

А. С. Кодяков, магистр, kodyakovandrey@gmail.com,

Н. А. Павлюк, мл. науч. сотр., antei.hasgard@gmail.com,

В. Ю. Будков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., budkov@iiias.spb.su,

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Исследование устойчивости конструкции антропоморфного робота Антарес при воздействии внешней нагрузки¹

Рассматривается поведение основных конструктивных элементов нижних конечностей антропоморфного робота Антарес под воздействием на них различных видов нагрузок (скручивание, излом). В процессе проведения исследования определены требуемые значения моментов вращения для сервоприводов, необходимые для перемещения робота в пространстве. Определены максимальные значения моментов вращения, которые способны выдержать конструкции голени и бедра, равные $5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $5,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ соответственно.

Ключевые слова: антропоморфные роботы, конструкции деталей, анализ прочности, сервоприводы, моделирование нагрузки, нижние конечности, голень, бедро, кинематика

Введение

Современные разработки в области антропоморфной робототехники направлены на приближение характеристик движения робота к кинематике человеческого тела [1–3]. Проблема повышенного энергопотребления при реализации кинематики антропоморфного робота частично решается за счет снижения массы конструкции. В связи с этим особый интерес представляют разработки, связанные с исследованием устойчивости конструкций и способности материалов выдерживать заданные нагрузки [4–7].

Одна из простейших конструкций двуногого робота описана в работе [8]. Он собран из двухмиллиметрового листового алюминия, включает шесть сервоприводов, управляется контроллером EyeBot и имеет массу 1,11 кг. При ходьбе робот достигает скорости 120 м/ч при максимальном угле между бедрами 60° . Подобная конструкция робота с шестью сервоприводами применена в работе [9] для исследования рабочих углов соединений колена, лодыжки, бедра.

Антропоморфный робот серии HanSaRam, регулярно участвующий в футбольной лиге роботов FIRA с 2000 г., обсуждается в работе [10]. Робот HanSaRam версии HSR-VIII имеет 28 приводов, имеет массу 5,5 кг и развивает скорость до 12 см/с.

В работе [11] рассматривается антропоморфный робот Lola, имеющий конструкцию ног с 7 степенями свободы, массу 55 кг при росте 180 см. Обсуждается проблема устойчивости робота после остановки, а также поэтапное соприкосновение частей ступни с поверхностью во время ходьбы.

Домашний ассистивный робот с 14 приводами и 16 степенями свободы, представленный в работе [12], имеет антропоморфную конструкцию только верх-

ней части тела и колесную базу. Основное внимание в работе уделено манипуляции предметом двумя руками роботов при перемещении домашних объектов.

Антропоморфный робот SWUMANOID ростом 92 см, использующий в конструкции 24 сервопривода серии Dynamixel, рассмотренный в исследовании [13], разработан для моделирования движений и плавания в воде. Нестабильное качение тела робота в воде осложняет расчет кинематики движений плывущего робота, состоящего из 21 составного конструктивного элемента.

В работе [14] предложена оригинальная программная платформа для моделирования кинематической схемы движения ног антропоморфных роботов, где элементы ног рассматриваются как последовательно соединенные детали, а для решения прямой и обратной задач движения ног применяются рекурсивные алгоритмы с пониженной вычислительной сложностью.

Для движения по сложным неровным поверхностям, не проходимым для гусеничных или колесных роботов, также ведутся разработки более сложных не антропоморфных конструкций с одной [15], четырьмя [16], шестью [17, 18] и большим числом нижних конечностей [19].

1. Обобщенная структурная модель антропоморфного робота Антарес

В данной работе проведено исследование основных конструктивных элементов нижних конечностей антропоморфного робота Антарес (рис. 1) на предмет устойчивости при воздействии внешних сил, таких как прямолинейная сила и скручивание. В ходе работы решались следующие задачи:

- 1) анализ движения нижних конечностей;
- 2) моделирование воздействия внешней нагрузки к составным элементам конструкции робота.

Вследствие использования легковесных материалов двигатели потребляют меньше энергии. В конст-

¹ Исследование выполнено при частичной поддержке бюджетной темы № 0073-2015-0005 и РНФ (грант № 16-19-00044).

рукции робота Антарес используются сервоприводы MX-64T и MX-28 фирмы Dynamixel, шестерни выполнены из металла, что позволяет реализовать движения с заданной точностью и запасом по прочности.

Модульная конструкция робота позволяет управлять движением любой конечности независимо от остальной части тела, практически не влияя на производительность [20, 21]. Конструкция специально рассчитана на установку дополнительных датчиков и прокладку соединительных проводов. Также подобный дизайн облегчает периодическое техническое обслуживание робота. Расчетная высота робота составляет 100 см, а масса равна 6 кг.

В ходе моделирования сборки нижних конечностей подвергались двум видам нагрузок — были приложены момент вращения и "прямая сила" в трех направлениях: вертикальном (перпендикулярном поперечной плоскости), боковом по нормали к фронтальной плоскости и боковом перпендикулярно сагиттальной плоскости. (Под термином "сборка" подразумевается набор деталей, которые собраны в конструкцию, в сборку входят пластины, стяжки (алюминиевые стойки диаметром 6 мм и длиной 47 мм, с отверстиями на торцах для вкручивания в нее винтов M2,5) и поперечные пластины (ребра жесткости).) Для проверки ноги на скручивание (рис. 2, см. вторую сторону обложки) была смоделирована ситуация, когда робот находится в положении лежа и стопы упираются в поверхность пола внутренней частью стопы.

