

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-5>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN516.pdf>

Статья опубликована 09.09.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Фокин В.Г., Шаныгин С.В. Структура системы управления шестиногого шагающего робота Гексабот // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN516.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.865.8

Фокин Виктор Геннадьевич

ФГБОУ ВО «Московский университет радиотехники, электроники и автоматики», Россия, Москва¹

Аспирант

E-mail: rbs.lab@bk.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=813295

Шаныгин Сергей Витальевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)», Россия, Москва

Кандидат технических наук

E-mail: sg78dec@mail.ru

Структура системы управления шестиногого шагающего робота Гексабот

Аннотация. В статье обозначены преимущественные области применения шагающих роботов. Из всего разнообразия существующих шагающих роботов наиболее многочисленными, на сегодняшний момент, являются конструкции с четырьмя и шестью конечностями. Их популярность в значительной степени обусловлена тем, что задачу обеспечения устойчивости движущихся шестиногих аппаратов решить относительно просто по сравнению с другими конструкциями. В статье приведено обоснование выбора конструкции шагающего робота Гексабот. Указана необходимость очувствления конечностей робота при перемещении в автономном режиме по неровной поверхности. Для этого на конечностях Гексабота размещены опто-механические датчики, которые позволяют повысить функциональность системы управления за счет возможности распознавания момента соприкосновения конечности с опорной поверхностью, а также определения силы воздействующей конечностью на опорную поверхность. Определены основные задачи системы управления шагающего робота для обеспечения перемещения корпуса, такие как позиционирование конечности относительно корпуса, устойчивость корпуса, построение траектории движения конечности. Приведены основные формулы для решения задач ориентирования ступни конечности относительно корпуса робота. Для решения задач управления шагающим роботом «Гексабот» предложена система управления, состоящая из трех уровней: прикладной, навигационный, обеспечение движения. Представлена структурная схема шагающего робота «Гексабот».

Ключевые слова: шагающий робот; система управления шагающего робота; Гексабот; модульная система управления; прикладной уровень; уровень навигации; уровень

¹ 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20

обеспечение движения шагающего робота; элементы шагания; устойчивость шагающего робота; конструкции шагающего робота

Введение

С начала развития робототехники, появился интерес к области их применения, требующий от роботизированной системы повышенной мобильности в условиях реального мира. К таким условиям можно отнести выполнение задач, требующих передвижение по пересечённой местности, завалам, внутри зданий, сооружениям, узким шахтам и т.п. Применение колёсных или гусеничных платформ в таких условиях представляется невозможным или малоэффективным. В то же время перемещение представителей животного мира в таких условиях не вызывает особых проблем [1]. Передвижение по неподготовленной поверхности шаганием представляется эффективным с точки зрения мобильности и энергозатрат.

Конструкция шагающего робота

Существует множество вариантов конструкции шагающих роботов (ШР) [2]: с двумя, четырьмя, шестью, восьмью и более конечностями. Вполне понятно, что если количество ног шагающего робота велико, робот может использовать большое количество точек опоры во время передвижения, что значительно увеличивает его статическую устойчивость [3]. Также, если количество точек опоры увеличивается, робот может нести больше полезной нагрузки, используя различные походки. Тем не менее, увеличение числа ног приводит к увеличению веса конструкции, потребления энергии. Мобильные роботы, как ожидается, должны выполнять задачи в течение длительного времени без возможности подзарядки. Таким образом, высокий уровень потребления электроэнергии всегда нежелателен для мобильных роботов. Поэтому конструкции с восьмью и более конечностями не эффективны с этой точки зрения. С другой стороны, четвероногие роботы [4] потребляют меньше энергии, но обладают меньшей статической стабильностью, они больше ограничены в выборе маршрута при движении по пересеченной местности. Шестиногие роботы или гексаподы (рис. 1) (разработано авторами) представляют компромисс между четырех- и восьминогими. На данный момент, такая конструкция является наиболее распространенной.

