

Проектирование шестиногих шагающих роботов в среде CAD-системы

В.И. Гончаренко,
в.н.с., д.т.н., доц., vladimirogonch@mail.ru,
ИПУ РАН, МАИ(НИУ), г. Москва,
В.А. Данилов
асп., tvo@mai.ru,
МАИ, г. Москва

Рассматриваются основные типы конструкций шестиногих роботов и обосновывается выбор конструкции реализованного макета робота. На основе результатов анализа известных подходов к проектированию шагающих роботов и выбранного типа робота описывается решение прямой задачи кинематики двумя методами: алгебраическим и геометрическим. Рассчитаны и программно реализованы кинематическая и динамическая модели шестиногого шагающего инсектоморфного робота. Построена компьютерная модель трёхмерного визуального представления перемещения шестиногого шагающего робота в заданных системах координат. Проверка правильности разработанных математических моделей производилась при помощи CAD- модели.

The main types of structures of six-legged robots are considered and the choice of the design of the realized robot mock-up is justified. Based on the results of the analysis of known approaches to the design of walking robots and the chosen type of robot, the solution of the direct kinematics problem is described by two methods: algebraic and geometric. The kinematic and dynamic models of the six-step walking insectomorphic robot are calculated and programmed. A computer model of a three-dimensional visual representation of the movement of a six-legged walking robot in the given coordinate systems is constructed. Verification of the correctness of the developed mathematical models was carried out with the help of the CAD-model.

Введение

В настоящее время при проектировании шагающих роботов с шестью конечностями исследователей интересуют, прежде всего, ответы на следующие вопросы: как организовать эффективное управление всеми шестью конечностями шагающего аппарата и как интегрировать эти алгоритмы управления с системами технического зрения так, чтобы робот мог автоматически распознавать произвольные препятствия и, по возможности, плавно перемещаться по неровной поверхности [1-4].

Шагающие аппараты, в отличие от колесных транспортных средств, передвигаются при помощи попеременной опоры на разные ноги, тем самым перемещая свой центр тяжести в нужном направлении. Перед разработкой алгоритма походки необходимо выделить две основные фазы состояний ног во время движения: фаза опоры и фаза переноса. Во время фазы опоры нога находится неподвижно на поверхности земли и перемещает центр тяжести корпуса машины. В фазе переноса нога находится в воздухе и перемещается в то место поверхности, куда впоследствии необходимо будет продолжить движение. Походка характеризуется порядком подъема и постановки ног на поверхность.

Целью данной работы является разработка математической модели движения макета шестиногого шагающего робота, позволяющей получить визуальное представление о его перемещении в пространстве при проектировании алгоритмов управления. Особенностью проектирования шагающих роботов является необходимость построения так называемой «контактной модели», которая служит для описания сил, действующих на стопы шагающего аппарата, со стороны опорной поверхности. Кроме этого, для моделирования движения таких машин требуется разработка динамической модели тела робота.

Разработанная математическая модель шестиногого шагающего робота состоит из трех основных подмоделей, выполняющих различные функции:

- *модель прямой кинематики* (определяет положение конечностей робота в пространстве относительно его центра масс при известных углах поворота сервоприводов в сочленениях);
- *модель обратной кинематики* (вычисляет величину углов в сочленениях, необходимую для перемещения конца ноги из одного положения в другое, используется для разработки траектории движения ног во время ходьбы);
- *динамическая модель* (служит для описания сил и моментов, действующих на робота и на выходные валы сервоприводов в сочленениях конечностей). Данная модель в свою очередь состоит из нескольких подмоделей:
- сервопривод - принимает на вход значение заданного угла и действующие моменты в сочленениях, являющимися возмущающими воздействиями. На выходе эта модель выдаёт угол выходного вала, угловую скорость и угловое ускорение;
- исполнительный орган - описывает моменты, действующие в каждом звене конечности, которые возникают из-за соприкосновения с поверхностью движения, либо подаваемые от сервоприводов;
- контактная модель - описывает силы, действующие на конец рабочего органа во время прикосновения его к поверхности;
- тело робота - описывает тело шагающей машины и его реакцию на силы и моменты, возникающие в местах точек подвеса педипуляторов.