В процессе исследования определены требуемые значения моментов вращения для сервоприводов, необходимые для перемещения робота в пространстве. Направление прикладываемой силы выбрано исходя из того, что данная сила будет иметь свое максимальное значение, когда нога будет находиться в положении "сидя", следовательно, направление будет направлено по нормали к сагиттальной плоскости ноги. В результате в ходе моделирования были определены моменты вращения выходного вала двигателя в узлах ноги робота: в голеностопном, коленном и тазобедренном суставах.

Проведение исследования на прочность прошло следующим образом:

1. Способом крепления сборки был выбран способ крепления только на одной пластине, в месте крепления пластины к двигателю посредством подшипника. Так как вал двигателя находится с одной стороны, следовательно, момент вращения вала сервопривода будет приходиться на одну пластину.

2. В качестве внешней нагрузки выступает вес конструкции робота, который составляет 20 Н на одну ногу целиком и направлен перпендикулярно фронтальной плоскости голени (бедре).

В процессе опыта было выяснено, что конструкция голени способна выдержать $5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ момента вращения вала двигателя при нагрузке 20 Н, когда робот выполняет подъем из положения "сидя". Для бедра ситуация аналогична, за исключением того, что конструкция бедра выдерживает $5,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

В ходе моделирования было определено, что для перевода робота из положения "сидя" в положение "стоя" требуется момент вращения, в 2,4 раза меньший максимально развиваемого сервоприводом в штатном режиме работы. Также моделирование показало, что конструкция ноги способна выдержать максимальный момент вращения двигателя. На основании этих данных был сделан вывод, что робот способен без повреждений и деформаций выполнить прыжок в вертикальной плоскости, что позднее успешно подтвердилось в ходе испытаний на стенде.

2. Анализ движения нижних конечностей

При анализе движения выполняется пространственное моделирование в условиях, приближенных к реальным, и считывание показаний с датчиков, на основании которых делаются соответствующие выводы. Модель робота, представленная на рис. 1, имеет нумерацию сервоприводов, для которых будет проводиться анализ движения по ме-

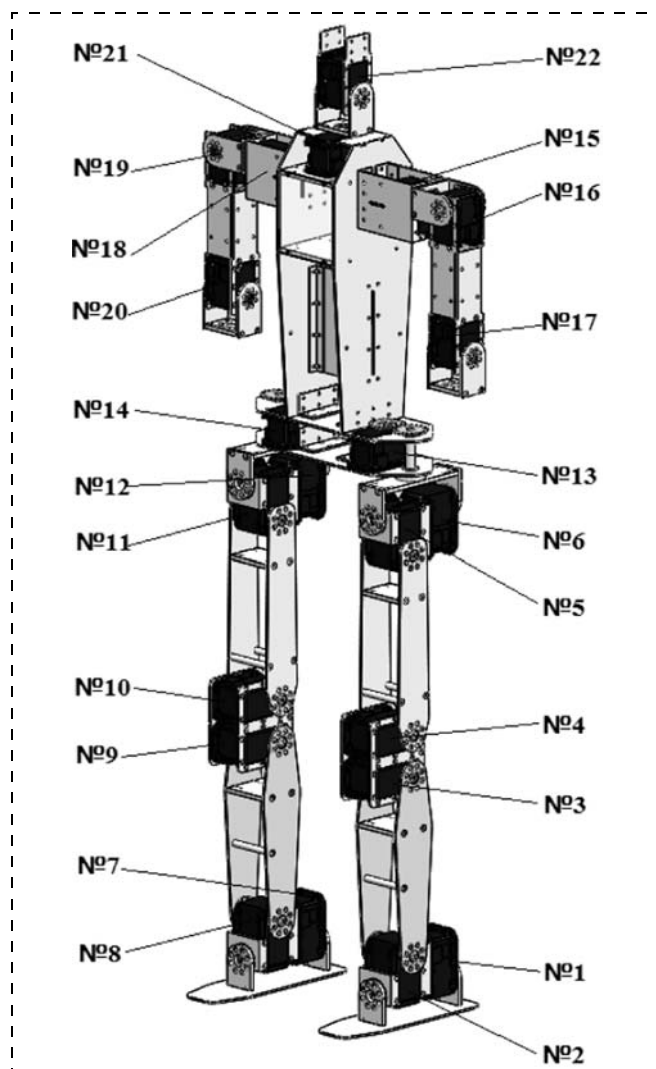


Рис. 1. Нумерация двигателей обобщенной модели антропоморфного робота Антарес

тодике, предложенной в работе [22]. Целью моделирования является определение значений момента вращения и линейной силы, действующих на конструкцию робота. Полученные результаты позволят провести моделирование весовых нагрузок для различных положений робота в пространстве. В результате в ходе моделирования были определены моменты вращения выходного вала двигателя в узлах ноги робота: в голеностопном, коленном и тазобедренном суставах.

