

УДК 621.647.23

Лопота А.В. к.э.н., Кондратьев А.С.к.т.н., Тимофеев А.Н.д.т.н., проф., Шардыко И.В.
ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург, Россия

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ В КОСМОСЕ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОВ

Lopota A., Kondratiev A., Timofeev A., Shardyko I.
Department of robotic system design Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,
Saint-Petersburg, Russia (a.gradovtsev@rtc.ru, ddeer@bk.ru)

SPACE ANTHROPOMORPHOUS ROBOTS APPLICATION PROBLEMS

***Аннотация.** Космическая робототехника является важной отраслью техники, развитие которой необходимо для освоения космического пространства. При выполнении каких-либо действий, представляющих опасность для жизни или здоровья человека робот может оказать помощь или полностью заменить человека. В данной статье рассмотрены тенденции развития космической робототехники, особое внимание уделено выявлению положительных и отрицательных эффектов антропоморфных роботов различной степени подобия человеку. Проведён анализ принципов передвижения роботов. За основной критерий при сравнении принято обеспечение безопасности деятельности робота по отношению к конструкциям станций и научному оборудованию.*

Ключевые слова: антропоморфные роботы; космическая робототехника

Введение

В мире создано достаточно большое число робототехнических систем, различающихся по многим критериям, в том числе – по степени подобия тому или иному биологическому объекту. С момента рождения робототехники инженеры стремятся создать антропоморфного (гуманоидного) робота – робота, максимально схожего с человеком, способного решать недетерминированные задачи в широком наборе возможных ситуаций. В настоящее время становится всё более актуальной задача применения робототехнических средств в условиях космоса. В данной статье будет рассмотрено, с какими проблемами связано создание антропоморфного робота в настоящий момент, насколько это реально и какие ограничения будет иметь робот данного типа, соответствующий текущему уровню развития науки и техники.

Классификация роботов по типу подобия живым организмам

Технические устройства, имеющие вид, сходный с биологическими объектами, принято называть биоморфными (от греч. *morphe* — вид). Возможны следующие разновидности подобия живых существ и робототехнических объектов:

- структурное подобие — сходность состава и взаимосвязей основных функциональных подсистем: двигательной, сенсорной, управления, энергообеспечения, терморегулирования;
- геометрическое подобие — сходность внешнего вида и размеров или пропорций между основными компоновочными элементами;
- кинематическое подобие — сходность состава основных звеньев, их возможных траекторий и, в некоторых случаях, скоростей;
- статическое и динамическое подобие — сходность развиваемых сил и моментов.

Структурное подобие носит концептуальный характер. Большинство РТС по своей структуре сходно с живыми организмами, т.к., функционируя примерно в тех же внешних условиях, они сталкиваются с теми же внешними ограничениями (или частью их), что и живые организмы.

Робототехнические системы бывают сходными с различными видами живых существ. Практический интерес представляет подобие роботов:

- человеку — антропоморфность;
- приматам — приматоморфность;
- насекомым — инсектоморфность;
- змеям — серпентоморфность.

“Приматоморфные” роботы, пример которого приведён на рисунке 1, содержат четыре многоцелевых манипулятора — аналога передних и задних лап приматов, телевизионную систему, и корпус с устройством крепления на космическом аппарате, максимально схожего с человеком, способного решать

недетерминированные задачи в широком наборе возможных ситуаций. В настоящее время становится всё более актуальной задача применения робототехнических средств в условиях космоса. В данной статье будет рассмотрено, с какими проблемами связано.

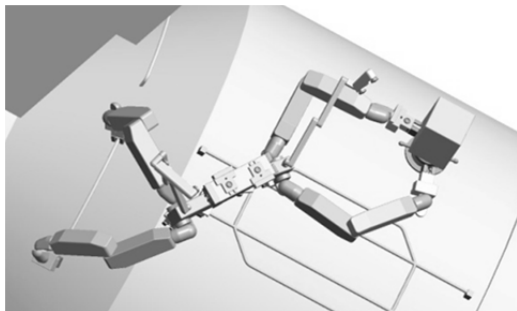


Рис. 1. Агрегат из двух базовых транспортно-манипуляционных систем

например, имеющих вид сетки из композиционных материалов.

“Сerpентоморфные” роботы образуются последовательной, относительно длинной цепью звеньев (числом от 15 до 30), связанных шарнирами. Такие роботы могут оказаться востребованными для обследования тесных извилистых полостей в конструкциях КА.