В работе рассмотрены основные типы конструкций шестиногих роботов. По результатам проведенного анализа за основу реализованной конструкции был взят робот АНЗ-R фирмы Lunxmotion [5]. Этот робот имеет шесть ног, каждая из которых имеет три степени свободы, являясь инсектоморфной [6]. Данный робот имеет осесимметричную форму корпуса. Поэтому с учётом особенностей решения задачи в интересах МЧС потребовалась доработка конструкции. Новая конструкция имеет продолговатую форму корпуса, форма ноги осталась прежней. CAD-модели данных ног находятся в открытом доступе на сайте [5]. Произведен анализ базового алгоритма походки робота, в каче-

стве которого был выбран алгоритм «3+3». Разработка конструкции корпуса и сборка всех компонентов проведена в пакете SolidWorks фирмы Dassault Systems.

1. Разработка математической модели движения шестиного шагающего робота

Исполнительные органы проектируемого робота имеют инсектоморфную форму и, соответственно, имеют три звена и три системы координат. Их расположение показано на рис. 1. Исходя из этого, необходимо получить три матрицы преобразования для каждого сочленения. Наиболее простым и эффективным способом для их получения в данной ситуации является представление в математической модели движения шестиного шагающего робота такого механизма в параметрах Денавита-Хартенберга [7]. Исходя из этого представления, кинематическое описание робота можно построить с помощью четырех величин для каждого звена:

- a_i – длина общего перпендикуляра между $i-1$ -м и i -м сочленениями;
- α_i – угол между осями Z i -го и $i-1$ -го сочленений. Данный угол называется углом скручивания;
- d_i – смещение звена;

- θ_i – угол между продолжениями перпендикуляров a_{i-1} и a_i , измеренный вокруг оси i -го сочленения. Является переменным и зависит от угла поворота выходного вала сервопривода.

Используя представление механизма в параметрах Денавита-Хартенберга получены матрицы преобразования для каждого узла машины и построен вектор, описывающий положение конца стопы исполнительных органов относительно центра масс.

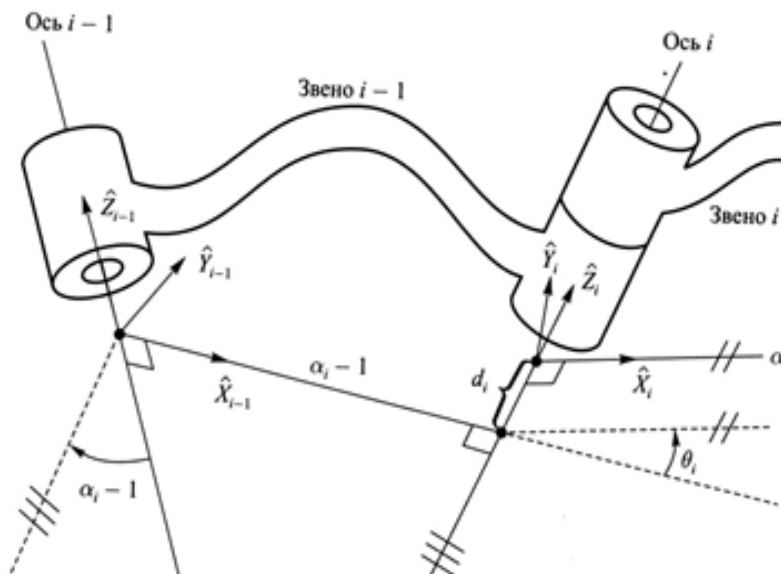


рис. 1 Геометрическое представление параметров Денавита-Хартенберга

На основе выбранного типа конструкции робота с инсектоморфным типом исполнительных органов получено решение прямой задачи кинематики двумя методами: алгебраическим и геометрическим.

