

УДК 621.865

Разработка конструкции и алгоритмов управления движением шагающего аппарата для технического обслуживания авиационных комплексов

Н.В. Гаревская, В.В. Полянский, А.М. Сабадырь, А.С. Семцов

Аннотация

Рассматривается автономный шагающий аппарат повышенной проходимости. Демонстрируются образ шагающего аппарата, математические модели его взаимодействия со средой, а так же геометрические характеристики преодолеваемых препятствий. На основе выбранного образа описываются функциональные возможности и алгоритмы системы управления.

Ключевые слова

автономный шагающий аппарат; облик, высокая проходимость; комбинированная система; комплексирование; робот-паук; система управления; локомоционный процесс; авиационный комплекс

Введение

Создание автоматических систем, способных облегчить труд человека и которые могут быть использованы в условиях, опасных для человека, а так же роботов, способных заменить человека на многих участках технического обслуживания авиационных комплексов – является актуальной научной и технической задачей. Одним из важных классов таких систем является класс шагающих роботов, предназначенных для перемещения по труднопроходимой поверхности, порой, с заранее неизвестным рельефом, что можно эффективно использовать на аэродромах с грунтовой поверхностью или аэродромах, подвергшихся бомбардировке.

Шагающий аппарат при движении использует для опоры лишь некоторые ограниченные участки поверхности на поверхности в отличие от колесных и гусеничных машин, имеющих непрерывную колею. Кроме того, шагающий аппарат не оставляет непрерывной колеи и существенно меньше повреждает почвенный покров, что может оказаться очень важным как в практическом, так и экологическом планах.

Анализируя существующие виды движителей, можно заметить, что нет ничего более совершенного, чем природные системы.

Основные свойства шагающего движителя позволяют предполагать высокую опорную и профильную проходимость для искусственных шагающих средств передвижения. Кроме сильно пересеченной местности, для обычного транспорта непроходимой является и среда, приспособленная для обитания человека: здания с узкими проходами, высокими порогами, резкими поворотами и лестничными маршами, как например склады с вооружением.

При использовании высокоскоростной камеры авторами исследованы основные характеристики перемещений пауков – птицеядов и мадагаскарских шипящих тараканов. Для этого объекты помещаются в стеклянный террариум и снимаются в различных ситуациях. Таким образом прослеживается кинематика и траектории перемещений объекта, определяются основные факторы выбора постановки ног на различные виды опорной поверхности. Выявлено, что насекомые обладают наиболее простыми типами походок, но в то же время обладают меньшей адаптивностью к сложному рельефу.

Паук-птицеяд – обладатель наиболее адаптивного типа конечности (из рассмотренных вариантов) и один из высших представителей отряда тяжёлых пауков.

Тело паука состоит из двух частей – головогруды (prosoma) и брюшка (opisthosoma), соединённых перемычкой (pedicel). Сверху всё тело покрыто жёсткой оболочкой – экзоскелетом (exoskeleton). С боков головогрудь ограничена базальными сегментами ног – соха (кокса). Все эти части соединены между собой гибкими эластичными мембранами (pleurae) и покрыты плотным слоем щетинок и волосков. Тело паука имеет 8 пар придатков. Каждая конечность состоит из семи трубчатых сегментов. Начиная от головогруды, эти членики называются: тазик (соха), вертлуг (trochanter), бедро (femur), колено (patella), голень (tibia), лапка (tarsus) и предлапка (pretarsus). На ходильных конечностях шестой членик (tarsus) разделён на два псевдосегмента – basitarsus и telotarsus. Эти анатомические особенности используются авторами для разработки шагающего паппарата.

Для шагающего робота в процессе выноса ног должен осуществляться контроль высоты положения стоп над поверхностью. Если высота любой из стоп становится меньше допустимой, то производится подъем ноги до достижения нужной высоты, а затем продолжается вынос ног вперед. Конец движения определяется одним из следующих условий:

– во время вспомогательной фазы должно происходить восстановление горизонтального положения и заданной высоты платформы, а также смещение центра тяжести в зону равновесия;

– зона достаточной устойчивости может быть определена через разность усилий в максимально и минимально нагруженных опорах, которая не должна превышать допустимой величины. Введение центра тяжести шагающего устройства в зону допустимой устойчивости достигается путем задания горизонтального движения платформы, что задается блоком поддержания равновесия.