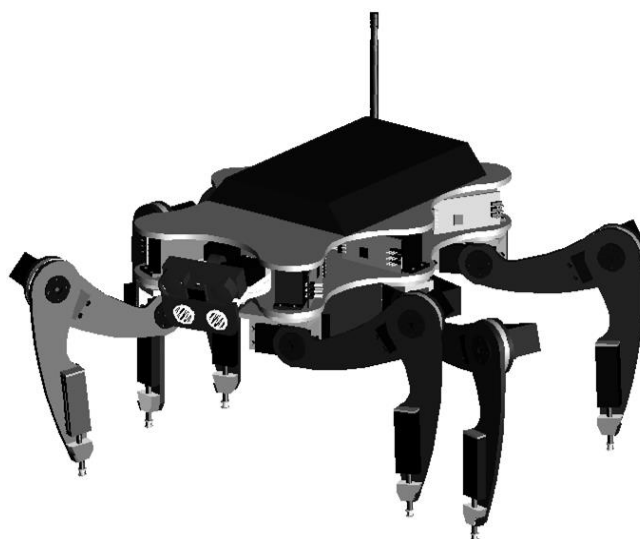


Рисунок 1. Конструкция платформы шестиногого робота Гексабот (разработано авторами)

Однако при движении по неровной поверхности в автономном режиме, системе управления нужна информация о взаимодействии конечностей с опорной поверхностью. Для этой цели в стандартную конструкцию внесены изменения: на конечностях Гексабота установлены опто-механические датчики (рис. 2) (разработано авторами), определяющие момент соприкосновения ноги с поверхностью и степень нагрузки на каждую опору.

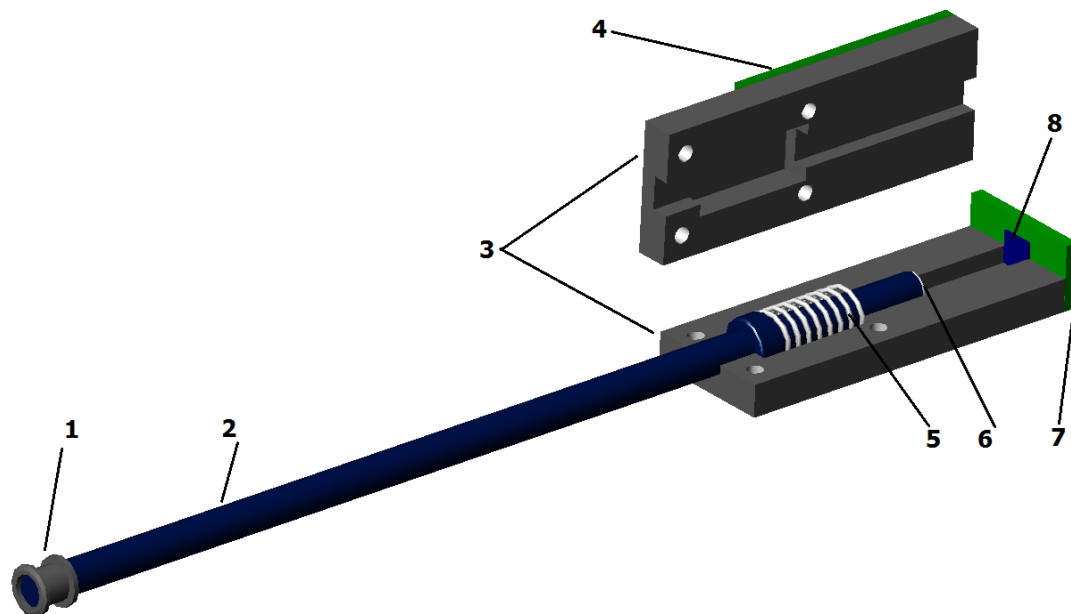


Рисунок 2. Конструкция датчика (разработано авторами)

Датчик состоит из корпуса – 3, подвижного штока – 2, демпферной насадки - 1, возвратной пружины - 5, платы модуля датчика – 4, платы датчика – 7, на которой расположена оптическая пара (светодиод - фототранзистор) - 8.

Кроме количества конечностей, маневренность и проходимость ШР определяет конструкция самой конечности. В случае применения конструкции с 2-мя приводами снижается вес и энергопотребление, однако рабочая зона конечности сокращается, что отрицательно сказывается на маневренности и проходимости при движении по неровной поверхности. В случае применения трех звеньев с тремя приводами рабочая зона значительно расширяется.