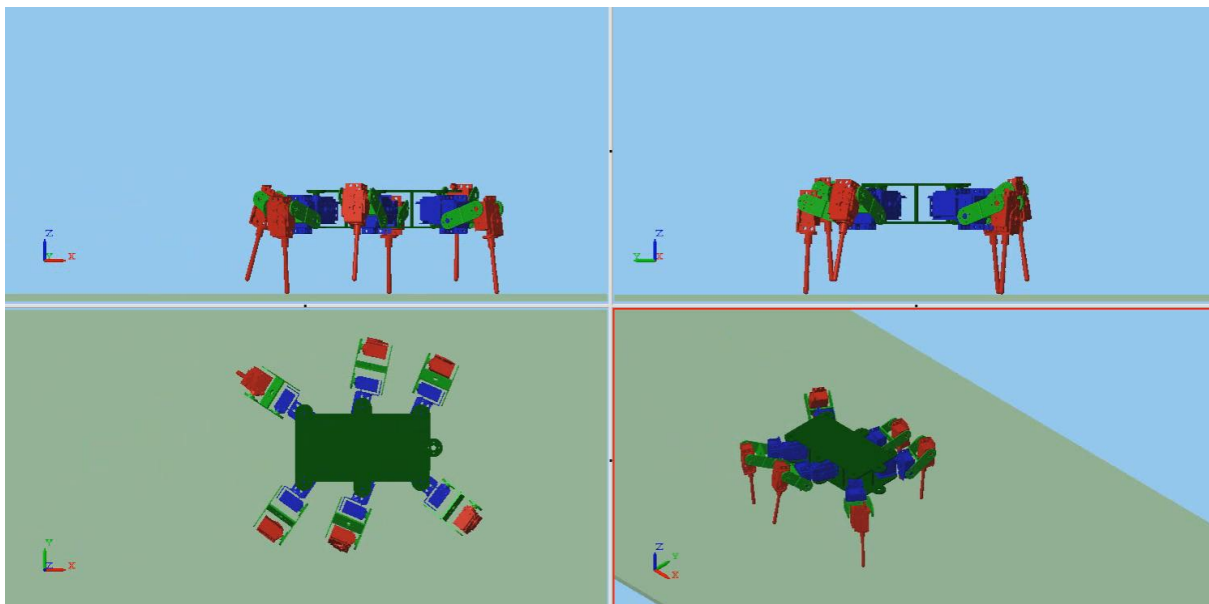


рис. 2 Пример компьютерного представления перемещения шагающего робота

Алгебраический подход заключается в последовательном перемножении матриц, описывающих системы координат. Для определения матрицы связанной системы координат робота $\{B\}$ относительно глобальной $\{G\}$, необходимо иметь данные как о линейных перемещениях X , Y , Z , так и об углах крена, рысканья и тангажа. На рис. 2 представлен

компьютерный кадр разработанного в ходе исследований трёхмерного видеоролика визуального представления перемещения макета шестиногого шагающего робота в заданных системах координат.

В качестве альтернативы существует геометрический метод. Он отличается тем, что пространственная геометрия конечности раскладывается на несколько геометрических задач на плоскости.

Для сравнения описанных выше подходов была разработана модель при помощи пакета Matlab. Проверка правильности разработанных математических моделей производилась при помощи CAD- модели в SolidWorks. Для проверки прямой задачи кинематики задавались одинаковые углы в сочленениях как у CAD-модели, так и у математической модели Simulink, а далее производилось их сравнение.

Для реализации разработанной математической модели в Simulink было применено использование блоков MATLAB Function и использование инструмента SimMechanics 2G.

2. Результаты вычислительного эксперимента

Для проверки результатов описанных выше подходов была разработана модель при помощи пакета Matlab. Производилось сравнение полученных результатов относительно CAD-модели на примере ноги №1. Задавались одинаковые углы в сочленениях как у CAD-модели, так и у математических моделей, а далее производилось их сравнение. Результаты проверок расположены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Проверка модели, решающей прямую задачу кинематики алгебраическим подходом

Углы в сочленениях [град]			Координаты CAD-модели [см]			Ожидаемая позиция [см]			Отклонения [%]		
θ_1	θ_2	θ_3	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0	0	0	0	15.7	-17.07	0	15.65	-17.07	0	0,3	0
10	10	10	-1.62	15.48	-16.07	-1.61	15.4	-16.08	0,62	0,52	0,06
20	20	20	-3.11	14.8	-15.11	-3.10	14.72	-15.11	0,32	0,54	0
30	30	30	-4.34	13.76	-14.21	-4.30	13.70	-14.21	0,92	0,43	0
45	45	45	-5.5	11.75	-13.02	-5.43	11.70	-13.03	1,27	0,42	0,07
-45	-10	-10	6.63	12.87	-18.06	6.60	12.81	-18.06	0,45	0,47	0
-30	-20	-20	4.56	14.14	-19.02	4.51	14.10	-19.03	1,09	0,28	0,05
30	25	25	-4.46	13.98	-14.65	-4.41	13.91	-14.65	1,12	0,5	0
15	35	0	-4.02	21.27	-11.50	-4.01	21.20	-11.54	0,24	0,33	0,34
5	18	27	-0.62	13.40	-15.16	-0.62	13.40	-15.15	0	0	0,07