Для общей ориентации шагающей машины в пространстве необходимо применять многоуровневую иерархическую систему алгоритмов.

Следует отметить, что кинематическая схема шагающего аппарата обеспечивает высокую маневренность и проходимость по сильно пересеченной местности. Опорные элементы шагающего робота имеют значительно большую зону возможных контактов с поверхностью передвижения по сравнению с колесом или гусеницей.

В этом ключе интересно рассмотреть концепцию совместного инженерного и биологического подхода к построению шагающих роботов. Эта концепция сходна с физиологическими моделями управления движением в живых организмах. Сходство это описано в исследованиях российских ученых, проводимых в Институте Проблем Передачи Информации и последних исследованиях в области аранеологии.

Постановка задачи

Шагающий робот как единый автомат может быть представлен набором некоторого количества элементарных независимо функционирующих автоматов, а локомоционный процесс результатом совместного действия этих автоматов. Каждый автомат решает свою собственную задачу и таким путем вносит свой вклад в формирование локомоционного процесса.

На самом верхнем уровне иерархии находится блок принятия решений (центральный мозг), в котором аккумулируется и обрабатывается информация, поступающая с блоков более низкого уровня. В состав следующего блока входят: компоненты системы управления и регулирования (спинной мозг), блок обработки видеоизображения (техническое зрение) и блок сбора периферийной информации, поступающей с датчиков, набор которых зависит от конкретного технического предназначения аппарата. На предпоследнем уровне располагаются блоки управления кинематическими звеньями и непосредственно исполнительными механизмами последнего уровня. Горизонтальные связи внутри иерархического уровня отсутствуют. Иными словами, шагающий робот как единое целое

может быть представлен композицией некоторого количества элементарных функционирующих элементов, а локомоционный процесс в этом случае является результатом их совместного действия. При этом каждый элемент решает свою собственную элементарную задачу.

Влияние на отдельный элемент такой системы за счет действия остальных элементов представляется как возмущающее воздействие внешней среды. Задача же каждого элемента (в данном случае блока управления приводом сустава) состоит в компенсации этих возмущений. Выходной сигнал с датчика обратной связи блока управления приводом косвенным образом содержит в себе также и информацию о взаимных возмущениях, создаваемых другими суставами (элементами) системы, следовательно, каналы связи между подобными блоками не требуются. В этом случае любые случайные возмущения внешней среды будут отработаны и учтены уже на самом низком уровне.

Помимо прочего, рассматриваемая композиционная концепция является наиболее эффективной также при реализации вопросов:

- разработки конструкции платформы (можно вести исследования различных иерархических уровней независимо, использование модульного принципа),
- обеспечения живучести системы (при выходе из строя одного элемента остальные продолжают функционировать, обеспечивая достаточную устойчивость),
- повышение универсальности (за счет разветвленности конструкции и унификации большинства элементов приводной системы обеспечивается достаточный потенциал для дальнейшей модернизации, в том числе и в рамках смены целевой аппаратуры).

В рамках данной работы для оценки возможностей платформы при решении целевых задач, а также для определения требуемой номенклатуры исполнительных агрегатов и блоков управления, разрабатывается математическая модель динамики функциональных элементов и платформы в целом. Данная модель должна учитывать влияние всех механических процессов на ориентацию платформы, обеспечивать простоту алгоритмов управления при организации каналов связи в системе «платформа—оператор», а также позволить на ее основе создание удобного и понятного интерфейса. В целом, разработка достаточно точной и адекватной математической модели позволит развивать модульную схемы вычислительных блоков для шагающих, а впоследствии и летающих, аппаратов, способных работать в однозначной увязке друг с другом.

Таким образом, совместно с биологическим подходом к формированию движений шагающих аппаратов встаёт вопрос необходимости применения элементов нейронных систем и распределенных вычислений.

В данной задаче требуется разработать конструкцию робота, удовлетворяющую следующим параметрам:

- 1) Маршевая скорость по ровной поверхности – 0.7 – 1.1 км/ч.
- 2) Высота единичных препятствий преодолеваемых на маршевой скорости – 120x12 x120мм.
- 3) Высота единичного препятствия (куб с гладкими гранями), преодолеваемого роботом без вспомогательных средств – 450x450x450 мм.
- 4) Длина корпуса не менее 350 мм.

