).

При отработке прототипа ВБ из нее отсасывался воздух, и происходило втягивание кожи. С помощью динамометра ДПУ-0,1-2 (ГОСТ 13837-79) измерялось усилие перемещения прототипа ВБ при различных значениях ее вакуумирования и соответствующие им величины втягивания кожи.

Полученные экспериментальные зависимости позволили определить значения давлений в ВБ, при которых обеспечиваются ее герметичное перемещение с требуемым усилием и неподвижная фиксация на массируемом участке тела.

Испытания пневматического прототипа МР «Триангель» показали правильность выбран-

ной концепции в виде плоского трехступенного механизма параллельной структуры и продемонстрировали реальную возможность проведения СБМ, локального вакуумного массажа и массажа сдвиганием и растяжением мышечных тканей независимо от движений тела и его пространственного положения.

Также проведенные исследования позволили определить геометрические параметры ВБ, требуемые значения разрежения воздуха внутри ВБ и усилия ЛП МР «Триангель», необходимые для герметичного перемещения ВБ при СБМ. Управление пневматическими прототипами ЛП и ВН осуществлялось вручную.

Таким образом, показано, что разработанная концепция МР «Триангель» для автономного проведения СБМ, построенная на основе симбиотического подхода, позволит создать автономный портативный носимый МР и, как следствие, уменьшить массогабаритные параметры и энергопотребление по сравнению с таковыми современных РМК. Это дает возможность организовать его эффективную эксплуатацию в условиях ограниченного пространства и энергопитания.

Непрерывно возрастающая потребность в МВНК обусловлена его эффективным применением при терапевтических заболеваниях, травмах и заболеваниях опорно-двигательного аппарата, термических повреждениях, варикозном расширении поверхностных вен нижних конечностей, после оперативного вмешательства на тканях опорно-двигательного аппарата, травмах и заболеваниях нервной системы, кожных и других заболеваниях, в группы риска которых могут входить различные категории граждан [1].

Более подробно показания к МВНК с указанием режимов и методов практической реализации в зависимости от заболевания, травмы или в целях их профилактики приведены в работе [1]. Как уже отмечалось, в условиях ограниченного пространства и энергопитания эксплуатация современных РМК крайне затруднена.

При проведении МВНК массажист использует следующие основные приемы (рис. 3): поглаживание и растирание, продольное и поперечное разминание конечностей, мобилизацию и манипуляцию на локтевом или коленном суставе, манипуляцию вибрационного воздействия на конечность, манипуляцию принудительного движения свободной части конечности