Наиболее распространено подобие роботов человеку – антропоморфность. Степень антропоморфности определяется полнотой перечня видов подобия (из числа перечисленных выше) и шириной охвата – частью системы, выполняемой аналогичной человеку, в том числе: пальцы, кисть, манипулятор (локтевые и плечевые части, плечевой пояс), “ноги” (средства передвижения), “голова” (система зрения и слуха), “мозг” (управляющая система).

Максимальное геометрическое подобие робота человеку получило широкое распространение в сферах, где необходимо заменить человека в среде, опасной для жизни и здоровья. В фантастических произведениях, кино и рекламе такие роботы нередко называются андроидами. Они имеют “руки”, “ноги”, “туловище” и “голову”, по внешнему виду напоминающие человеческие.

Анализ эффектов применения антропоморфных роботов на космических аппаратах

Использование принципа антропоморфности придает характеристикам роботов ряд положительных эффектов. Наиболее важный среди них – способность антропоморфных роботов успешно функционировать в среде, максимально приспособленной для пребывания и работы человека. Эта способность актуальна в тех случаях, когда роботы действуют одновременно с человеком, выполняя функции ассистента, или в период временного отсутствия человека, например, для обслуживания космического аппарата (КА), посещаемого космонавтами эпизодически. При этом требуемая адаптация КА к использованию робототехники минимальна, то есть не требуется существенная переработка конструкции КА и не появляются дополнительные помехи для перемещения космонавта.

Антропоморфные роботы максимально универсальны и способны выполнять заранее непредвиденные функции, например, при аварийных или иных нештатных ситуациях. Кроме того, антропоморфный облик роботов может содействовать созданию благоприятного психологического климата для космонавтов.

Данные преимущества достижимы при полномасштабной реализации принципов антропоморфности роботов. Создание таких устройств является одним из перспективных направлений развития робототехники, однако, существующие роботы подобны человеку только частично, в большей или меньшей степени. Большинство роботов (особенно мобильных) для экстремальных условий работы имеют подобную человеку общую структуру: состав и назначение основных функциональных подсистем: двигательных, управления, сенсорных, энергообеспечения.

Ведущие научные центры интенсивно развивают автоматические информационно-управляющие системы роботов. Автоматические, относительно простые манипуляторы входят в состав аппаратов для исследования планет. Но на орбитальных станциях и пилотируемых кораблях опасаются применять полностью автоматические робототехнические средства, так как последствия их неправильного функционирования могут оказаться неприемлемыми.

Для обеспечения необходимой безопасности в обозримом будущем предполагается, по меньшей мере, обязательный постоянный контроль человека за роботом. На сегодняшний день оператор, как правило, непосредственно управляет космическими манипуляционными системами в командном или полуавтоматическом режиме. Для заранее запланированных действий применимы системы управления в супервизорном режиме с регулярным контролем хода процесса оператором в наиболее ответственные моменты [1].

Технологические операции, например, сборочные, выполняются одной парой манипуляторов. Вторая пара манипуляторов (совместно с устройством крепления на корпусе) используется для удержания робота на конструктивных элементах космического аппарата (КА). “Приматоморфные” роботы востребованы при перемещении по конструкциям, произвольно расположенным и плохо приспособленным для захвата, где малая надежность крепления компенсируется количеством одновременно закрепленных устройств.

Более сложными являются “инсектоморфные” роботы, содержащие шесть или более манипуляторов – аналогов лапок насекомых. Они могут оказаться полезными для передвижения по особо слабым конструкциям,

При устранении последствий непредвиденных нештатных ситуаций не всегда оказывается возможным заранее подготовить программу управления роботом. Управлять приходится вручную, дистанционно, в командном или копирующем режиме. Оператор при этом находится внутри орбитальной станции или на Земле. В работе-манипуляторе BarrettHand[2] (США), показанном на рисунке 2а, оператор перемещает рукоятку с элементами управления пальцами, установленную на специальном задающем манипуляторе. Далее движения рукоятки пересчитываются в управляющие воздействия исполнительного манипулятора.