Таблица 2

Проверка модели, решающей прямую задачу кинематики геометрическим подходом

Углы в сочленениях [град]			Координаты CAD-модели [см]			Ожидаемая позиция [см]			Отклонения [%]		
θ_1	θ_2	θ_3	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0	0	0	0	15.7	-17.07	0	15.66	-17.07	0	0,25	0
10	10	10	-1.62	15.48	-16.07	-1.62	15.4	-16.08	0	0,52	0,06
20	20	20	-3.11	14.8	-15.11	-3.10	14.72	-15.12	0,32	0,54	0,06
30	30	30	-4.34	13.76	-14.21	-4.30	13.70	-14.21	0,92	0,43	0
45	45	45	-5.5	11.75	-13.02	-5.44	11.71	-13.03	1,1	0,3	0,07
-45	-10	-10	6.63	12.87	-18.06	6.60	12.81	-18.06	0,45	0,47	0
-30	-20	-20	4.56	14.14	-19.02	4.51	14.10	-19.02	1,09	0,28	0
30	25	25	-4.46	13.98	-14.65	-4.41	13.91	-14.65	1,12	0,5	0
15	35	0	-4.02	21.27	-11.50	-4.01	21.20	-11.55	0,24	0,33	0,4
5	18	27	-0.62	13.40	-15.16	-0.62	13.41	-15.15	0	0,07	0,07

По результатам проверки видны незначительные отклонения в получившихся значениях координат. Данные отклонения, как видно из таблицы, не являются систематическими и могут быть связаны с отличиями алгоритмов вычисления тригонометрических функций, числа π , а также возможного округления предварительных результатов в программных продуктах SolidWorks и Simulink. При этом, сравнив две таблицы, можно заметить, что результаты вычислений координат конца стопы практически идентичны при обоих подходах. Также следует учесть, что алгебраический подход требует 40 умножений, 17 вычислений тригонометрии и 22 сложения, а геометрический – только 8 умножений, 8 тригонометрических расчетов и 12 сложений.

Таким образом, можно сделать вывод, что геометрический является более предпочтительным для решения задачи в рамках расчета кинематики для шагающего аппарата с инсектоморфным типом конечностей.

Полученные в работе результаты исследований используются для создания разнородных робототехнических комплексов [9-21]. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-04326 офи_м.

Выводы

В ходе работы была построена математическая модель шестиногого шагающего робота, а также реализован базовый алгоритм походки данного робота. На основе вычислительного эксперимента сделан вывод, что геометрический подход является более предпочтительным для решения задачи в рамках расчета кинематики для шагающего аппарата с инсектоморфным типом конечностей. Разработанная математическая модель движения используется для создания алгоритмов управления прототипом шестиногого шагающего робота, предназначенного для МЧС. Работоспособность и эффективность разработанного алгоритмического обеспечения подтверждена экспериментально при управлении лабораторным макетом шагающего робота. Разработка конструкции корпуса робота и сборка всех компонентов производилась в пакете SolidWorks фирмы Dassault Systems.