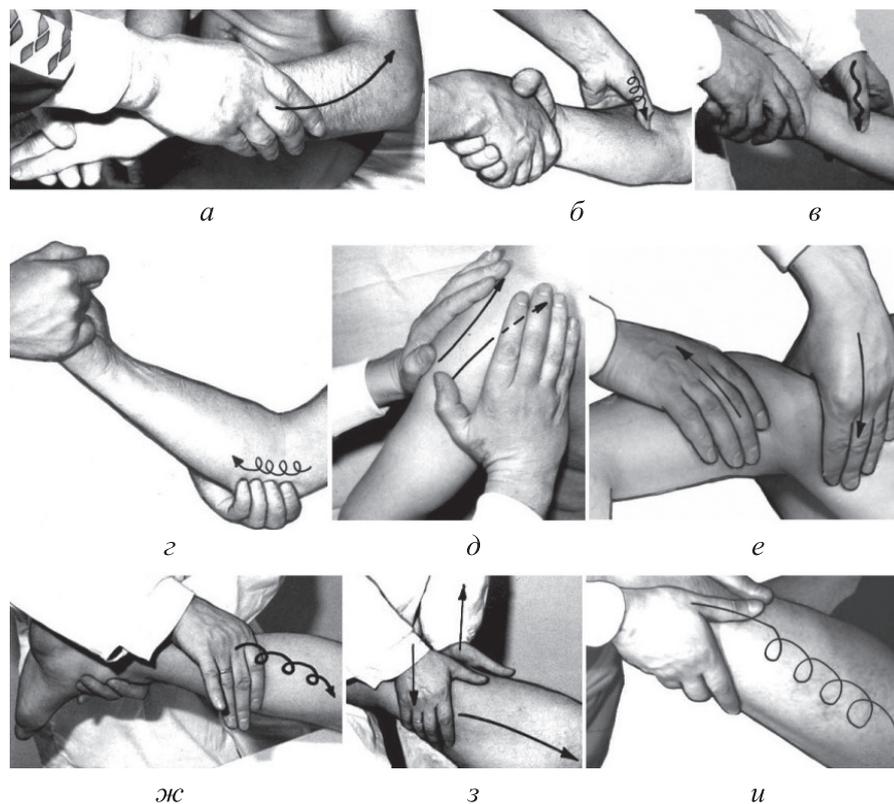


Рис. 3. Основные приемы, используемые массажистом при проведении МВНК: *a* — обхватывающее поглаживание и растирание верхней конечности; *б* — ее растирание и разминание в месте прохождения лучевого нерва; *в* и *г* — растирание и вибрация в месте прохождения срединного нерва и локтевого нерва соответственно; *д* — поглаживание и растирание мышц плеча двумя руками; *е* — разминание (двойное кольцевое) мышц плеча; *ж* — ординарное разминание; *з* — разминание (валяние) мышц бедра; *и* — продольное разминание мышц бедра двумя руками

сти относительно смежной и др. [1]. Как видно из рис. 3, самостоятельное выполнение МВНК является очень затруднительным, а отдельных приемов — невозможным.

Существует большое количество роботов, в том числе для реабилитации верхних и нижних конечностей [13]. Известны также современные РМК, предназначенные для проведения массажа различных участков тела пациента [2, 3, 13], включая МВНК с помощью программируемых массажных роботов-манипуляторов (см. рис. 1) [2, 3]. Траектории манипуляционных движений может задавать управляющая программа, не требующая непосредственного участия массажиста.

Однако, в отличие от адаптивных движений массажиста, при проведении МВНК массируемые конечности пациента должны быть зафиксированы относительно базовой системы координат РМК. Кроме того, как уже отмечалось, подобные РМК представляют собой крупногабаритные устройства с большими массой и потребляемой мощностью, что делает

их малоприспособными для эксплуатации в условиях ограниченного пространства и энергопитания. Для решения указанной проблемы в ИМАШ РАН предложен новый симбиотический подход к созданию РМК, способного обеспечить роботизацию процесса МВНК в указанных условиях.

МР «Октаэдральный додекапод» (рис. 4, *a* и *б*) [10, 11], созданный на основе нового симбиотического подхода, представляет собой самопереключающийся пространственный механизм параллельной структуры [12], который обладает отмеченными ранее преимуществами перед манипулятором последовательной структуры (см. рис. 1). Предлагаемый симбиоз заключается в объединении МР «Октаэдральный додекапод» (носимого симбионта) и верхней или нижней конечностей (несущего симбионта) в единую систему с общей системой координат и в обеспечении независимого функционирования МР «Октаэдральный додекапод» и пациента в процессе проведения МВНК.

При этом, что особенно важно, не требуется присутствие массажиста, управление МР «Октаэдральный додекапод» может быть программным или через Интернет, а проведение МВНК возможно при движениях пациента и не зависит от его пространственного положения.

МР «Октаэдральный додекапод» (см. рис. 4, *a* и *б*) [10, 11] построен на основе активного октаэдрального модуля (АОМ) $1 ABCDF$ в виде додекапода (от греческих слов «δώδεκα» — двенадцать и «πόδι» — нога) с двенадцатью степенями свободы, разработанного в ИМАШ РАН [14, 15].

Ребра АОМ выполнены в виде двенадцати стержней, концы которых шарнирно соединены в его вершинах 2 по четыре в каждой (см. рис. 4, *a*, *в*). При этом тыльная грань ABC расположена с противоположной стороны от направления движения АОМ, а параллельная ей фронтальная грань DEF — со стороны направления движения.

Каждый из стержней снабжен ЛП 3 с ДОП 4 и выполнен с возможностью изменения длины по управляющим командам от СУ 5. Вдоль внутренней поверхности каждого стержня с ЛП тыльной и фронтальной граней установлены

упругие радиальные упоры (УРУ) 6 (см. рис. 4, *a*, *б* и *г*) с возможностью образования адаптивных схватов соответствующих граней АОМ.

В исходном положении каждый УРУ установлен на ЛП в положении его максимальной длины (см. рис. 4, *a* и *б*). При необходимости контроля температуры в соответствующих точках поверхности кожи, а также измерения электрического сопротивления и разности потенциалов между точками контакта на контактных поверхностях УРУ могут быть установлены датчики температуры и изолированные друг от друга электрические контакты (на рис. 4 условно не показаны).

