

DOI:

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПА ШЕСТИНОГОЙ ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ¹

Данилов В.А.¹, Гончаренко В.И.^{1,2}

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4
fvo@mai.ru

²Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва
ул. Профсоюзная д.65
fvo@mai.ru

Аннотация: Построена математическая модель для действующего макета шестиногого шагающего робота, позволяющая получить визуальное представление об особенностях его перемещения в пространстве при создании алгоритмов управления. На основе вычислительного эксперимента сделан вывод о том, что геометрический метод является более предпочтительным для решения задач кинематики для шагающего робота с инсектоморфным типом конечностей.

Ключевые слова: шестиногий шагающий робот, вычислительный эксперимент, кинематическая модель.

Введение

В настоящее время в мире активно проводятся исследования по созданию машин, передвигающихся с помощью ног. Связано это с тем, что для традиционных транспортных средств большая часть земной поверхности является непроходимой, при этом для людей и животных преодоление пересеченной местности является вполне выполнимой задачей. Для исследования особенностей разработки шагающих машин в настоящей работе проведены исследования по разработке экспериментального шестиногого шагающего аппарата. Выбор такого количества движителей, прежде всего, обусловлен тем, что данная конструкция уже сама по себе является статически устойчивой, а также обеспечивает более высокую грузоподъемность по сравнению с остальными.

В качестве конструкции туловища был выбран продолговатый тип. Данная форма имеет выраженную направленность, благодаря соответствующему креплению ног к корпусу. Она больше приспособлена к движению вдоль продольной оси, а, следовательно, лишена основного недостатка осесимметричной - для движения по прямой необходимо либо увеличивать длину исполнительных органов, либо добавлять дополнительную степень свободы, что вызывает увеличение энергопотребления.

Для исполнительных органов была выбрана инсектоморфная кинематическая схема, так как в 1988 году Фичтер Е.Ф. и Фитчер Б.Л. [1] в результате своих исследований показали, что данная схема является наиболее оптимальной для такого типа машин. Они также доказали, что оптимальная длина бедра – это 78-98% от длины голени. Длина тазобедренной части не имеет очевидной корреляции с длиной голени или бедра.

При разработке шагающей машины за основу был взят робот Trossenrobotics PhantomX. На основании его конструкции была построена 3D-модель робота с помощью САПР SolidWorks с доработками, касающимися возможности упрощения расчёта кинематики конечностей и оптимизации для изготовления комплектующих на 3D-принтере.

Целью исследования является проведение сравнительного анализа двух методов решения прямой задачи кинематики: алгебраического и геометрического для обоснования выбора предпочтительного при создании шагающего робота с инсектоморфным типом конечностей.

1 Прямая задача кинематики

Прямая кинематическая задача заключается в вычислении положения и ориентации рабочих органов робота относительно системы координат несущей платформы, при заданных значениях углов сгиба сочленений [2-10]. На рис. 1 и 2 представлено расположение систем координат основных узлов машины. Для исполнительного органа системы координат были выбраны в соответствии с алгоритмом, предложенным Дж. Крейгом [2] (С.92-95).

¹ Работа подготовлена при поддержке программы президиума РАН подпрограмма № 7.4 (30) "Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации".

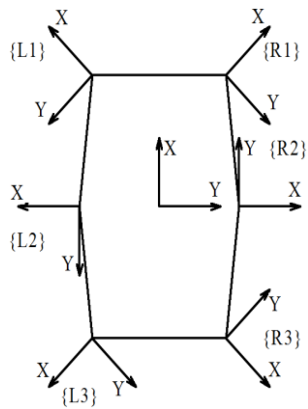


Рис. 1. Расположение систем координат точек крепления

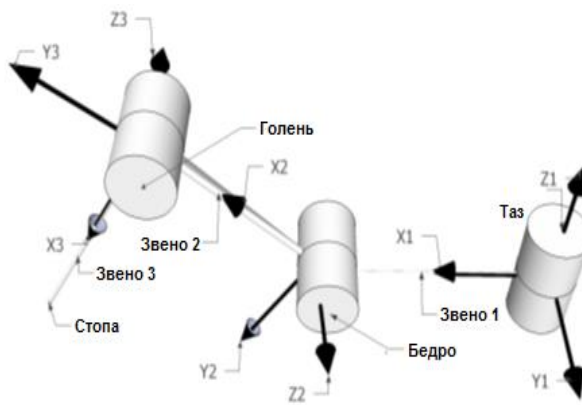


Рис. 2. Расположение систем координат конечности шагающей машины в инсектоморфной кинематической схеме

Существует два подхода для решения прямой задачи кинематики – алгебраический и геометрический. *Алгебраический подход* заключается в последовательном перемножении матриц, описывающих системы координат:

$${}^{B}P = {}^{B}T_{leg} T_1 T_2 T_3 P, \quad \text{где}$$

${}^{B}P$ – радиус-вектор, описывающий расположение конца стопы относительно геометрического центра робота;

${}^{B}T_{leg}$ – матрица, описывающая положение точки крепления ноги относительно геометрического центра тела робота;

${}^{leg}T_1$ – матрица, описывающая положение первого сочленения относительно точки крепления ноги и т.д.