Как сказано выше, зона предполагаемого размещения стопы конечности (рис. 3) (составлено авторами), зависит от кинематической схемы конечности. Область, ограниченная кривыми M_1M_2 , M_2M_{A2} , $M_{A2}M_{A1}$, $M_{A1}M_1$ является проекцией рабочей зоной точки А на опорную поверхность. Область проекции $M_1M_2M_3M_4$ доступна для точки В (ступни конечности робота). Для уменьшения вероятности соскальзывания стопы угол «вхождения» звена L_2 к опорной поверхности - β (рис. 4) должен быть близким к 90° и для поддержания этого условия ($\beta=90^\circ \pm 10^\circ$), рабочая зона точки В должна находиться вблизи кривой $MA_1 MA_2$ – проекции траектории т. А на опорную поверхность. Эта зона ограничена кривыми $M_{B1}M_{B2}$, $M_{B2}M_{B3}$, $M_{B3}M_{B4}$, $M_{B4}M_{B1}$ и смещается вместе с текущей траекторией точки А. При этом выбирая конкретную точку опоры из рабочей зоны необходимо учитывать возможность соскальзывания стопы с места контакта.

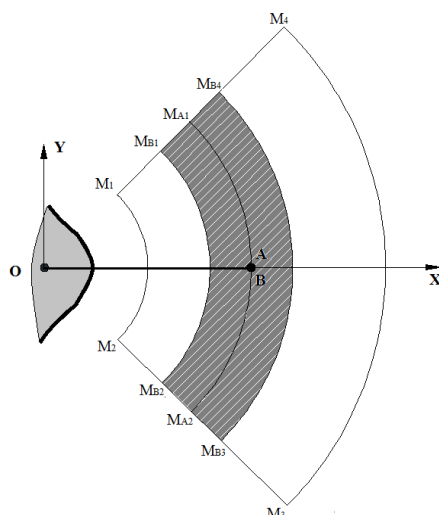


Рисунок 3. Рабочая зона конечностей ШПР Гексабот (разработано авторами)

Для решения задач ориентирования ступни конечности - точки В относительно корпуса (рис. 4) (составлено авторами), как функции $f(q_1, q_2, q_3)$ используются нижеприведённые формулы:

$$\begin{aligned} x_B &= \cos q_1 L_1 \sin q_2 + L_2 \sin(q_1 + q_2) \\ y_B &= \sin q_1 (L_1 \sin q_2 + L_2 \sin(q_1 + q_2)) \\ z_B &= L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Формулы для решения обратной задачи кинематики в этом случае выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} q_1 &= \tan^{-1} \frac{y_B}{x_B} \\ q_2 &= 90 - \cos^{-1} \frac{L_1^2 + c^2 - L_2^2}{2 L_1 c} \\ q_3 &= 180 - \cos^{-1} \frac{L_1^2 + L_2^2 - c^2}{2 L_1 L_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$c = \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2} \quad (3)$$

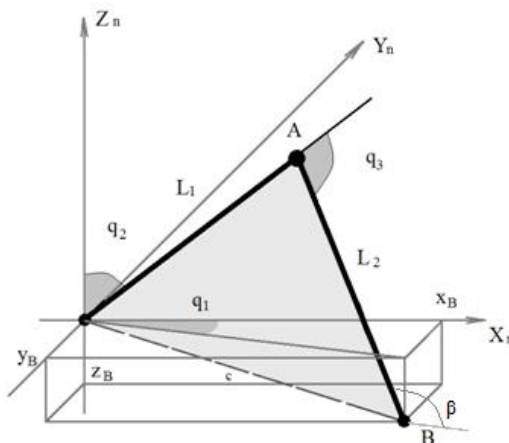


Рисунок 4. Координация ступни относительно корпуса робота (разработано авторами)

Одной из задач, решаемых системой управления ШР, является задача устойчивости робота [5]. В основном она сводится к «удержанию» проекции центра тяжести (ЦТ) корпуса робота на опорной поверхности в области, определенной расположением опорных точек (рис. 5) (составлено авторами).