ЛП всех стержней снабжены ДС 7 и ДОС 8, а вершины — совмещенными датчиками пространственного положения (ДПП) 9 и ускорений (ДУ) 10. ДПП и ДУ выполнены в виде миниатюрных трехосных блоков гироскопов-акселерометров, которые служат для оперативного контроля пространственного положения каждой из вершин и виброускорений вдоль каждой из осей стержней с ЛП.

Каждую из вершин можно выполнить с возможностью установки массажных приспособлений.

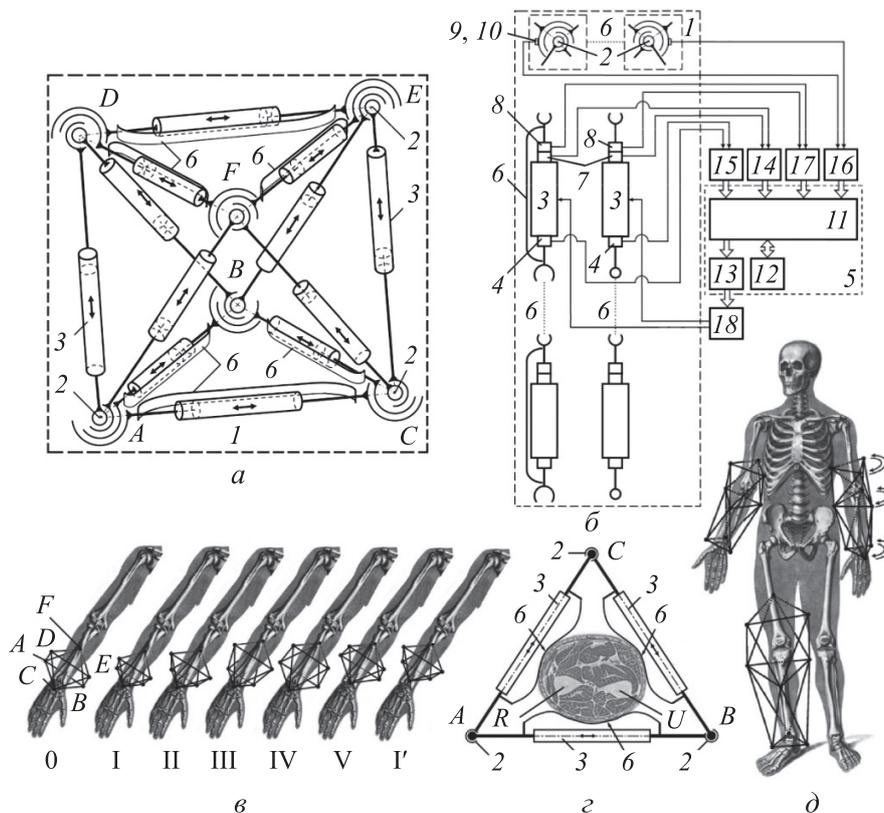


Рис. 4. МР «Октаэдральный додекапод»:

a и *б* — кинематическая и структурная схемы МР; *в* — циклограмма перемещения МР вдоль предплечья; *г* — его радиальный обхват тыльной гранью ABC ; *д* — спаренный МР