Для проведения анализа движения была заблокирована стопа для того, чтобы движение ноги осуществлялось относительно стопы. Сила тяжести принималась равной $G = 9,81 \text{ м/с}^2$. Был установлен "контакт поверхностей" на фланцы двигателей, пластины голени и бедра. Были исследованы вращающие моменты двигателей № 2–5 (см. рис. 1) при следующих одинаковых параметрах: время работы двигателя — 3 с, перемещение вала двигателя осуществляется на 85° и тип сегмента — кубический. В качестве внешней нагрузки применялась сила, заменяющая вес торса, равный 20 Н. Для определения момента вращения на валах двигателей № 2–5 установлены датчики, двигатели осуществляют свою работу синхронно.

Из графиков, приведенных на рис. 3, видно, что для поднятия тела двигателям требуется разный момент вращения. Двигатель № 2 осуществляет свою работу только на удерживание равновесия, поэтому у него маленький момент вращения по сравнению с двигателем № 3. Двигатель № 3, вращаясь в коленном суставе, упирается голенью в стопу, таким образом поднимая ногу. Для двигателей № 4 и № 5 ситуация аналогична. Двигатель № 4 осуществляет поднятие ноги, упираясь в двигатель № 3, в то время как двигатель № 5 поддерживает равновесие.

Для двигателя № 2 (рис. 3, а) момент вращения равен $M = 0,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а для двигателя № 3 (рис. 3, б)

$M = 4,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, следовательно, суммарный момент вращения в начальный период времени (начиная с нулевой по третью секунду) приблизительно равен: $0,3 + 4,5 = 4,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Момент вращения, приходящийся на один двигатель, равен $2,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Момент силы, прикладываемый к сборке голени, когда нога находится в положении сидя:

$$F = \frac{M}{l} = \frac{2,4}{0,17} = 14,11 \approx 15 \text{ Н},$$

где l — длина плеча, на которое действует сила.

Для двигателя № 4 (рис. 3, в) $M = 4,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а для двигателя № 5 (рис. 3, г) $M = 0,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, следовательно, суммарный момент вращения в начальный момент времени равен: $4,5 + 0,5 = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Момент вращения, приходящийся на один двигатель, равен $2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Момент силы, прикладываемый к бедру, когда нога находится в положении сидя, равен

$$F = \frac{M}{l} = \frac{2,5}{0,17} = 14,7 \approx 15 \text{ Н}.$$

Таким образом, на основании проведенного анализа движения для двух сборок ноги были определены моменты сил, которые действуют на составные части ноги во время поднятия ее из положения "сидя". Найденные значения момента силы позволили провести симуляцию приложения внешних нагрузок на сборки голени и бедра.

3. Моделирование весовых нагрузок основных конструктивных элементов нижних конечностей робота Антарес

Моделирование нагрузки — это проверка деталей и узлов с точки зрения выдерживания различных нагрузок и выявление "слабых" мест в конструкции. Суть анализа сборок конструкций заключается в том, чтобы определить, какие напряжения возникают в деталях. На основании данного анализа делается вывод о пригодности разработанной модели робота для выполнения поставленных задач.

Для исследования была взята сборка бедра и голени. В качестве материала выбран сплав дюралюминия Д16Т и латунь. Из дюралюминия были выполнены пластины голени (бедра) и поперечная стойка. Из латуни выполнена только стяжка пластин голени (бедра). Дюралюминий разрушается при меньшей нагрузке, чем латунь [23], поэтому процесс симуляции прекращается после достижения порога разрушения дюралюминия. В качестве типа крепления был выбран параметр "глобальный контакт (нет перемещений)", означающий, что

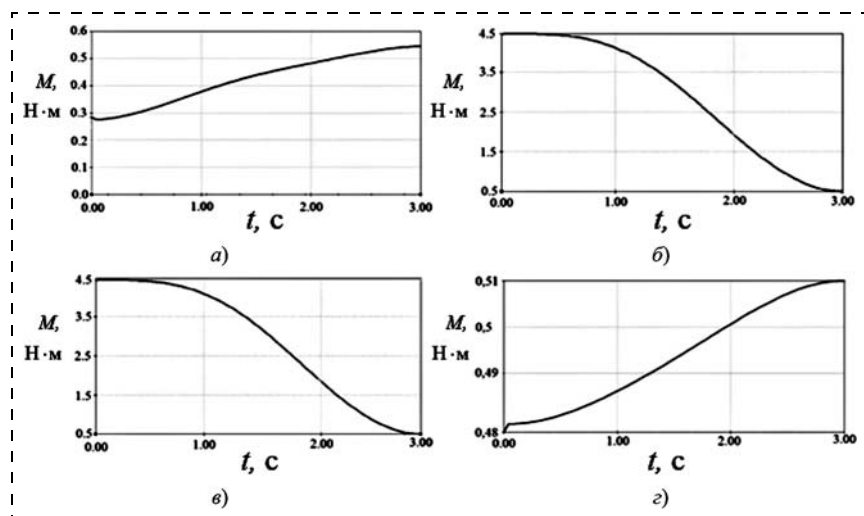


Рис. 3. Зависимость вращающего момента двигателей и времени их работы для конструкции ноги:

а — двигатель № 2; б — двигатель № 3; в — двигатель № 4; г — двигатель № 5

в процессе моделирования принимается, что объект моделирования зафиксирован в пространстве и не перемещается. Местом крепления послужили поверхности технологических отверстий. Также совместно с глобальным контактом использовался такой тип соединения, как "болт-соединитель" для равномерного распределения нагрузки. Фиксация сборок осуществлена с помощью "зафиксированной геометрии", которая не дает перемещаться сборкам ноги в месте крепления фланцев сервоприводов. В качестве внешней нагрузки были выбраны "линейная сила" и момент вращения в местах крепления фланцев сервоприводов. Расчетная масса сборки робота составляет 6 кг, масса каждой ноги примерно 1 кг. В процессе исследования на сборку одной ноги приходится вес половины тела (за вычетом ног), следовательно, на сборку одной ноги приходится приблизительно 20 Н. Данное значение было рассчитано для вертикальной и боковой (по нормали к фронтальной плоскости) нагрузки по формуле

$$F = P/2 = 40/2 = 20 \text{ Н},$$

где F — сила, прикладываемая к сборке голени; P — вес, который держат ноги, который делится на 2, так как весь вес распределяется на две ноги.

В ходе проведения симуляции сборки подвергались двум видам нагрузок — были приложены момент вращения и "прямая сила" в трех направлениях: вертикальном (перпендикулярном поперечной плоскости), боковом (по нормали к фронтальной плоскости) и боковом (перпендикулярно сагиттальной плоскости).

Вертикальная нагрузка (положение сидя) на сборку голени (бедро) составляет 25 Н, так как 20 Н — это вес тела, и 5 Н — это вес бедра; для бедра вертикальная нагрузка 20 Н, так как на него приходится только вес тела.

Боковая нагрузка (положение ног в поперечном шпагате) была рассчитана на основе "анализа движения" ноги и составила для голени 20 Н, так как 15 Н — это вес тела, и 5 Н — это вес бедра. Для бедра боковая нагрузка 15 Н, так как на него приходится только вес тела.

Так как момент двигателя меняется от 0 до 6 Н·м, то моделирование проводили для максимального значения момента вращения с приложением внешней вертикальной и боковой нагрузки. Направление прикладываемой силы выбрано исходя из того, что данная сила будет иметь свое максимальное значение, когда нога будет находиться в положении "сидя", следовательно, направление будет направлено по нормали к сагиттальной плоскости ноги.

Для проверки сборки ноги на скручивание была смоделирована ситуация, когда робот находится в положении лежа, и стопы упираются в поверхность пола внутренней частью стопы. Скручивание происходит по всей длине ноги, равной 0,5 м, следовательно, момент кручения одинаков как для сборки голени, так и для сборки бедра. Для сборки

ноги при длине стопы 0,0825 м и массе ноги 1 кг момент кручения имеет значение

$$M = Fl = 10 \cdot 0,0825 = 0,825 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлены результаты моделирования нагрузок в виде эпюр напряжений, на основании которых можно сделать выводы о поведении сборки голени и бедра под разными видами прикладываемой нагрузки. По эпюре внутренних напряжений можно судить о способности детали или сборки противостоять приложенным нагрузкам.

Эпюры максимальных внутренних напряжений построены и оценены по эквивалентным внутренним напряжениям в сравнении с пределом текучести для использованного материала. Материал, из которого сделано изделие, начинает разрушаться, когда напряжение становится равным предельному значению напряжения. В большинстве случаев предельному значению напряжения соответствует предел текучести. Пределом напряжения называется такое напряжение, при котором деформация продолжает увеличиваться без увеличения напряжения внутри изделия. Таким образом, результаты представлены в виде эпюры эквивалентных напряжений и графического представления цветовой палитры непосредственно на самой сборке. Местоположение максимального внутреннего напряжения окрашено красным цветом и указано сноской с текущим значением напряжения.

3.1. Пространственная модель голени робота

В ходе проведения симуляции модели составных компонентов ноги подвергались двум видам нагрузок — были приложены момент вращения и "прямая сила" в трех направлениях: вертикальном (перпендикулярном поперечной плоскости), боковом по нормали к фронтальной плоскости и боковом перпендикулярно сагиттальной плоскости. Для исследования модели голени проведено четыре опыта, описанные ниже:

1) на сборку голени прикладывается вертикальная нагрузка 25 Н, которая распределяется на всем объеме пластин голени равномерно. Максимальное внутреннее напряжение сборки приходится на пластины голени (рис. 4, а, см. третью сторону обложки), значение напряжения составляет $4,53 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$;

2) на сборку голени прикладывается момент вращения фланца двигателя, равный 6 Н·м, и боковая нагрузка 25 Н (рис. 4, б, см. третью сторону обложки). Нагрузка распределяется на всей поверхности пластин голени почти равномерно. Максимальное внутреннее напряжение сборки приходится на место крепления "стяжки" (алюминиевой стойки диаметром 6 мм и длиной 47 мм, с отверстиями на торцах для вкручивания в нее винтов М2,5) и пластины голени, значение напряжения составляет $3,79 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. У пластины голени максимальное внутреннее напряжение приходится на технологи-