Рис. 2. Задающие манипуляторы: BarrettHand и EUROBOT

В разрабатываемых для космоса робототехнических системах в качестве задающего органа может применяться экзоскелет, навешиваемый на корпус и руки оператора. Примером является проект EUROBOT[3] (ESA, Евросоюз), представленный на рисунке 2б. Кинематика и габариты задающего и исполнительного манипулятора максимально приближены к руке человека. Это подобие упрощает решение задачи дистанционного копирующего управления. Обобщенные координаты исполнительного манипулятора без дополнительного пересчета синхронизируются с идентичными координатами задающего манипулятора. Однако, встречаются ситуации, когда работы необходимо выполнять при конфигурациях исполнительного манипулятора, неприемлемых для руки человека. Таким образом, применение в качестве задающего манипулятора экзоскелета упрощает систему управления антропоморфного робота, при этом ограничивая в некоторой степени его возможности.

Для стационарного антропоморфного робота в виде плечевого пояса (два манипулятора на общем корпусе) с системой технического зрения трудно найти практически полезные задачи, оправдывающие затраты на его создание. Он должен быть дополнен средствами перемещения. Шагающие устройства могут использоваться в роботах для освоения Луны, Марса и других планет, но такие задачи проще решать колесными транспортными средствами высокой проходимости, наподобие робота ROBONAUT[4] (NASA, США) на колёсной тележке, представленного на рисунке 3а. В условиях космоса данный робот может перемещаться транспортным манипулятором, что показано на рисунке 3б. Транспортными (грузовыми) манипуляторами целесообразно переносить антропоморфные роботы между модулями орбитальной станции, однако значительная часть наружной поверхности станции остается недоступной. Другим вариантом является применение тележек на направляющих, однако, их рабочая зона также охватывает только незначительную часть станции, к тому же из-за своей громоздкости они создают помехи работе космонавтов.

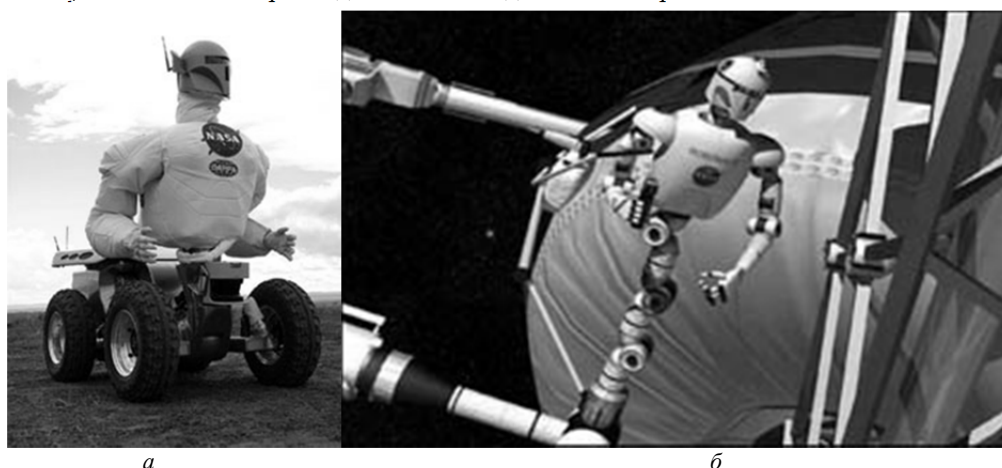


Рис. 3. Антропоморфный робот ROBONAUT

Теоретически антропоморфные роботы могут летать на платформах с вентиляторами (внутри герметичных отсеков) или ракетными двигателями (в открытом космосе). Практическая же реализация таких платформ сталкивается с рядом существенных препятствий.

Главной проблемой является безопасность. Необходимы средства, надежно предотвращающие соударения робота с конструкциями станции или ее оборудованием. Вариативность и непредсказуемость трасс и зон, в которые потребуется перемещаться роботу, затрудняет или даже не допускает программирование автоматического управления движением. Также сложно применять ручное дистанционное управление в условиях относительно быстро меняющегося и только частично контролируемого положения робота в стесненной окружающей обстановке с многочисленными препятствиями, повреждение которых недопустимо. При интенсивных маневрах реактивные двигатели требуют дополнительного расхода рабочего тела. Их выхлопы могут отрицательно сказываться на работоспособности некоторых видов научного оборудования на поверхности станции. Поэтому часть зон окажется запретной для маневров ракетной транспортной платформы робота.