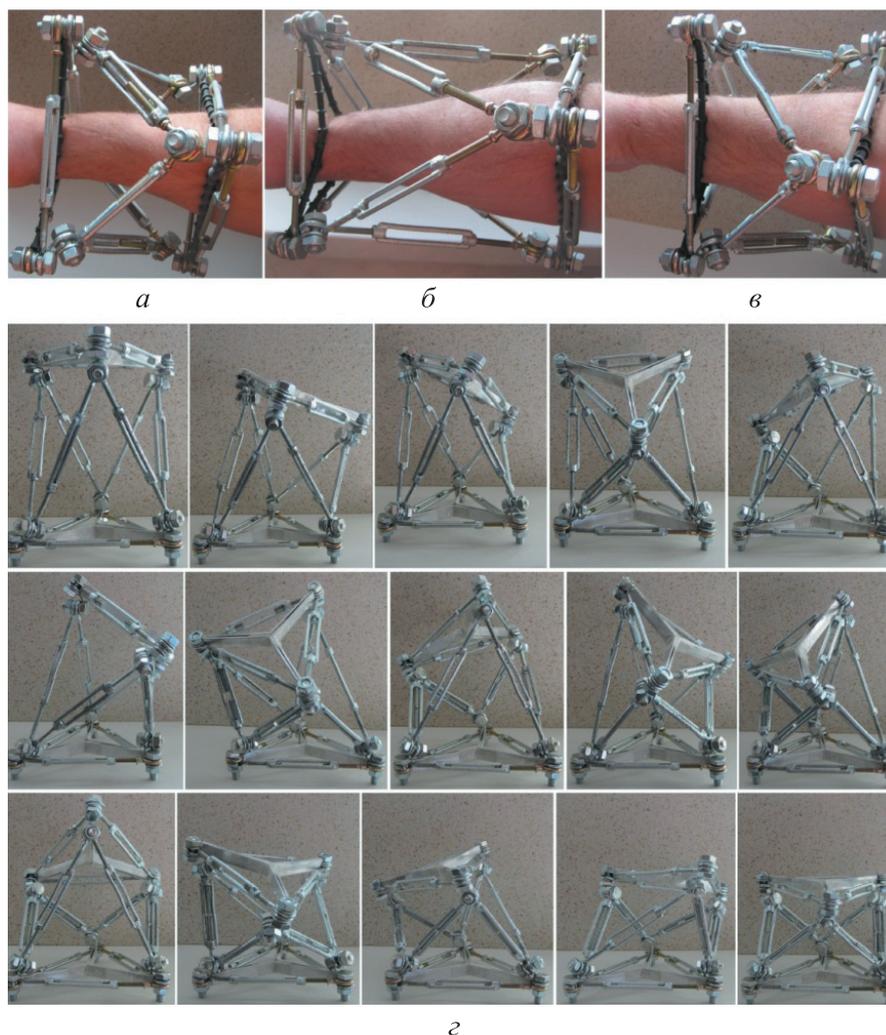


Рис. 5. Полномасштабная кинематическая модель АОМ прототипа МР «Октаэдральный додекапод»: а — фиксация фронтальной и тыльной граней на предплечье в начальном положении; б и в — перемещение и фиксация на конечности фронтальной и тыльной граней; г — манипуляционные возможности АОМ с жесткими адаптивными схватами в виде шарнирных двухзвенников

соблений и ультразвуковых датчиков (на рис. 4 условно не показаны), направленных к центру тыльной и фронтальной граней. СУ включает в себя нейрокompьютер 11, программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО) 12 и ЦАП 13.

Входы СУ связаны соответственно с выходами АЦП 14, ДС 7, АЦП 15 ДОП 4, АЦП 16, совмещенными ДПП и ДУ, АЦП 17, ДОС 8. Выходы СУ через шины выходных данных подключены к соответствующим входам ПАО 12 и последовательно соединенных ЦАП 13, УМ 18 и ЛП 3. При необходимости можно объединить два АОМ (рис. 4, д).

МР «Октаэдральный додекапод» работает следующим образом. При уменьшении длин ЛП фронтальной (DEF) и тыльной (ABC) граней

УРУ обеспечивают обхват и обжатие наружной поверхности конечности с требуемым усилием, контролируемым по показаниям ДС (см. рис. 4, а, б и г).

Благодаря конструкции УРУ радиальное перемещение его контактного участка кратно превосходит величину изменения длины соответствующего ЛП (рис. 5, а-в и рис. 4, г). Это позволяет фронтальной и тыльной граням АОМ адаптироваться к различным участкам верхней или нижней конечности, независимо от их поперечных размеров. В результате удалось достичь надежного контакта УРУ фронтальной и тыльной граней АОМ с поверхностью конечности и передачи на нее требуемых радиальных усилий, используя один типоразмер АОМ (см. рис. 4, а, г и рис. 5, а-в).

Адаптивные схваты фронтальной и тыльной граней АОМ могут состоять из трех УРУ в форме упругих пластин (см. рис. 4, а, б и г) или круглого стержня с массажными элементами (см. рис. 5, а–в), концы которых жестко соединены с соответствующими концами ЛП [9].

При необходимости организации точечного воздействия УРУ можно заменить жесткими радиальными упорами в виде шарнирных двухзвенников, свободные концы которых шарнирно соединены с концами соответствующих ЛП (рис. 5, г).

При проведении массажа АОМ устанавливаются на верхней или нижней конечности, например на предплечье пациента в области запястья, и выполняют необходимые перемещения и массажные манипуляции (см. рис. 4, в). С помощью ЛП и СУ осуществляют согласованные изменения длин ребер АОМ. В результате происходят заданные пространственные перемещения вершин относительно базовой системы координат.