ческое отверстие стяжки, и значение напряжения составляет $2,29 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$;

3) на сборку голени прикладывается нагрузка 20 Н (перпендикулярно сагиттальной плоскости). Максимальное внутреннее напряжение сборки приходится на "стяжку" (рис. 4, в, см. третью сторону обложки), значение напряжения составляет $6,72 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. У пластины голени максимальное внутреннее напряжение приходится на технологическое отверстие крепления "стяжки" и составляет $2,45 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$;

4) на сборку голени прикладывается момент вращения вокруг оси, проходящей через центр поперечной пластины, равный $0,825 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Максимальное внутреннее напряжение сборки приходится на пластину, соединяющую пластины голени (рис. 4, г, см. третью сторону обложки), значение напряжения составляет $6,13 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

3.2. Пространственная модель бедра робота

Для исследования модели бедра также было проведено четыре опыта, описанные ниже:

1) на сборку бедра прикладывается вертикальная нагрузка 20 Н, которая распределяется на всем объеме пластин бедра равномерно. Максимальное внутреннее напряжение сборки приходится на пластины бедра (рис. 5, а, см. третью сторону обложки), значение напряжения составляет $2,78 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$;

2) на сборку бедра прикладывается момент вращения фланца двигателя, равный $6 \text{ Н} \cdot \text{м}$, и боковая нагрузка 20 Н (перпендикулярно поперечной плоскости). Нагрузка распределяется на всей поверхности пластин бедра равномерно. Максимальное внутреннее напряжение сборки приходится на пластины бедра (рис. 5, б, см. третью сторону обложки), значение напряжения составляет $1,61 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$;

3) на сборку бедра прикладывается нагрузка 15 Н (перпендикулярно сагиттальной плоскости). Максимальное внутреннее напряжение сборки приходится на пластины бедра (рис. 5, в, см. третью сторону обложки), значение напряжения составляет $2,21 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$;

4) на сборку бедра прикладывается момент вращения вокруг оси, проходящей через центр поперечной пластины, равный $0,825 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Максимальное внутреннее напряжение сборки приходится на пластины бедра (рис. 5, г, см. третью сторону обложки), значение напряжения составляет $1,51 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$.

На основании предела текучести для разработанной модели ноги можно сделать вывод, что данные виды внешних нагрузок сборки голени и бедра выдержит, так как предел текучести для сборки ноги лежит в допустимых пределах [22, 23].

Разрабатываемый робот ориентирован на применение в образовательных целях для участия в соревнованиях роботов-футболистов, а также при разработке ассистивных технологий человеко-машинного взаимодействия на основе многомодальных интерфейсов [24–28].

Заключение

В данной работе был проведен анализ движения нижних конечностей, и на основе полученных результатов проведено моделирование приложения внешней нагрузки на составные части ноги робота Антарес. На основании данных, приведенных на рис. 4 и 5 (см. третью сторону обложки), можно заключить, что при приложении различных внешних сил к ногам внутреннее напряжение будет приближено к точке предела текучести для данного материала. Так как сборки конструкции робота выдерживают рассчитанную ранее нагрузку и не разрушаются, то сохраняется устойчивость конструкции ноги. В ходе моделирования также определены некоторые параметры, которыми будет обладать модель робота. Так как при поднятии робота из положения "сидя" требуется в 2,4 раза меньший момент, чем максимальный развиваемый двигателем момент вращения, а конструкция ноги способна выдержать максимальный момент вращения двигателя, то на основании этих данных был сделан вывод, что робот способен выполнить прыжок в вертикальной плоскости, позже успешно подтвержденный в ходе натурных экспериментов.

Список литературы

1. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Кинематическая модель экзоскелета руки человека и определение ошибки позиционирования // Мехатроника, Автоматизация, управление. 2014. Вып. 5. С. 37–41.
2. Жиденко И. Г., Кутлубаев И. М. Методика определения сигналов управления антропоморфным роботом // Мехатроника, Автоматизация, управление. 2014. Вып. 5. С. 41–46.
3. Лавровский Э. К., Письменная Е. В. Алгоритмы управления экзоскелетом нижних конечностей в режиме одноопорной ходьбы по ровной и ступенчатой поверхностям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 44–51.
4. Яцун С. Ф., Савин С. И., Емельянова О. В., Яцун А. С., Турлапов Р. Н. Анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2015. 179 с.
5. Яцун С. Ф., Савин С. И., Яцун А. С., Климов Г. В. Кинематический анализ экзоскелета в процессе подъема груза // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 3 (16). С. 24–30.
6. Алямовский А. А. Исследование кинематики приспособлений для машиностроения и деревообработки в SolidWorks // Технические науки и технологии, электронный научный журнал. 2015. Вып. 78. С. 85–92.
7. Филатов В. В. Использование САПР SolidWorksMotion для исследования плавности хода транспортного средства // Транспортная техника, электронный научный журнал. 2014. Вып. 1. С. 1–7.
8. Warnakulasooriyaa S., Bagheria A., Sherburn N., Shanmugavel M. Bipedal Walking Robot — A developmental design // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 1016–1021.
9. Lima S. C., Yeapa G. H. The Locomotion of Bipedal Walking Robot with Six Degree of Freedom // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 8–14.
10. Yoo J. K., Lee B. J., Kim. J. H. Recent Progress and Development of the Humanoid Robot Hansaram // Robotics and Autonomous Systems. 2009. Vol. 57. P. 973–981.
11. Buschmann T., Lohmeier S., Ulbrich H. Humanoid Robot Lola: Design and Walking Control // Journal of Physiology. 2009. Vol. 103. P. 141–148.