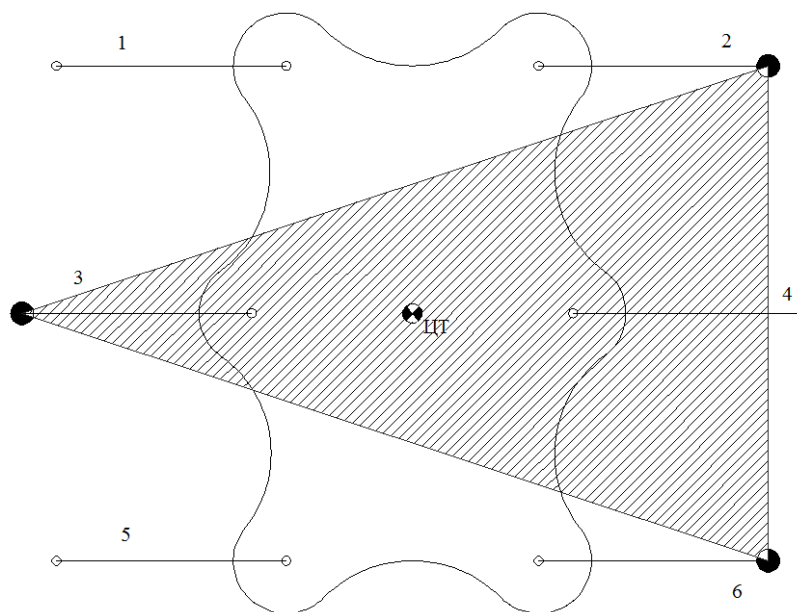


Рисунок 5. Зона устойчивости платформы (разработано авторами)

На рисунке 6 конечности 2, 3, 6 находятся в контакте с опорной поверхностью, а проекция ЦТ платформы на опорную поверхность находится в области, образованной линиями, проходящими через точки опоры.

В процессе шагания робота при движении по пересеченной местности, скорость тела изменяется в зависимости от наличия числа возможных шагов. Когда количество доступных возможных шагов ограничено, скорость тела робота уменьшается, замедлением передвижения ног робота. В этой ситуации робот должен уметь правильно поддерживать свое тело ногами, которые находятся в фазе поддержки, так что другие ноги (в фазе переноса) могут быть размещены в ближайших запланированных местах впереди по направлению.

Шагание представляет собой циклический процесс переноса ступни от одной опорной точки к другой.

Траектория ступни строится из набора годографов (рис.6) (составлено авторами):

1. $V_0 \rightarrow V_1$ - отрыв ступни (годограф g_0);
2. $V_1 \rightarrow V_2$ - перенос в область новой опорной точки (годограф g_1);
3. $V_2 \rightarrow V_3$ - опускание конечности до опорной поверхности (годограф g_2);
4. $V_3 \rightarrow V_0 \rightarrow V_4$ - перенос конечности в опорном состоянии - рабочая фаза (годограф g_3);
5. $V_4 \rightarrow V_5$ - отрыв ступни (годограф g_0);
6. $V_5 \rightarrow V_6$ - перенос в область новой опорной точки (годограф g_6).

Здесь видно, что цикл имеет 2 набора годографов – сокращенный и расширенный. Первый набор: g_0, g_1, g_2, g_3 ; второй: g_3, g_0, g_6, g_2, g_3 . Сокращенный набор применяется в начале движения робота для группы конечностей, которые первыми отрываются от опорной поверхности для переноса в новую опорную зону.

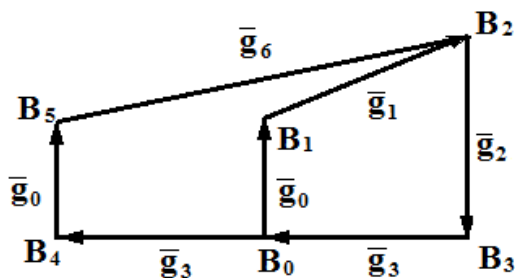


Рисунок 6. Составные элементы шага (разработано авторами)

Во время перемещения по выбранным годографам необходимо осуществлять постоянный контроль над выполнением этой задачи. Так, необходимо отследить момент соприкосновения с опорной поверхностью во время опускания конечности, во время переноса к новой опорной точки требуется избежать столкновения с препятствием в виде постороннего объекта или естественной неровности рельефа.