Космонавты значительную часть своих действий совершают в свободном полете, задаваемым кратковременным отталкиванием или подтягиванием к перилам. Реакции от силовых воздействий на внешние конструкции или оборудование блокируются инерционными силами и моментами от движений ног или рук. При особо сложных и тяжелых операциях ноги или корпус космонавта фиксируются специальными средствами. Для управления свободным полетом космонавт использует вестибулярный аппарат и другие органы чувств, в том числе зрительные и тактильные. Создание способных свободно летать робототехнических средств, является интересной перспективной задачей. Но сроки ее решения пока трудно прогнозировать. Причем методы дистанционного копирующего управления оператором здесь также неприменимы, поскольку неясно, каким образом передать оператору все ощущения, в том числе вестибулярные, необходимые для эффективного выполнения этих функций.

Таким образом, в отличие от человека, незакрепленный робот не может выполнять операции с силовым воздействием на внешнюю среду. Обязательно требуется его фиксация на такелажных элементах. В качестве таких элементов естественно использовать имеющиеся на орбитальной станции поручни, приспособленные для космонавтов. Эти поручни имеют небольшие поперечные размеры (25...30 мм). Рабочий орган робота может быть удален от них на расстояние, почти в 100 раз большее (1,5...2 м), поэтому одним захватным устройством, зажавшим поручень, невозможно обеспечить стабильное положение рабочего органа робота, как свободного, так и при его силовом взаимодействии с оборудованием станции. Для качественной фиксации требуются два захватных устройства, держащиеся за разные поручни. Причем, по меньшей мере, одно из них должно иметь базирующие элементы, разнесенные на расстояние 100 мм или более. Для адаптации к вариативности взаимного расположения поручней эти захватные устройства должны быть связаны кинематической цепью (манипулятором) с количеством степеней подвижности не менее шести.

Минимальный состав антропоморфного робота, способного качественно закрепляться на поручнях, включает корпус, на котором установлены три манипулятора, из которых два рабочих (точных, технологических) и один дополнительный, несущий фиксирующее захватное устройство. Только одним фиксирующим захватным устройством можно обойтись, если ввести в конструкцию станции множество специальных такелажных элементов – базовых точек, у которых опорные (базирующие) элементы разнесены в плоскости на расстояние 100 мм или более. Базовые точки усложняют и утяжеляют конструкцию станции и могут являться помехами для космонавтов. Необходима серьезная мотивация для такой адаптации станции под робототехнические средства.

Перемещение антропоморфного робота перехватыванием (перешагиванием) по поручням выглядит наиболее естественным. Оно реализуемо роботом с двумя многоцелевыми (транспортно-технологическими) манипуляторами и дополнительными фиксирующими захватными устройствами на корпусе. Модель такого робота представлена на рисунке 4.

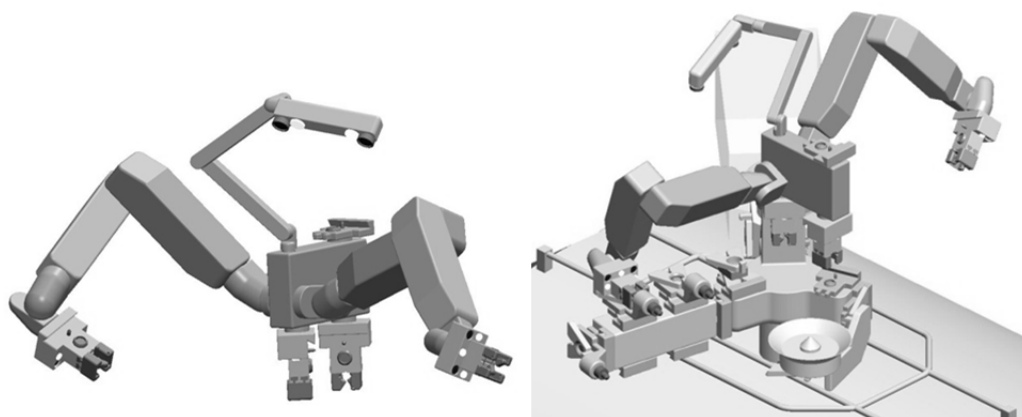


Рис. 4. Космическая транспортно-манипуляционная система (КТМС, ЦНИИ РТК, Россия)

Для обеспечения необходимой безопасности движения в каждый момент времени робот должен удерживаться на станции двумя захватными устройствами. Это минимальный вариант структуры робототехнической системы, достаточный для того чтобы перемещаться по станции, фиксироваться и выполнять целевые манипуляционные операции. Дополнительную вариативность положения корпуса при работе предоставляют более сложные системы с тремя или четырьмя манипуляторами. Они оказываются подобными не человеку, а приматам. Для обоснования оптимального соотношения степени усложнения робота и расширения его функциональных возможностей необходим детальный анализ требуемых целевых операций и условий их проведения[5].