12. **Mohamed Z., Capi G.** Development of a New Mobile Humanoid Robot for Assisting Elderly People // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 41. P. 345–351.
13. **Nakashima M., Tsunoda Y.** Improvement of Crawl Stroke for the Swimming Humanoid Robot to Establish an Experimental Platform for Swimming Research // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 112. P. 517–521.
14. **Shah S. V., Saha S. K., Dutt J. K.** Modular Framework for Dynamic Modeling and Analyses of Legged Robots // *Mechanism and Machine Theory*. 2012. Vol. 49. P. 234–255.
15. **Yua X., Fub C., Chen K.** Modeling and Control of a Single-legged Robot // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 24. P. 788–792.
16. **Potts A. S., Jaime da Cruz J.** A Comparison Between Free Motion Planning Algorithms Applied to a Quadruped Robot Leg // *IFAC-papers online*. Vol. 48, Iss. 19. P. 019–024.
17. **Rostro-Gonzalez H., Cerna-Garcia P. A., Trejo-Caballero G., Garcia-Capulin C. H., Ibarra-Manzano M. A., Avina-Cervantes J. G., Torres-Huitzil C.** A CPG System Based on Spiking Neurons for Hexapod Robot Locomotion // *Neurocomputing*. 2015. Vol. 170. P. 47–54.
18. **Pan P. S., Wu C. M.** Design of a Hexapod Robot with a Servo Control and a Man-Machine Interface // *Robotics and Computer-Integrated manufacturing*. 2012. Vol. 28. P. 351–358.
19. **Vidoni R., Gasparetto A.** Efficient Force Distribution and Leg Posture for a Bio-Inspired Spider Robot // *Robotics and Autonomous Systems*. 2011. Vol. 59. P. 142–150.
20. **Павлюк Н. А., Будков В. Ю., Бизин М. М., Ронжин А. Л.** Разработка конструкции узла ноги антропоморфного робота Антарес на основе двухмоторного колена // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. № 1 (174). С. 227–239.
21. **Pavluk N., Ivin A., Budkov V., Kodyakov A., Ronzhin A.** Mechanical Leg Design of the Anthropomorphic Robot Antares // *Interactive Collaborative Robotics, First International Conference ICR 2016, Budapest, Hungary, August 24–26, 2016. Springer International Publishing*. 2016. LNAI 9812. P. 113–123.
22. **Сагиров Ю. Г.** Прочностной анализ металлоконструкции грузоподъемных кранов с использованием SolidWorks // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2013. Вып. 26. С. 194–203.
23. **Таблица** характеристик металлов. URL: [http://splav-khar-kov.com/mat_start.php?name_id=1438/\(дата обращения 20.06.16\)](http://splav-khar-kov.com/mat_start.php?name_id=1438/(дата обращения 20.06.16)).
24. **Мотиенко А. И., Тарасов А. Г., Дорожко И. В., Басов О. О.** Проактивное управление робототехническими системами спасения пострадавших // *Труды СПИИРАН*. 2016. Вып. 46. С. 174–195.
25. **Ронжин А. Л., Юсупов Р. М.** Многомодальные интерфейсы автономных мобильных робототехнических комплексов // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2015. № 1 (162). С. 195–206.
26. **Юсупов Р. М., Крючков Б. И., Карпов А. А., Ронжин А. Л., Усов В. М.** Возможности применения многомодальных интерфейсов на пилотируемом космическом комплексе для поддержания коммуникации космонавтов с мобильным роботом — помощником экипажа // *Пилотируемые полеты в космос*. 2013. № 3 (8). С. 23–34.
27. **Мотиенко А. И., Ронжин А. Л., Павлюк Н. А.** Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // *Научный вестник НГТУ*. 2015. № 3 (60). С. 147–165.
28. **Станкевич Л. А., Серебряков С. В.** Когнитивные системы и агенты // *Труды СПИИРАН*. 2006. Вып. 3. Том 1. С. 71–87.