Оперативный контроль передаваемых усилий в местах контакта УРУ с наружной поверхностью кожи выполняют с помощью ДС. Управляющие команды от СУ формируются по показаниям ДС, ДОП, ДОС, совмещенных ДПП и ДУ. При этом сигналы от датчиков поступают соответственно через АЦП 14, 15, 17 и 16 в нейроконтроллер СУ.

После обработки в реальном масштабе времени данных с использованием ПАО формируют управляющие команды, которые через ЦАП и УМ поступают на исполнительные органы (ЛП), и АОМ изменяет геометрическую форму (трансформируется). Контроль длин всех стержней АОМ осуществляют по показаниям ДОП.

Геометрическая неизменяемость АОМ позволяет определять пространственные координаты вершин по измеренным длинам всех стержней и управлять их перемещениями подобно организации пространственных перемещений l -координатного манипулятора [16]. При этом показания ДПП позволяют повысить точность данных измерений.

После введения координат вершин в СУ (см. рис. 4, б) выполняют их необходимые перемещения и массажные манипуляции относительно базовой системы координат путем согласованных изменений длин стержней с ЛП по командам от СУ.

АОМ позволяет реализовать автономный МВНК по одному из пяти режимов (см. рис. 3),

обеспечивающих выполнение следующих процедур:

- 1) манипуляций поглаживания и растирания верхних или нижних конечностей;
- 2) манипуляций продольного и поперечного разминаний верхних или нижних конечностей;
- 3) мобилизацию и манипуляции на локтевом или коленном суставе конечностей;
- 4) манипуляций вибрационного воздействия;
- 5) манипуляций принудительного движения свободной части конечности относительно смежной.

Во всех режимах пациент имеет возможность отключить устройство.

Первый режим реализует манипуляции поглаживания путем скольжения упругих радиальных упоров по коже конечности, например предплечья (см. рис. 4, в), не сдвигая ее в складки с различной степенью надавливания, а манипуляции растирания — посредством смещения, передвижения, растяжения тканей в различных направлениях [1, 10, 11].

Циклограмма перемещения АОМ вдоль предплечья и его радиальный обхват гранью ABC с помощью УРУ показаны на рис. 4, в и г. Здесь R (radius) и U (ulna) — локтевая и лучевая кость соответственно. Перед установкой АОМ на предплечье пациента в СУ вводят геометрические параметры массируемых участков и связывают их с базовой системой координат. В СУ задают координаты участков, недопустимых для проведения массажа (родинки, повреждения и т. д.).

На выбранном начальном участке массажа устанавливают АОМ (см. рис. 4, в, цикл 0) и включают на обратный ход ЛП для уменьшения длин стержней AB , BC , CA , DE , EF и FD . При этом УРУ перемещаются к центрам соответствующих граней до момента фиксации на конечности тыльной грани ABC и обжатия предплечья фронтальной гранью DEF с заданными усилиями (цикл 1), которые определяют по показаниям ДС 7.

После остановки ЛП вычисляют координаты вершин граней ABC и DEF относительно базовой системы координат и выполняют манипуляции поглаживания и растирания путем согласованного изменения длин стержней боковых граней АОМ.

По окончании массажа начального участка длины стержней фронтальной грани DEF уве-

личивают до момента расфиксации с конечностью и согласованным изменением длин ЛП стержней боковых граней, проводят поворот фронтальной грани DEF относительно тыльной грани ABC на заданный угол (на рис. 4, $в$ не показан).

Осуществляют обжатие фронтальной гранью DEF нового участка конечности и манипуляции поглаживания или растирания, повторяют аналогично предыдущим. По командам от СУ на соответствующие ЛП происходит самоперемещение АОМ вдоль конечности на новый участок. Для этого после расфиксации фронтальной грани (см. рис. 4, $в$, цикл II) путем увеличения длин стержней боковых граней ее перемещают вдоль конечности (цикл III) и с помощью УРУ проводят обжатие конечности фронтальной гранью DEF и расфиксацию тыльной грани ABC (цикл IV).

Уменьшая длины стержней боковых граней, тыльную грань ABC перемещают вдоль конечности, подтягивая к фронтальной грани DEF (цикл V) и фиксируют на ней с заданным усилием на новом участке конечности (цикл I'). При этом манипуляционной может быть как фронтальная грань, так и тыльная. Далее алгоритм манипуляций поглаживания и растирания конечности и перемещения АОМ на новый участок повторяют.