Структура системы управления

Для решения задач управления шагающим роботом Гексабот, разработана структура управления, представленная тремя уровнями (рис. 7) (разработано авторами):

- прикладной;
- навигационный;
- обеспечение движения.

Каждому уровню определен свой ряд задач, выполняемые функциональными модулями, а взаимодействие (обмен данными, передача команд) между модулями происходит с помощью блоков взаимодействия, входящих в каждый модуль. Взаимодействие между уровнями осуществляется через блоки взаимодействия управляющих модулей уровней (рис. 8):

- модуль формирования задач прикладного уровня;
- навигационный модуль навигационного уровня;
- модуль управления и координации движения уровня обеспечения движения.



Рисунок 7. Структура системы управления ШР Гексабот (разработано авторами)

Прикладной уровень зависит от назначения робота и решает задачи связи с терминалом управления при необходимости, постановка задачи для навигационного уровня, а также решение сервисных задач, зависящих от назначения робота.

Навигационный уровень призван решать задачи ориентирования в пространстве, обнаружения непреодолимых препятствий, планирование безопасного маршрута движения. На этом уровне формируется общий вектор движения корпуса и его корректировка в случае необходимости.

Уровень системы управления обеспечения движения предназначен для решения задач перемещения корпуса по заданному вектору в условиях с заранее не известным расположением неровностей на опорной поверхности.

Прикладной и навигационный уровни абстрагированы от реализации задач обеспечения движения, т.о. они могут также работать на платформах с колесным и гусеничным движителем. Тогда как, уровень обеспечения движения построен для реализации задач перемещения шагами. Специфичным для такого способа перемещения являются решение задач устойчивости платформы при ходьбе, контроля опорной поверхности в области предполагаемого размещения стопы каждой конечности, координации движения всеми конечностями для составления походки с учётом состояния опорной поверхности.

Исходя из поставленных задач, можно определить составные части для каждого уровня системы управления и их взаимодействие. На структурной схеме (рис. 8) (разработано авторами) представлены все три уровня системы управления.