Разработка конструкции

Рассматриваемая кинематическая схема ноги робота (рис. 1) представляет собой незамкнутый механизм с пятью вращательными кинематическими парами, где оси двух крайних и трёх внутренних кинематических пар соответственно параллельны друг другу.

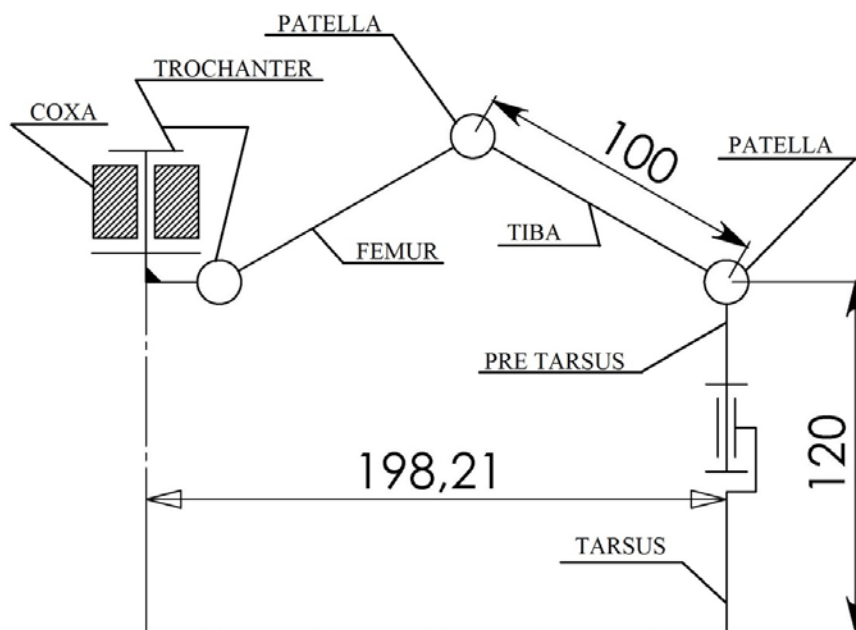


Рисунок 1. Кинематическая схема ноги робота

Исходя из сравнения кинематической схемы паука с принятыми размерами препятствий рассчитаем потребные размеры кинематических звеньев ног аппарата. Вначале рассмотрим задачу преодоления единичных препятствий на маршевой скорости, для этого рассмотрим несколько положений ноги относительно препятствия – нога огибает препятствие по большей траектории, по меньшей траектории, нога использует препятствие как опору (рис. 2).