Второй режим заключается в непрерывном или прерывистом захватывании, сдавливании, отжимании, сдвигании и «перетирании» тканей (мышц). Различают продольное и поперечное разминания [1]. Требуемые манипуляции организуют подобно предыдущему режиму (путем согласованного изменения длин стержней АОМ).

Третий режим представляет собой пассивные ритмично повторяемые движения в суставах в пределах их физиологического объема [1]. При организации процедур мобилизации и манипуляции на локтевом или коленном суставе с помощью ЛП фронтальную грань АОМ фиксируют на заданном расстоянии друг от друга на плече или бедре, а тыльную — на предплечье или голени.

По показаниям ДОП и ДПП вычисляют координаты вершин относительно базовой системы координат. Путем согласованного изменения длин стержней боковых граней АОМ выполняют осевые мобилизационные продольные и поворотные знакопеременные воздействия.

Рабочий ход ЛП контролируют по показаниям ДС и совмещенных ДПП и ДУ, а длины стержней AD, AF, BD, BE, CE, CF — по показаниям ДОП. Контроль положения конечности выполняют по ДПП, а скорости перемещения граней — по показаниям ДОС и ДУ.

Четвертый режим заключается в организации приведенных выше алгоритмов знакопеременных движений при поглаживании, растирании и разминании конечностей с заданными вибрационными значениями частот, амплитуд и усилий, которые определяют по показаниям ДПП и ДУ, ДС и ДОП. После окончания манипуляций АОМ самоперемещается на новый заданный участок, и алгоритм манипуляций вибрационного воздействия повторяется.

Пятый режим реализуют путем объединения двух АОМ в спаренный модуль с образованием общей грани, которую размещают в зоне соединительного сустава конечности. По установленной в СУ программе организуют заданные принудительные (пассивные) пространственные движения свободной части конечности относительно смежной.

Все проведенные массажные действия регистрирует СУ. При этом в третьем и пятом режимах по показаниям ДС можно судить о силах сопротивления сустава при организации его пассивных движений и диагностировать степень его подвижности (разработанности).

Для определения кинематических и силовых параметров МР «Октаэдральный додекапод» в ИМАШ РАН изготовлена и испытана полномасштабная кинематическая модель прототипа АОМ (см. рис. 5). Модель позволила симитировать АОМ, выбрать длину стержней и отработать кинематику, а также продемонстрировать возможность фиксации фронтальной и тыльной граней на конечности с помощью УРУ в виде упругих стержней с массажными элементами.

Также на модели была установлена зависимость перемещений ЛП граней с радиальными перемещениями УРУ и двухзвенных жестких упоров. Показана циклограмма перемещения модели АОМ вдоль предплечья: циклу I (см. рис. 4, $в$) соответствует рис. 5, $а$, циклу III — рис. 5, $б$, циклу I' — рис. 5, $в$.

На рис. 5, $г$ приведены все возможные крайние манипуляционные положения фронтальной грани относительно тыльной, каждая из которых снабжена жесткими адаптивными схватами в виде трех шарнирных двухзвенников. Жесткие

адаптивные схваты позволяют организовать манипуляции точечного массажа подобно приемам, показанным на рис. 3, б–г, ж, и.

Проверка подтвердила правильность выбранной концепции АОМ МР «Октаэдральный додекапод» в виде пространственного механизма параллельной структуры с двенадцатью степенями свободы. Показаны возможность адаптивной фиксации фронтальной и тыльной граней на конечности, создание управляемого усилия обжатия конечности и перемещение фронтальной и тыльной граней вдоль конечности и относительно друг друга, а также знакопеременные повороты одной грани относительно другой и другие манипуляционные возможности. Управление талрепами, имитирующими ЛП, осуществлялось вручну.

Выводы

1. Рассмотрены симбиотический подход к созданию РМК и на его основе концепции построения МР «Триангель» для автономного проведения СБМ и МР «Октаэдральный додекапод» для автономного выполнения МВНК.

2. Показано, что такой подход позволит создать автономные портативные носимые МР и, как следствие, уменьшить их массогабаритные параметры и потребляемую мощность по сравнению с таковыми современных РМК. Это даст возможность организовать их эффективную эксплуатацию в условиях ограниченного пространства и энергопитания (таких как орбитальная и полярная станции, судовые помещения, полевые условия труда и др.)