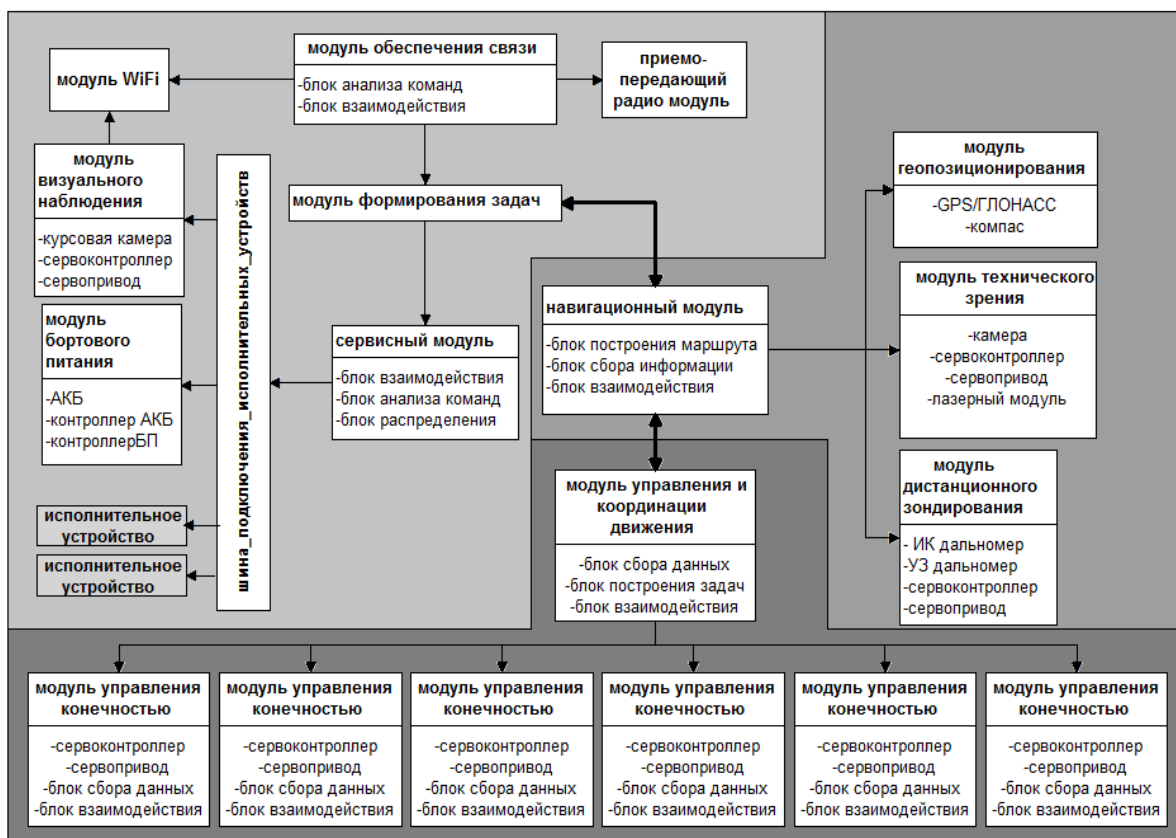


Рисунок 8. Структурная схема системы управления (разработано авторами)

Заключение

Шагающий способ перемещения мобильного робота представляет большой интерес, когда речь идет о движении по поверхности со значительными неровностями рельефа или в местах с ограниченным пространством для манёвра.

Из всех видов конструкций ШР, шестиногие конструкции обладают наилучшим сочетанием таких свойств, как устойчивость, мобильность, энергопотребление. Однако реализация преимуществ ШР зависит от системы управления, обеспечивающие контроль над процессом шагания, в частности учет получаемых данных о состоянии опорной поверхности, координацию движения конечностей и т.д. Без такой системы управления реализовать на практике преимущества способа передвижения шаганием невозможно.

Как для любой мобильной системы, задача снижения энергопотребления ШР является одной из важных. Частично эту проблему можно решить с помощью выбора оптимальной для данных условий походки. Что, также, является задачей системы управления.

Представленная реализация системы управления Гексабот тремя уровнями, состоящих из функциональных модулей, позволяет корректировать работу каждого из них, путем добавления, удаления, модификации модулей или всей структуры уровня, не внося изменений в другие уровни системы. Что, несомненно, упрощает модернизацию робота под конкретные задачи, отработки новых алгоритмов передвижения, ориентирования, навигации ШР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Beer R., Quinn R.D., Ciel H.J., Ritzmann R.E. Biologically inspired approaches in robotics: what we can learn from insects. *Commun ACM* 40(3). 1997. pp. 30–38.
2. Фокин В.Г., Шаныгин С.В. Обзор и перспективы развития мобильных шагающих робототехнических систем // Молодой ученый 18(98) ч.2, 2015, С. 207-215.
3. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 199 с.
4. Santos P.G., Garcia E., Estremera J. Quadrupedal locomotion: an introduction to the control of four-legged robots. Springer, London, 2006. p. 268.
5. Лапшин В.В. Об устойчивости движения шагающих машин // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наука и образование. 2014. №6. С. 319-335.
6. Боровин Г.К., Буданов В.М., Девянин Е.А., Лапшин В.В., Мирный В.М., Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. Основные проблемы и особенности проектирования многоцелевого гидравлического шагающего шасси. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 1995. 28 с.
7. Брискин Е.С., Леонард А.В. Устойчивость поступательного движения шагающей машины с цикловыми движителями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. №6. С. 131-138.
8. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2013. 32 с. (Препринт / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН; № 101). Режим доступа: http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013_101.pdf (дата обращения 08.05.2016).

9. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 199 с.
10. Буданов В.М. Алгоритмы планирования движений шестиногого шагающего аппарата // *Фундаментальная и прикладная математика* 2005, том 11, Выпуск 7, С. 197-206.
11. Nonami K. et al. *Hydraulically Actuated Hexapod Robots: Design, Implementation and Control*, *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering* 66, Springer Japan 2014. p. 277.
12. Naika K, Bardenc J. Design, development and control of a hopping machine – an exercise in biomechatronics. *Appl Bionics Biomech* 7(1), 2010. pp. 83–94.
13. Лопота А.В., Бахшиев А.В., Горюнов В.В., Плавинский М.Н., Смирнова Е.Ю. Перспективы применения интерпретирующей навигации и комплексирования в системах управления мобильными роботами. 2014, С. 104-110.
14. Зашелкин К.В. Калиниченко В.В., Ульченко Н.О. Реализация комбинированного способа навигации автономного мобильного робота // *Электротехнические и компьютерные системы* 2013, №9 (85), С. 102-109.
15. Pfeiffer F., Eltze J. WHJ Six-legged technical walking considering biological principles. *Robot Autonom Syst* 14 (2–3). 1995. pp. 223–232.
16. Жога В.В., Брискин Е.С., Фролова Н.Е., Смотров В.М. Концепция системы управления шагающим роботом для разминирования // *Искусственный интеллект*. 2003. №2. С. 140-147.
17. Поливцев С.А. Интеллектуальная система управления мобильным роботом как сеть процессов // *Искусственный интеллект*. 2002. №2. С. 161-167.
18. Zielinska T. Development of walking machines: historical perspective. In: *Proceedings of the international symposium on history of machines and mechanisms*. Kluwer Academic Publisher, 2004, pp. 357–370.
19. Hodoshima R. et al Development of quadruped walking robot TITAN XI for steep slope operation. *J Robotic Soc Japan* 23(7), 2005, pp. 847–857.
20. Bullo F., Cortes J., Martinez S. *Distributed Control of Robotic Networks: A Mathematical Approach to Motion Coordination Algorithms*, 2009, p. 314.
21. Девятериков Е.А., Михайлов Б.Б. Система управления движением мобильного робота с визуальным одомером // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 5' (181) 2013, стр. 103-108.
22. Афанасьев О.А., Гендель В.С., Зимин А.В. Шагающие машины // *Теория Механизмов и Машин*, 2005, №1, С. 88-91.

Fokin Victor Gennadievich

Moscow state university of information technologies, radio engineering and electronics, Russia, Moscow
E-mail: rbs.lab@bk.ru

Shanygin Sergey Vitalievich

Bauman Moscow state technical university (national research university of technology), Russia, Moscow
E-mail: sg78dec@mail.ru

The structure of the control system of a six-legged walking robot Hexabot

Abstract. The article indicated by the application of preferential walking robots. From all variety of existing walking robots most numerous, at the moment, are the construction with four and six legs. Their popularity is largely due to the fact that the task of ensuring the stability of the hexapod moving devices to solve relatively simple compared to other designs. This article describes the case of design choice walking robot Hexabot. The necessity of sensitizing robot legs when moving in standalone mode on a rough surface. For this purpose, on the Hexapod legs are placed opto-mechanical sensors that will allow the detection the moment of contact legs with a support surface, as well as determining the force exerted between the leg of robot and support surface. The main problems of the walking robot control system for moving the body, such as the positioning leg relative to the body, body resistance, drawing trajectory limb movement. Showing the basic formulas for problem solution of the orientation the leg against the robot body. For solve the control task of Hexabot designed control system consisting of three levels: service level, navigation level, propulsion level. Presented the block diagram of the control system for walking robot Hexabot.