Study of Stability of Antares Anthropomorphic Robot under the Action of an External Load

A. S. Kodyakov, kodyakovandrey@gmail.com, **N. A. Pavliuk**, antei.hasgard@gmail.com✉, **V. Yu. Budkov**, budkov@iias.spb.su,

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Pavliuk Nikita A., Researcher, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Received on October 26, 2016

Accepted on November 11, 2016

Recent trends in the field of anthropomorphic robotics involve approximation to the motion characteristics of the robot kinematics of a human body. The problem of high energy consumption in implementation of the kinematics of an anthropomorphic robot is partially solved by reduction of the weight of a design. In this regard, of special interest are the developments concerning the study of the stability of the structures and materials capable to withstand the set loads. In this paper a research was done of the stability of the basic structural elements of the lower extremities of Antares anthropomorphic robot under the influence of the external forces, such as straight-line power and twisting. The design of Antares robot employs actuators Dynamixel MX-64T and MX-28, the gears are made of a metal, which allows the robot to move with a given accuracy and a margin of safety. During modeling the assembly of the lower extremities were subjected to simulation of 2 types of loads, those were torque and "direct force" orientated in three directions: vertical (perpendicular to the transverse plane), lateral (normal to the front plane) and lateral (perpendicular to the sagittal plane). The direction of the applied force was selected on the basis of the fact that this force would have its maximal value, when the leg will be in a "sitting" position, therefore, the direction would be directed along the normal to the sagittal plane of the leg. In order to test the leg for twisting a situation was modeled, in which the robot was in the lying position with the inner part of its foot resting on the floor surface. During the study the values of the actuators' torques, intended to move the robot in space, were determined. The moments of rotation of the engine output shaft in a robot leg were determined: ankle, knee, hip joint. The maximal values of the rotational moments, able to withstand the construction of the hip and the thigh of 5 Nm and 5.2 Nm, respectively, were determined. During the simulation it was also found out that raising of the robot from "a sitting position" required 2.4 times less effort than the maximal torque developed by the engine, and the design of the leg could withstand the maximal torque of the motor rotation. On the basis of those data a conclusion was made, that the robot was able to jump in the vertical plane, and later this was proved successfully in real experiments.

Keywords: anthropomorphic robots, parts of construction, strength analysis, servomotors, load modeling, lower limbs, shin, hip, kinematics

Acknowledgements: The study was partially supported by the budget threads number 0073-2015-0005 and RNF (grant № 16-19-00044).

For citation:

Kodyakov A. S., Pavliuk N. A., Budkov V. Yu. Study of Stability of Antares Anthropomorphic Robot under the Action of an External Load, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 321–327.