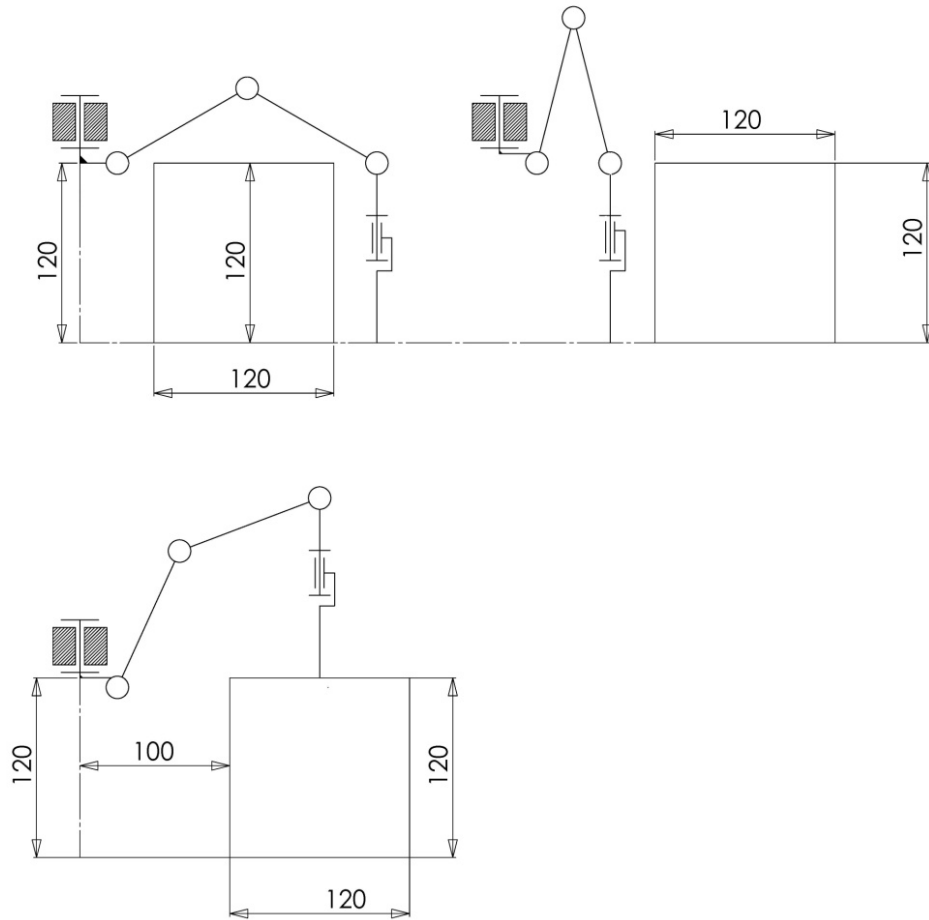


Рисунок 2. Опорные точки преодоления препятствия

Как видно из рисунка, чтобы преодолеть такое препятствие необходимо иметь длину сочленения ноги не менее 120 мм, однако, простейшими математическими вычислениями можно показать, что для решения данной задачи необходимая длина каждого звена должна составлять всего 100мм. Так же, полученную длину звеньев ног следует проверить на возможность выполнения условия преодоления большого единичного препятствия. Так как другие требования к параметрам корпуса не выявлены, считаем его длину минимально возможной, а в предварительных расчётах – равной нулю.

Для определения скоростных характеристик робота построим шаговое расписание (рис. 3) и выведем зависимость горизонтальной скорости робота от неровностей поверхности.

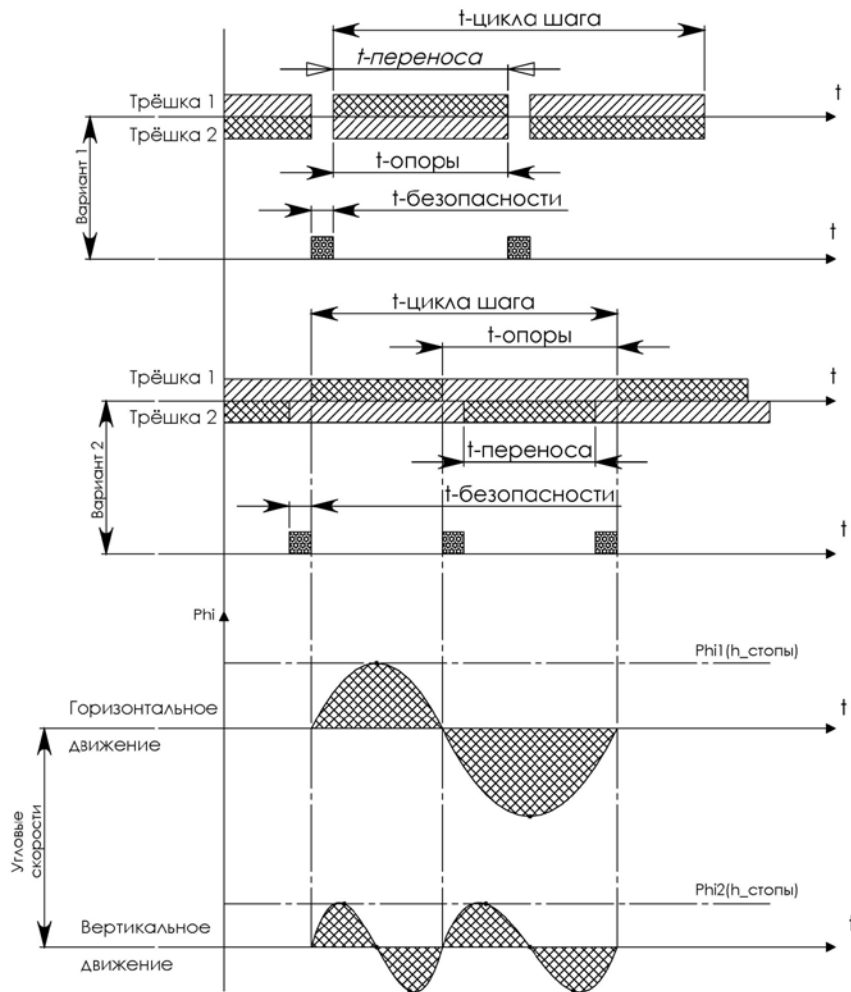


Рисунок 3. Шаговое расписание шагающих аппаратов, график зависимости угловых скоростей