Литература

- [1] Дубровский В.И., Дубровская А.В. *Лечебный массаж*. Москва, ИД Геотар-Мед, 2004. 501 с.
- [2] Спрос на услуги массажа на дому в РФ вырос в 2 раза. *news.rambler.ru: веб-сайт*. <https://news.rambler.ru/sociology/47395080-spros-na-uslugi-massazha-na-domu-v-rf-vyros-v-2-raza/?ysclid=lqjf142k5o239184518> (дата обращения: 22.12.2023).
- [3] Colgate J.E., Wannasuphprasit W., Peshkin M.A. Cobots: robots for collaboration with human operators. *Proc. Int. Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, 1996, DSC-Vol. 58, pp. 433–439.
- [4] Sherwani F., Asad M.M., Ibrahim B.S.K.K. Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0). *ICETST*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ICETST49965.2020.9080724>
- [5] De Simone V., Di Pasquale V., Giubileo V. et al. Human-robot collaboration: an analysis of worker's performance. *Procedia Comput. Sci.*, 2022, vol. 200, pp. 1540–1549, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.355>
- [6] Соболев М. На выставке CES-2022 показали автономного робота-массажиста. *edurobots.org: веб-сайт*. <https://edurobots.org/2022/01/massage-robotics/> (дата обращения: 22.12.2023).
- [7] Robot-assisted rehabilitation — ROBERT® and KUKA facilitate mobilization. *kuka.com: веб-сайт*. <https://www.kuka.com/Robot-assisted-therapy> (дата обращения: 22.12.2023).
- [8] Саяпин С.Н., Саяпина М.С. *Перемещающийся массажер и способ осуществления массажа с его помощью*. Патент РФ 2551939. Заявл. 03.10.2013, опубл. 10.06.2015.
- [9] Саяпин С.Н. Анализ и перспективы применения автономного симбиозного самоперемещающегося массажного робота «Триангель» на борту пилотируемой космической станции. *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2020, т. 54, № 1, с. 75–78, doi: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2020-54-1-75-78>
- [10] Саяпин С.Н. *Адаптивный мобильный пространственный реабилитационный робот-манипулятор и способ организации движений и диагностики пациента с его помощью*. Патент РФ 2564754. Заявл. 27.03.2014, опубл. 10.10.2015.
- [11] Саяпин С.Н. Симбиотический самоперемещающийся робот «Октаэдральный додекапод»: концепция и перспективы использования на борту пилотируемой космической станции. *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2023, т. 57, № 3, с. 89–97, doi: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2023-57-3-89-97>
- [12] Glazunov V.A., Chulichin A.Y. Development of mechanisms of parallel structure. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>
- [13] Kommu S.S. et al. *Rehabilitation robotics*. Vienna, Austria, I-Tech Education and Publishing, 2007. 638 p.

- [14] Саяпин С.Н., Синева А.В. *Адаптивный мобильный пространственный робот-манипулятор и способ организации движений и контроля физико-механических свойств и геометрической формы контактируемой поверхности и траектории перемещения с его помощью*. Патент РФ 2424893. Заявл. 11.01.2009, опубл. 27.07.2011.
- [15] Саяпин С.Н. Додекапод как современный этап развития пространственных параллельных роботов. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2012, № 6, с. 31–45.
- [16] Колископ А.Ш. Разработка и исследование промышленных роботов на основе l-координат. *Станки и инструмент*, 1982, № 12, с. 21–24.