Предстоит решить ряд проблем управления движением робота перехватыванием по поручням или базовым точкам. Режим непосредственного копирования движений человека тем или иным задающим устройством опасен из-за неполного контроля оператором фактического положения робота, а также его контактов с оборудованием станции. Практически невозможно передать человеку весь комплекс обратных связей, необходимых для такого контроля. Скорее всего, задача будет решаться сочетанием методов супервизорного управления на регулярных трассах с копирующим управлением одним оператором и контролем безопасности движений со стороны второго оператора.

Манипуляторы промышленных и сервисных роботов по общей компоновке и функциям подобны руке человека. Обычно манипулятор заканчивается устройством смены рабочих органов, установленным на трех взаимно перпендикулярных механизмах переориентации. В соответствии со спецификой решаемых задач в переносной магазин-накопитель устанавливается необходимый комплект сменных инструментов (рисунок 4б). На основании конкретных задач по обслуживанию роботом МКС и межпланетных транспортных кораблей выявлены следующие виды сменных инструментов – рабочих органов: захватные устройства для работы с крупными объектами; захватные устройства, аналогичные пинцетам, для работ в стесненных зонах; разнообразные адаптеры для установки оборудования на базовые точки и рабочие места; головки для очистки оптических элементов и прочих конструкций; головки для завинчивания; устройства для принудительного привода механизмов корабля в нештатных ситуациях; обрабатывающие головки режущие, пилящие, перекусывающие; осветительные приборы; разнообразные измерительные головки, в том числе оптические, радиационные, термические, головки для контроля герметичности.

Поручни, рукоятки инструментов, сменных блоков или переносимых контейнеров выполняются удобными для человека. Имеются определенные рекомендации (регламентирующие нормы) по их конструированию, и они являются некоторым образом унифицированными элементами с небольшим количеством альтернативных вариантов. Возможно создание единого захватно-стыковочного устройства, способного зажимать поручни, инструмент и другие сменные рабочие органы. В него могут быть введены приводы сменных рабочих органов робота, что значительно упрощает систему в целом.

В комплект сменных инструментов может входить антропоморфное захватное устройство. Антропоморфные захватные устройства отличаются, прежде всего, способностью удерживать объекты, размеры и форма которых варьируема в некотором диапазоне и заранее непредсказуема. В том числе, они могут удерживать поручни и инструмент. Однако из-за сложности, множества длинных кинематических цепей многосуставных пальцев, приводимых в движение через тросики, такими устройствами трудно обеспечить однозначную фиксацию захватываемых объектов. Средствам управления приходится адаптироваться к непредсказуемым существенным деформациям и зазорам. При сопоставимых массах и габаритах универсальная антропоморфная кисть способна создавать существенно меньшие (на порядки) зажимающие усилия, чем специализированное захватно-стыковочное устройство. Поэтому использование антропоморфной кисти для удержания поручней, базовых точек, инструмента и других специализированных рабочих органов оправдано только в том случае, если достаточно часто оказывается востребованной ее способность захватывания объектов с заранее неопределенной формой и размерами. В противном случае более простой и надежной оказывается система, базирующаяся на захватно-стыковочном устройстве, взаимодействующем как с поручнями, так и с инструментом. Редко используемая антропоморфная кисть устанавливается в это устройство только по мере необходимости.

Заключение

Антропоморфные роботы, совместно с другими видами РТС, перспективны для применения на космических станциях, напланетных базах и межпланетных комплексах.

На сегодня наиболее ожидаемо использование антропоморфных роботов на наружной поверхности орбитальных станций околоземных, лунных и марсианских. Предполагается, что такие роботы будут переноситься транспортными (грузовыми) манипуляторами, за пределами зон досягаемости которых роботы перемещаются самостоятельно перехватыванием (перешагиванием) многоцелевыми манипуляторами по поручням и специализированным такелажным элементам. Первоочередными задачами являются инспекция различных объектов на поверхности станции, установка и обслуживание оборудования, помощь космонавтам при внекорабельной деятельности.