На вышеприведённом рисунке показаны два варианта шаговых расписаний и график угловых скоростей моторов. Первый вариант шагового расписания – стандартное расписание, используемое в современных робототехнических шагающих аппаратах, второе расписание подсмотрено мною у насекомых, согласно которому они перемещаются. Одно из достоинств второго варианта шагового расписания – непрерывность походки и плавность хода. Для окончательного выбора шагового расписания определим наибольшую скорость в безразмерных величинах.

Вариант 1.

$$L = 9 \cdot L_{\text{шага}} \quad [\text{м}] \quad (1.1)$$

$$t = 9 \cdot t_{\text{шага}} + 8 \cdot t_{\text{безопасности}} = 4.5 \cdot t_{\text{цикла1}} \quad [\text{с}] \quad (1.2)$$

$$v = \frac{L}{t} = 0.9 \quad [\text{м/с}] \quad (1.3)$$

Где:

$L_{\text{шага}}$ – усреднённое значение длины одного шага одной ноги робота (полушаг).

L – рассматриваемое перемещение (9 полушагов).

v – скорость на рассматриваемом участке.

t – время рассматриваемого перемещения.

$t_{\text{шага}}$ – время, затрачиваемое на свободный перенос стопы.

$t_{\text{опоры}}$ – время, затрачиваемое ногой на перенос корпуса.

$t_{\text{безопасности}}$ – время, которое на поверхности находятся все точки опоры (неопрокидывание во время движения).

$t_{\text{цикла}}$ – время, затрачиваемое на весь шаговый цикл.

Вариант 2.

$$L = 8 \cdot L_{\text{шага}} \quad [\text{м}] \quad (1.1^*)$$

$$t = 9 \cdot t_{\text{шага}} - 8 \cdot t_{\text{безопасности}} = 4.5 \cdot t_{\text{цикла}} \quad [\text{с}] \quad (1.2^*)$$

$$v = \frac{L}{t} = 0.9 \quad [\text{м/с}] \quad (1.3^*)$$

Из выше приведённых простейших расчётов видно, что во втором варианте шагового расписания средняя скорость перемещения выше. Это справедливо для движения, как по ровной поверхности, так и для пресечённой местности. В целях унификации и взаимозаменяемости деталей, а так же для повышения технологичности и уменьшения сложности ремонта в конструкции аппарата предусмотрены однотипные привода, это накладывает ограничения на угловые скорости моторов. Как видно из графика (рис. 3) угловые перемещения приводов, отвечающих за вертикальное перемещение ноги, должны в 2 раза превышать угловые перемещения моторов, отвечающих за горизонтальное перемещение ноги. Из этого легко сделать вывод, что с увеличением размеров препятствий на пути робота, его скорость перемещения будет падать (т.е. имеет обратно пропорциональную зависимость).

С учётом требуемой маршевой скорости робота, можно определить необходимые характеристики приводов.

$$V_p = 1.1 \text{ км/ч.}$$

$$L_{\text{шага}} = 260 \text{ мм.}$$

Выразим скорость робота в количестве шагов в час:

$$V_p^{\text{ш}} = 4074.07407 \text{ ш/ч} = 1,13168724 \text{ ш/с.}$$

Теперь можно рассчитать потребную мощность приводов при стадии переноса корпуса:

$$N = M \cdot \dot{\varphi}. \quad (1.4)$$

где M – момент нагружения выходного вала, а $\dot{\varphi}$ – угловая скорость вращения выходного вала.

$$M = J \cdot \ddot{\varphi} + h_{тр} \cdot \dot{\varphi} \quad (1.5)$$

где J – суммарный момент инерции, а $h_{тр}$ – сила сопротивления в шарнирах.

Изначально считаем ногу стержнем длиной, равной длине вытянутой ноги.

$$J_1 = \frac{1}{3} m_{ноги} \cdot L^2 \text{ - момент инерции ноги.}$$

$J_2 = m_{корпуса} \cdot (l^2 + h^2)$ – момент инерции корпуса относительно точки касания стопы, где h – расстояние от точки крепления до центра масс корпуса.