References

- [1] Dubrovskiy V.I., Dubrovskaya A.V. *Lechebnyy massazh* [Therapeutic Massage]. Moscow, ID Geotar-Med Publ., 2004. 501 p. (In Russ.).
- [2] Spros na uslugi massazha na domu v RU vyros v 2 raza [Demand for home massage services in the Russian Federation has grown 2-fold]. *news.rambler.ru: website*. <https://news.rambler.ru/sociology/47395080-spros-na-uslugi-massazha-na-domu-v-rf-vyros-v-2-raza/?ysclid=lqjf142k5o239184518> (accessed: 22.12.2023). (In Russ.).
- [3] Colgate J.E., Wannasuphprasit W., Peshkin M.A. Cobots: robots for collaboration with human operators. *Proc. Int. Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, 1996, DSC-Vol. 58, pp. 433–439.
- [4] Sherwani F., Asad M.M., Ibrahim B.S.K.K. Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0). *ICETST*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ICETST49965.2020.9080724>
- [5] De Simone V., Di Pasquale V., Giubileo V. et al. Human-robot collaboration: an analysis of worker's performance. *Procedia Comput. Sci.*, 2022, vol. 200, pp. 1540–1549, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.355>
- [6] Sobolev M. Na vystavke CES-2022 pokazali avtonomnogo robota-massazhista [Autonomous robot masseur shown at CES-2022 exhibition]. *edurobots.org: website*. <https://edurobots.org/2022/01/massage-robotics/> (accessed: 22.12.2023). (In Russ.).
- [7] Robot-assisted rehabilitation — ROBERT® and KUKA facilitate mobilization. *kuka.com: website*. <https://www.kuka.com/Robot-assisted-therapy> (accessed: 22.12.2023).
- [8] Sayapin S.N., Sayapina M.S. *Peremeshchayushchiysya massazher i sposob osushchestvleniya massazha s ego pomoshchyu* [Movable massaging apparatus and method for giving massage with use thereof]. Patent RU 2551939. Appl. 03.10.2013, publ. 10.06.2015. (In Russ.).
- [9] Sayapin S.N. Analysis and prospective use of autonomous symbiotic self-relocating body massage robot "Triangel" onboard piloted space stations. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine], 2020, vol. 54, no. 1, pp. 75–78, doi: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2020-54-1-75-78> (in Russ.).
- [10] Sayapin S.N. Adaptivnyy mobilnyy prostranstvennyy reabilitatsionnyy robot-manipulyator i sposob organizatsii dvizheniy i diagnostiki patsienta s ego pomoshchyu [Adaptive mobile spatial rehabilitation robotic arm and method of facilitating movements and diagnosis of patient using same]. Patent RU 2564754. Appl. 27.03.2014, publ. 10.10.2015. (In Russ.).
- [11] Sayapin S.N. Symbiotic self-relocating massage robot "Octahedral dodecapod": concept and likelihood of use on a piloted space station. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine], 2023, vol.57, no. 3, pp. 89–97, doi: <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2023-57-3-89-97> (in Russ.).
- [12] Glazunov V.A., Chunichin A.Y. Development of mechanisms of parallel structure. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 211–216, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030030>
- [13] Kommu S.S. et al. *Rehabilitation robotics*. Vienna, Austria, I-Tech Education and Publishing, 2007. 638 p.
- [14] Sayapin S.N., Sineva A.V. *Adaptivnyy mobilnyy prostranstvennyy robot-manipulyator i sposob organizatsii dvizheniy i kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoystv i geometricheskoy formy kontaktiruemoy poverkhnosti i traektorii peremeshcheniya s ego pomoshchyu* [Adaptive mobile 3d manipulator robot and method of organising displacements and control over physical-mechanical properties, geometrical shape of contact surface and displacement trajectory hereby]. Patent RU 2424893. Appl. 11.01.2009, publ. 27.07.2011. (In Russ.).

- [15] Sayapin S.N. Parallel spatial robots of dodecapod type. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2012, no. 6, pp. 31–45. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2012, vol. 41, no. 6, pp. 457–466, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618812060143>)
- [16] Koliskor A.Sh. Design and research of industrial robots based on l-coordinates. *Stanki i instrument*, 1982, no. 12, pp. 21–24. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 30.12.2023

Информация об авторе

САЯПИН Сергей Николаевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Information about the author

SAYAPIN Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Chief Research Worker. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Саяпин С.Н. Симбиотический подход к массажной робототехнике: концепция и перспективы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 2, с. 22–34.

Please cite this article in English as:

Sayapin S.N. Symbiotic approach to massage robotics: concept and prospects. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 2, pp. 22–34.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям материалы I Всероссийской конференции «Практико-ориентированное научно-техническое творчество молодежи и его роль в подготовке инженеров мирового уровня»

Конференция «Практико-ориентированное научно-техническое творчество молодежи и его роль в подготовке инженеров мирового уровня» проводится для обеспечения взаимодействия и обмена опытом между организаторами и энтузиастами сообществ научно-технического творчества из числа ученых, инженеров и студентов технических специальностей, занимающихся проектной деятельностью. В сборнике представлены и проанализированы материалы конференции. Описаны основные подходы к организации и ведению деятельности в области научно-технического творчества. Выявлены основные проблемы и перспективы развития молодежного инженерного творчества, в том числе и на базе технических университетов.

Для специалистов и руководителей научно-исследовательских учреждений, конструкторских, технологических, проектных и изыскательских организаций.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>