Keywords: a walking robot; a control system of walking robot; Hexabot; the modular control system; the service level; the navigation level; the propulsion level; the elements of legged movement; stability the walking robot; a walking robot construction

REFERENCES

1. Beer R., Quinn R.D., Ciel H.J., Ritzmann R.E. Biologically inspired approaches in robotics: what we can learn from insects. *Commun ACM* 40(3). 1997. pp. 30–38.
2. Fokin V.G., Shanygin S.V. *Obzor i perspektivy razvitiya mobil'nykh shagayushchikh robototekhnicheskikh sistem // Molodoy uchenyy* 18(98) ch.2, 2015, С. 207-215.
3. Lapshin V.V. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin*. М.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2012. 199 s.
4. Santos P.G., Garcia E., Estremera J. *Quadrupedal locomotion: an introduction to the control of four-legged robots*. Springer, London, 2006. p. 268.
5. Lapshin V.V. *Ob ustoychivosti dvizheniya shagayushchikh mashin // Nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana. Nauka i obrazovanie*. 2014. №6. S. 319-335.
6. Borovin G.K., Budanov V.M., Devyanin E.A., Lapshin V.V., Mirnyy V.M., Okhotsimskiy D.E., Platonov A.K. *Osnovnye problemy i osobennosti proektirovaniya mnogotselevogo gidravlicheskogo shagayushchego shassi*. М.: IPM im. M.V. Keldysha RAN. 1995. 28 s.

7. Briskin E.S., Leonard A.V. Ustoychivost' postupatel'nogo dvizheniya shagayushchey mashiny s tsiklovymi dvizhitelyami // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2013. №6. S. 131-138.
8. Pavlovskiy V.E. O razrabotkakh shagayushchikh mashin. M.: IPM im. M.V. Keldysha RAN. 2013. 32 s. (Preprint / IPM im. M.V. Keldysha RAN; № 101). Rezhim dostupa: http://keldysh.ru/papers/2013/2013_prep2013_101.pdf (data obrashcheniya 08.05.2016).
9. Lapshin V.V. Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2012. 199 s.
10. Budanov V.M. Algoritmy planirovaniya dvizheniy shestinogogo shagayushchego apparata // Fundamental'naya i prikladnaya matematika 2005, tom 11, Vypusk 7, S. 197-206.
11. Nonami K. et al. Hydraulically Actuated Hexapod Robots: Design, Implementation and Control, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering 66, Springer Japan 2014. p. 277.
12. Naika K, Bardenc J. Design, development and control of a hopping machine – an exercise in biomechatronics. Appl Bionics Biomech 7(1), 2010. pp. 83–94.
13. Lopota A.V., Bakhshiev A.V., Goryunov V.V., Plavinskiy M.N., Smirnova E.Yu. Perspektivy primeneniya interpretiruyushchey navigatsii i kompleksirovaniya v sistemakh upravleni mobil'nymi robotami. 2014, S. 104-110.
14. Zashchelkin K.V. Kalinichenko V.V., Ul'chenko N.O. Realizatsiya kombinirovannogo sposoba navigatsii avtonomnogo mobil'nogo robota // Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy 2013, №9 (85), S. 102-109.
15. Pfeiffer F., Eltze J. WHJ Six-legged technical walking considering biological principles. Robot Autonom Syst 14 (2–3). 1995. pp. 223–232.
16. Zhoga V.V., Briskin E.S., Frolova N.E., Smotrov V.M. Kontseptsiya sistemy upravleniya shagayushchim robotom dlya razminirovaniya // Iskusstvennyy intellekt. 2003. №2. S. 140-147.
17. Polivtsev S.A. Intellektual'naya sistema upravleniya mobil'nym robotom kak set' protsessov // Iskusstvennyy intellekt. 2002. №2. S. 161-167.
18. Zielinska T. Development of walking machines: historical perspective. In: Proceedings of the international symposium on history of machines and mechanisms. Kluwer Academic Publisher, 2004, pp. 357–370.
19. Hodoshima R. et al Development of quadruped walking robot TITAN XI for steep slope operation. J Robotic Soc Japan 23(7), 2005, pp. 847–857.
20. Bullo F., Cortes J., Martinez S. Distributed Control of Robotic Networks: A Mathematical Approach to Motion Coordination Algorithms, 2009, p. 314.
21. Devyaterikov E.A., Mikhaylov B.B. Sistema upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota s vizual'nym odometrom // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. 5' (181) 2013, str. 103-108.
22. Afanas'ev O.A., Gendel' V.S., Zimin A.V. Shagayushchie mashiny // Teoriya Mekhanizmov i Mashin, 2005, №1, S. 88-91.