$J = J_1 + J_2$ – суммарный момент инерции ноги и корпуса.

Для обеспечения потребной скорости определим характеристики угловых перемещений приводов.

Как видно из графика (рис. 3) и временного расписания – на длину шага 260 мм необходимо затратить 0,88 секунды при угле раствора ноги 100° . Простейший расчёт показывает, что средняя угловая скорость выходного вала привода – $\dot{\varphi}_{ср} = 113.6^\circ / с$. Для обеспечения плавности хода работа предположим среднюю скорость выходного вала $\dot{\varphi}_{ср} = 200^\circ / с$. Предположив угловое ускорение выходного вала привода равным $\ddot{\varphi}_{ср} = 500^\circ / с^2$ (ускорение, необходимое для достижения максимальной угловой скорости мотором в заданный промежуток времени) имеется возможность вычислить потребную мощность привода:

$$N = M \cdot \dot{\varphi} = \left(\left(\frac{1}{3} m_{ноги} \cdot l^2 + m_{корпуса} \cdot (l^2 + h^2) \right) \cdot \ddot{\varphi} \right) \cdot \dot{\varphi} \text{ Вт.} \quad (1.6)$$

Подставив расчётные данные длины и массы ноги и массы корпуса получим:

$$N = \left(\left(\frac{1}{3} \cdot 0.35 \cdot 0.3^2 + 0.6 \cdot (0.3^2 + 0.1^2) \right) \cdot 8.72 \right) \cdot 34 = 2.090184 \text{ Вт.}$$

Конструкция аппарата

Конструкция предлагаемого шагающего аппарата (рис. 4) имеет гибридное строение. Несущий корпус играет роль головогруды, однако в отличие от большинства паукообразных

несёт на себе всего три пары ходильных ног (как у насекомых), передняя пара конечностей вспомогательная и может использоваться как в качестве ходильных конечностей, так и хватательных. Брюшко на данный момент отсутствует, но может быть выражена в виде дополнительного схватно-обзорного механизма.

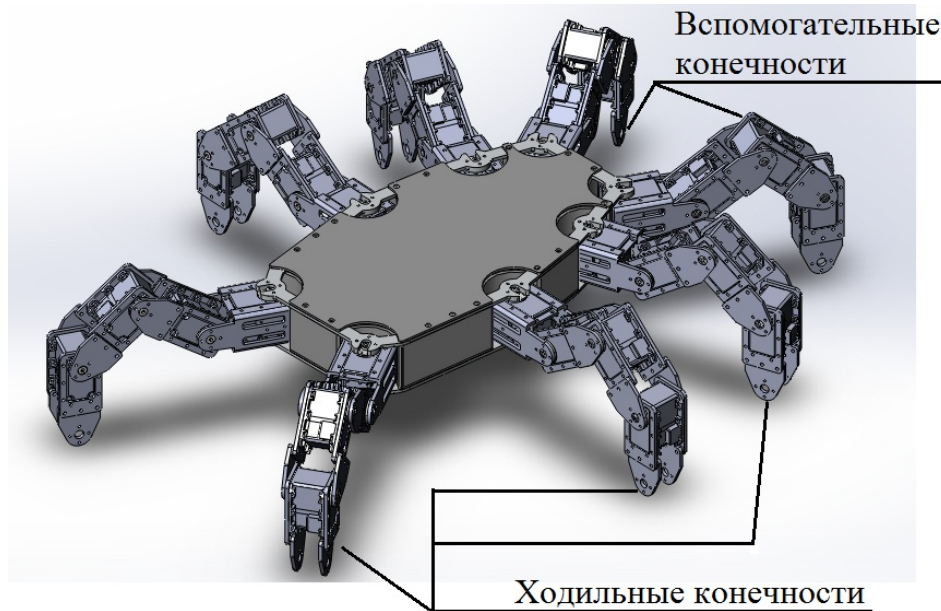


Рисунок 4. Внешний вид конструкции

Каждая нога (рис 5) имеет пять степеней свободы, и так же состоит из «тазика» (является частью корпуса), «вертлуга» (сложный двухстепенной сустав), «бедра», «колена», «голень», «предлапки» и «лапки», представляющих собой единый элемент а так же «коготков лапки».