DOI: 10.17587/mau.18.321-327

References

1. **Gradeckij V. G., Ermolov I. L., Knjaz'kov M. M., Seme-nov E. A., Suhanov A. N.** *Kinematicheskaja model' jekzoskeleta ruki cheloveka i opredelenie oshibki pozicionirovanija* (The kinematic model of the exoskeleton of the human hand and the definition of positioning errors), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, vol. 5, pp. 37–41 (in Russian).
2. **Zhidenko I. G., Kutlubayev I. M.** *Metodika opredelenija signalov upravljenija antropomorfnyh robotom* (Method for determining anthropomorphic robot control signals), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, vol. 5, pp. 41–46 (in Russian).
3. **Lavrovskij Je. K., Pis'mennaja E. V.** *Algoritmy upravljenija jek-zoskeletonom nizhnih konechnostej v rezhime odnoopornoj hod'by po ровной i stupenchatoj poverhnostjam* (Control algorithms in lower limb exoskeletons single support foot mode on flat surfaces and step), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, vol. 1, pp. 44–51 (in Russian).
4. **Jacun S. F., Savin S. I., Emel'janova O. V., Jacun A. S., Turlapov R. N.** *Analizkonstrukcij, principysozdanija, osnovymodeliro-vanija* (Analysis of the structures, principles of creation, the basis of the simulation), Kursk, Publishing house of Jugo-Zap. gos. univer-sitet, 2015, 179 p. (in Russian).
5. **Jacun S. F., Savin S. I., Jacun A. S., Klimov G. V.** *Kinemat-icheskoj analiz jekzoskeleta v processe pod'ema gruzu* (Kinematic analysis of the exoskeleton in the process of lifting), *Izvestija Jugo-Za-padnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii*, 2015, vol. 3 (16), pp. 24–30 (in Russian).
6. **Aljamovskij A. A.** *Issledovanie kinematiki prispособlenij dlja mashinostroenija i derevoobrabotki v Solid Works* (Study kinematics devices for machinery and woodworking in Solidworks), *Teh-nicheskienauki i Tehnologii*, 2015, vol. 78, pp. 85–92 (in Russian).
7. **Filatov V. V.** *Ispolzovanie SAPR Solid Works Motion dlja issle-dovanija pлавности hoda transportnogo sredstva* (Using CAD Solid-works Motion for investigation of smoothness of vehicle running), *Transportnaja Tehnika*, 2014, vol. 1, pp. 1–7 (in Russian).
8. **Warnakulasooriyaa S., Bagheria A., Sherburn N., Shan-mugavel M.** Bipedal Walking Robot — A developmental design, *Pro-cedia Engineering*, 41, 2012, pp. 1016–1021.
9. **Lima S. C., Yeapa G. H.** The Locomotion of Bipedal Walking Robot with Six Degree of Freedom, *Procedia Engineering*, 41, 2012, pp. 8–14.
10. **Yoo J. K., Lee B. J., Kim J. H.** Recent Progress and Develop-ment of the Humanoid Robot Hansaram, *Robotics and Autonomous Systems*, 57, 2009, pp. 973–981.
11. **Buschmann T., Lohmeier S., Ulbrich H.** Humanoid Robot Lola: Design and Walking Control, *Journal of Physiology*, 103, 2009, pp. 141–148.
12. **Mohameda Z., Capi G.** Development of a New Mobile Hu-manoid Robot for Assisting Elderly People, *Procedia Engineering*, 41, 2012, pp. 345–351.
13. **Nakashima M., Tsunoda Y.** Improvement of Crawl Stroke for the Swimming Humanoid Robot to Establish an Experimental Plat-form for Swimming Research, *Procedia Engineering*, 112, 2015, pp. 517–521.
14. **Shah S. V., Saha S. K., Dutt J. K.** Modular Framework for Dynamic Modeling and Analyses of Legged Robots, *Mechanism and Machine Theory*, 49, 2012, pp. 234–255.
15. **Yua X., Fub C., Chen K.** Modeling and Control of a Single-legged Robot, *Procedia Engineering*, 24, 2011, pp. 788–792.
16. **Potts A. S., Jaime da Cruz J.** A Comparison Between Free Motion Planning Algorithms Applied to a Quadruped Robot Leg, *IFAC-papers online*, 48—19, 2015, pp. 019–024.
17. **Rostro-Gonzalez H., Cerna-Garcia P. A., Trejo-Caballero G., Garcia-Capulin C. H., Ibarra-Manzano M. A., Avina-Cervantes J. G., Torres-Huitzil C.** A CPG System Based on Spiking Neurons for Hexapod Robot Locomotion, *Neurocomputing*, 170, 2015, pp. 47–54.
18. **Pan P. S., Wu C. M.** Design of a Hexapod Robot with a Servo Control and a Man-Machine Interface, *Robotics and Computer-In-tegrated manufacturing*, 28, 2012, pp. 351–358.
19. **Vidoni R., Gasparetto A.** Efficient Force Distribution and Leg Posture for a Bio-Inspired Spider Robot, *Robotics and Autonomous Systems*, 59, 2011, pp. 142–150.
20. **Pavljuk N. A., Budkov V. Ju., Bizin M. M., Ronzhin A. L.** *Razrabotka konstrukcii uzla nogi antropomorfного робота Antares na osnove dvuhmotorno gokolena* (Development site design legs anthro-pomorphic robot Antares based on twin-knee), *Izvestija JuFU. Teh-nicheskie nauki*, 2016, vol. 1 (174), pp. 227–239 (in Russian).
21. **Pavluk N., Ivin A., Budkov V., Kodyakov A., Ronzhin A.** Me-chanical Leg Design of the Anthropomorphic Robot Antares. Inter-active Collaborative Robotics, *First International Conference ICR 2016*, Budapest, Hungary, August 24–26, 2016, Springer Interna-tional Publishing, 2016, LNAI 9812, pp. 113–123.
22. **Sagirov Ju. G.** *Prochnostnoj analiz metallokonstrukcii gruzo-pod'emnyh kranov s ispol'zovaniem Solid Works* (Strength analysis of metal cranes using Solidworks), *Vestnik Priazovskogo gosudarstven-nogo tehnikeskogo universiteta. Serija: Tehnicheskienauki*, 2013, vol. 26, pp. 194–203 (in Russian).
23. **Tablica harakteristik metallov** (Table of characteristics of met-als), available at: [http://splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1438/\(date of accessed 20.06.16\)](http://splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1438/(date of accessed 20.06.16)).
24. **Motienko A. I., Tarasov A. G., Dorozhko I. V., Basov O. O.** *Proaktivnoe upravlenie robototekhnicheskimi sistemami spasenija postra-davshih* (Proactive management of rescue robotics systems affected), *Trudy SPIIRAN*, 2016, vol. 46, pp. 174–195 (in Russian).
25. **Ronzhin A. L., Yusupov R. M.** *Mnogomodal'nye interfejsy av-tonomnyhmobil'nyh robototekhnicheskikh kompleksov* (Multimodal inter-faces autonomous mobile robot), *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2015, vol. 1 (162), pp. 195–206 (in Russian).
26. **Yusupov R. M., Krjuchkov B. I., Karpov A. A., Ronzhin A. L., Usov V. M.** *Vozmozhnosti primenenija mnogomodal'nyh interfejsov na pilotiruemom kosmicheskom komplekse dlja podderzhanija kommuni-kacii kosmonavtov s mobil'nym robotom — pomoshhnikom jekipazh* (Possible applications of multimodal interfaces manned space com-plex to maintain communication with the mobile robot astronauts — the crew assistant), *Pilotiruemye Polety v Kosmos*, 2013, vol. 3 (8), pp. 23–34 (in Russian).
27. **Motienko A. I., Ronzhin A. L., Pavliuk N. A.** *Sovremennye razrabotki avarijno-spasatel'nyh robotov: vozmozhnosti i principy ih primenenija* (Modern development of rescue robots: opportunities and principles of their application), *Nauchnyj Vestnik NGTU*, 2015, vol. 3 (60), pp. 147–165 (in Russian).
28. **Stankevich L. A., Serebrjakov S. V.** *Kognitivnye sistemy i Agen-ty* (Cognitive systems and agents), *SPIIRAS Proceedings*, 2006, vol. 3, no. 1, pp. 71–87 (in Russian).