Литература

1. Алексеев Р.А., Мирошник И.В. Алгоритмы управления движением шагающего робота // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2005. №19. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-upravleniya-dvizheniem-shagayuschego-robota> (дата обращения: 10.11.2016).
2. Михайлов В.В., Соловьева Т.Н., Попов В.П. Моделирование кинематики шагающего робота // Информационно-управляющие системы // Издательство: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург) № 6 (79) 2015 С. 50-56.
3. Павловский В.Е. О разработках шагающих машин // Препринты ИГМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 101. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>.
4. Буданов В.М. Алгоритмы планирования движений шестиногого шагающего аппарата // Фундамент. и прикл. матем., 2005, том 11, выпуск 7. С. 197–206.
5. Lynxmotion Robotic Kits // URL: <http://www.lynxmotion.com>.
6. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Перелазание инсектоморфного робота через свободно катающийся шар // Известия РАН. Теория и системы управления, 2014, № 5. С. 116-125.
7. Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini. Feedback Control of Dynamic Systems, Addison-Wesley, 2010.
8. MathWorks // URL: <http://www.mathworks.com>.
9. Nechaev V., Goncharenko V., Rozhnov A., Lytchev A., Lobanov I. Integration of virtual semantic environments components and generalized Data Envelopment Analysis (DEA) model // CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org): Selected Papers of the XI International Scientific-Practical Conference Modern Information Technologies and IT-Education (SITITO 2016), Moscow, Russia, November 25-26, 2016. – Vol. 1761. – 2016. – P. 339-347.
10. Баранюк В.В., Миняйло Д.В., Смирнова О.С. Планирование действий смешанных робототехнических группировок в условиях «балансирования на грани» // International Journal of Open Information Technologies. 2016, vol. 4, no. 12. С. 16-20.
11. Сигов А.С., Нечаев В.В., Баранюк В.В., Смирнова О.С. Подходы к формированию единого информационно-управляющего поля смешанных робототехнических группировок // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. Т. 12 (№ 1). С. 146-151.
12. Легович Ю.С., Рожнов А.В., Миодушевский П.В. Системная интеграция и ускоренное макетирование смешанной робототехнической группировки на предпроектной стадии жизненного цикла // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2016). (Москва, 17-19 октября 2016 г.): доклады XVI-й международной конференции. Электронное издание на CD-ROM: М.: ИПУ РАН, 2016. URL: <http://lab18.ipu.ru/projects/conference2004.htm>.
13. Методика отображения маршрутов аэробаллистических летательных аппаратов на электронных картах Земли [Текст] / Нечаев В.В., Горченко Л.Д., Гончаренко В.И.; Мос. технол. ун-т (МИРЭА). – М., 2017. – 31 с. – Библиогр.: 84 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ РАН 03.03.2017, № 29-B2017. Аннотированный, библиографический указатель ВИНТИ РАН. Депонированные научные работы. № 3, 2017.
14. Диане С.А.К., Рожнов А.В., Лобанов И.А. Интеграционный компонент для моделирования «самобалансирующей» биоинспирированной робототехнической группировки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663183 РФ; Заяв. 29.11.2016.
15. Гончаренко В.И., Горченко Л.Д. Организация маневрирования аэробаллистических летательных аппаратов в условиях противодействия // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 170-183. DOI: 10.7868/S0002338817030106.
16. Ananov A.V., Goncharenko V.I. Scenario planning of activities of the group of aeronautical robotic engineering complexes in cooperative environments // 2017 Tenth International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD'2017), (Moscow, Russia, 2-4 Oct. 2017). Publisher: IEEE. Date Added to IEEE Xplore: 16 November 2017. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109591. IEEE Xplore Digital Library: URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8109591/>.
17. Abrosimov V., Goncharenko V. [Photofit of Perspective Vehicles: Shape's Synthesis and Flight Parameters Evaluation](#) // Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia – February 18 - 21, 2017. Publisher: ACM. New York, NY, USA. 2017. Pages: 259-263. DOI: [10.1145/3057039.3057093](https://doi.org/10.1145/3057039.3057093). ACM Digital Library: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3057039>.
18. Гончаренко В.И., Лобанов И.А., Кублик Е.И., Губин А.Н. Совершенствование тренажерных комплексов различного назначения посредством реализации интеграционных компонентов виртуальной семантической среды // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2016) (Москва, 17-19 октября 2016 г.): доклады XVI-й международной конференции. Электронное издание на CD-ROM: М.: ИПУ РАН, 2016. URL: <http://lab18.ipu.ru/projects/conference2004.htm>.
19. Сигов А.С., Нечаев В.В., Баранюк В.В., Смирнова О.С. Использование интеллектуального решателя в задачах управления смешанными робототехническими группировками // Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции в 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. - Том. 2. Робототехника и мехатроника (РиМ-2017) С. 317-319.
20. Сигов А.С., Нечаев В.В., Рожнов А.В., Лобанов И.А. Построение версий информационной инфраструктуры с опережением возникновения информационных потребностей управления // Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции в 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет. 2017. Том. 2. С. 112-115.
21. Сигов А.С., Нечаев В.В., Баранюк В.В., Богорадникова А.В. Режимы функционирования интеллектуального решателя при управлении робототехническими группировками // Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции в 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет. 2017. Том. 2. С. 315-317.
22. Абросимов В.К., Гончаренко В.И. Мониторинг чрезвычайной ситуации группой разнотипных беспилотных летательных аппаратов // Научные технологии. 2016. Т. 17. №9. С. 40-48.