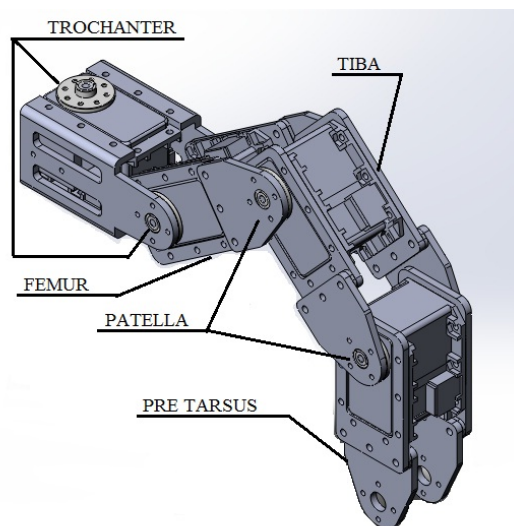


Рисунок 5. Внешний вид ноги. Датчик касания (лапка и коготки) отсутствуют

Относительные перемещения в суставах («вертлуге», «колене» и между «голенью» и «предлапкой») осуществляются электромеханическими приводами с обратной связью,

позволяющей контролировать положение, скорость и момент на выходном валу, а так же температуру электромотора, что существенно понижает вероятность выхода последнего из строя. В нижней части ноги в роли «коготков лапки» находится контактный датчик касания поверхности, являющийся простейшим аналоговым триггером и набор тензометрических датчиков усилия, позволяющих определить силу взаимного влияния РТС и окружающей среды в задаче преодоления сложных единичных препятствий.

На переднем и заднем торцах корпуса робота расположены по две микровидеокамеры, обладающие горизонтальной вращательной степенью подвижности и выполняющие роль «глаз». Так же на свободных торцах корпуса установлены инфракрасные дальномеры и сонары, выполняющие роль органов осязания (волосков и щетинок) и предупреждающие о наличии препятствий на пути робота. На рисунке на данный момент отсутствуют.

На верхней панели корпуса предполагается расположить многофункциональный двухзвенный манипулятор (ористhosoma) со сменной головной частью, имеющий 3 степени свободы. На конце свободного звена крепится камера оперативно – тактического обзора. Сменные головные части представляют собой комплект независимых робототехнических систем, предназначенных для выполнения конкретной задачи (поднятие груза, сверление отверстий, обезвреживание детонаторов взрывных устройств и т.д.). Так же на верхней панели корпуса может располагаться блок системы ведения огня и система управления вооружением.

Внутри корпуса расположены: батарейный отсек (можно сказать – сердце робота) и центральный контроллер (ganglion), отвечающий за локомоционные процессы, навигацию, принятие независимых решений и связь с оператором, блок радиосвязи.

Выводы

1. В работе рассмотрены общие проблемы формирования облика и проектирования шагающих аппаратов для технического обслуживания авиационных комплексов, а так же задачи, стоящие при построении математических моделей и численном моделировании алгоритмов движения шагающих платформ.

2. Определена концепция построения распределенной системы управления многозвенными механизмами.

3. В рамках определения облика системы выбран тип кинематической схемы в виде комбинированного – арахно-инсектоморфного движителя, что позволило повысить свойства проходимости аппарата без потери статической и динамической устойчивости.

4. Изучены и представлены основные характеристики их движения.

5. Построен макет шагающего аппарата.

Библиографический список

1. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. – Москва: «МИР», 1985.
2. Запятой В.П. Робототехнические системы и комплексы. – Москва: «Транспорт», 1999.
3. Шахнипур М. Курс робототехники. – Москва: «МИР», 1990.
4. Евграфов А.Н., Московкин В.В., Петрушов В.В., Стригин И.А. Геометрические и кинематические параметры колеса и его сопротивление качению. – Москва: Автомобильная промышленность. 1982. -№ 8.
5. Куляшов А.П. Специальные строительно-дорожные машины с роторновинтовым движителем. – Дис. докт. техн. наук: — Горький, 1986.
6. Фролов К.В. Механика промышленных роботов. Кинематика и динамика. – Москва: «Высшая школа», 1988.

Сведения об авторах

Гаревская Наталья Васильевна, студент Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

e-mail: tashonok@mail.ru

Полянский Виталий Викторович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

e-mail: vitapolk@rambler.ru

Сабадырь Артём Максимович, студент Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

e-mail: zvenayte@pisem.net

Семцов Алексей Сергеевич, студент Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

e-mail: semcov@zaoincos.com