Внутри орбитальных станций применение антропоморфных роботов в помощь космонавтам пока неактуально. Роботы потребуются при переходе на обслуживание орбитальных станций вахтенным методом, что может быть актуально для лунных или марсианских станций.

В более далекой перспективе на постоянно действующих лунных или марсианских базах антропоморфные роботы применимы наряду с другими видами робототехнических устройств. Их назначение сходно с задачами, решаемыми на орбитальных станциях. Для дальних межпланетных перелетов прорабатываются космические аппараты и комплексы на базе электроракетных двигателей. В них высокая эффективность использования энергии и рабочего тела сочетается с относительно малой тягой и, следовательно, большой длительностью перелетов. Антропоморфные роботы могут быть востребованы для контроля и обслуживания таких аппаратов в фазе автономного полета без экипажа. Значительная задержка сигналов на дальних расстояниях препятствует копирующим методам управления роботами в реальном времени. Здесь возрастает роль автоматизированного управления роботами.

В случае необходимости, пилотируемые корабли и автоматические космические аппараты будут оснащаться специальными манипуляционными средствами, существенно отличающимися от человека по структуре, габаритам, усилиям[6]. Из-за жестких массо-габаритных ограничений и специфических проблем баллистики и динамики взаимодействия космических аппаратов применение здесь антропоморфных роботов нецелесообразно.

Научно-исследовательская работа по изучению возможности применения антропоморфных роботов в космическом пространстве проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Abstract. *The Space Robotics has two main areas of interest: Orbital Robotics and Planetary Rovers. Orbital Robotics includes manipulation and mobility for scenarios such as International Space Station operations and satellite servicing. Planetary Rovers address scenarios such as Mars and lunar exploration from mobile robot on the surface. Humanoid robots could be useful for future dangerous missions. In this paper reviews tendencies of the development of space robotics, special attention is given to the identification of positive and negative effects of anthropomorphic robots of varying degrees similarity to man. View analysis of robot movement principles. For the main criterion of comparing accepted safety of structure, plants and scientific equipment. The effectiveness of the use of anthropomorphic robots in space is still open. Before making a decision to initiate expensive design space robot is necessary to decide on the establishment of an anthropomorphic or non-anthropomorphic robot by examining all possible factors, because the cost of failure is very high in space.*

Keywords: *anthropomorphous robots, space robotics*

Бібліографічний список використаної літератури

1. Лопота В.А., Космонавтика в XXI веке — Вестник Российской академии наук, 2011, том 81, №9, с. 771-793
2. Barrett-Hand, <http://www.barrett.com/robot/products-hand.htm>
3. P.H.M. Schoonejans, "Eurobot System Requirements Document", Issue 1 Revision 1, 6 April 2004
4. Robonaut, <http://robonaut.jsc.nasa.gov/default.asp>
5. Градовцев А.А., Кондратьев А.С., Тимофеев А.Н., Робототехническое обеспечение для объектов перспективной космической инфраструктуры, Экстремальная робототехника. Труды международной научно-технической конференции, – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2011, с. 23-29
6. Градовцев А.А., Кондратьев А.С., Лопота А.В., Средства робототехнического обеспечения перспективной космической инфраструктуры — Научно-технические ведомости СПбГПУ, №1, 2013, с.111-118

REFERENCES

1. Lopota V.A., Kosmonavtika v XXI veke — Vestnik Rossiyskoy akademii nauk, 2011, tom 81, no 9, p. 771-793
2. Barrett-Hand, <http://www.barrett.com/robot/products-hand.htm>
3. P.H.M. Schoonejans, "Eurobot System Requirements Document", Issue 1 Revision 1, 6 April 2004
4. Robonaut, <http://robonaut.jsc.nasa.gov/default.asp>
5. Gradovcev A.A., Kondrat'ev A.S., Timofeev A.N., Robototekhnicheskoe obespechenie dlya ob"ektov perspektivnoy kosmicheskoy infrastruktury, Ekstremal'naya robototekhnika. Trudy mejdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii, Sankt-Peterburg: Izd-vo «Politehnika-servis», 2011, p. 23-29
6. Gradovcev A.A., Kondrat'ev A.S., Lopota A.V., Sredstva robototekhnicheskogo obespecheniya perspektivnoy kosmicheskoy infrastruktury. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU, no 1, 2013, p.111-118