В качестве альтернативы существует *геометрический метод*. Он отличается тем, что пространственная геометрия конечности раскладывается на несколько геометрических задач на плоскости. На рис. 3 и 4 представлены проекции исполнительного механизма на плоскости XZ и XY соответственно. Единственными переменными в этой системе уравнений будут значения углов сервоприводов, зная которые, мы сможем с точностью определить положение исполнительного механизма относительно начала координат.

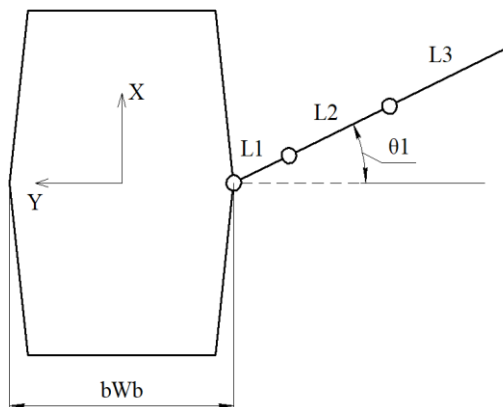


Рис. 3. Проекция исполнительного механизма на плоскость XOY

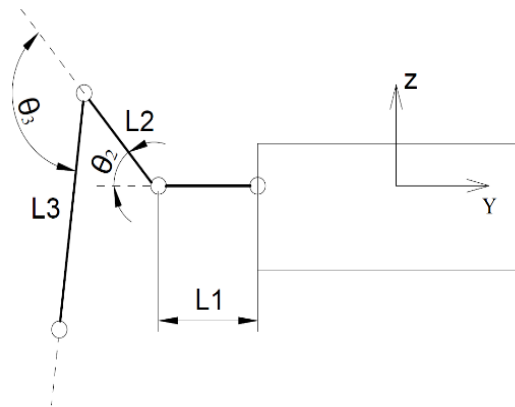


Рис. 4. Проекция исполнительного механизма на плоскость XOZ

В конечном итоге оба метода дают один и тот же результат, но для выбранной кинематической схемы удобнее использовать геометрический подход, так как он требует меньше промежуточных расчётов при получении конечных уравнений. На примере ноги R2 (правая вторая) были опробованы оба метода, выбран геометрический подход и получены следующие уравнения:

$$x = \sin(\theta_1)(L_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) + L_2 \cos(\theta_2) + L_1);$$

$$y = \cos(\theta_1)(-L_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) - L_2 \cos(\theta_2) - L_1) - \frac{bWb}{2};$$

$$z = L_3 \sin(\theta_2 - \theta_3) + L_2 \sin(\theta_2), \text{ где}$$

θ_i – угол сгиба i -го сочленения;

x, y, z – координаты конца стопы относительно геометрического центра тела робота;

L_i – длина i -го звена между сочленениями;

bWb – ширина тела робота.

Для сравнения реализованных методов была разработана модель шагающей машины при помощи пакета Matlab Simulink. Во время исследований задавались одинаковые углы в сочленениях у CAD-модели и математических моделей, а далее производилось сравнение полученных значений. Результаты сравнений, произведенных на примере ноги №1, представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Использование 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

По результатам проверки видны незначительные отклонения в значениях координат. Данные отклонения, как видно из таблиц, не являются систематическими и могут быть связаны с отличающимися алгоритмами 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 расчетов тригонометрических функций и 22 сложения, а геометрический – только 8 умножений, 8 расчетов тригонометрических функций и 10 сложений. Таким образом, можно сделать вывод, что геометрический является более предпочтительным для решения задачи в рамках расчета кинематики для шагающего аппарата с инсектоморфной схемой конечностей.

Таблица 2. Использование 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

2 Обратная задача кинематики

Для решения прямой задачи кинематики, так же как и для обратной, существует несколько методов решения. Двумя основными являются алгебраический и геометрический подходы. Алгебраический заключается в решении матричного уравнения:

$${}^n_0T = {}^{n-1}_0T(\theta_n) * {}^{n-2}_0T(\theta_{n-1}) * \dots * {}^2_0T(\theta_2) * {}^1_0T(\theta_1)$$

относительно θ_i при заданных значениях матрицы n_0T .

В рамках геометрического подхода к решению кинематических уравнений, пространственная геометрия конечности раскладывается на несколько геометрических задач на плоскости [8]. В случаях, когда углы между началами координат в сочленениях равны либо 0, либо ± 90 градусов, обратная задача кинематики решается просто. Необходимо также учесть, что для решения задачи алгебраическим методом, необходимо получение обратных матриц для каждой системы координат, что требует достаточно больших вычислений. Если учесть тот факт, что обратная задача кинематики должна решаться с частотой как минимум 30 Гц [8], то необходимо использовать как можно более быстрый и эффективный алгоритм расчета. Следовательно, при данных условиях, наиболее оптимальным является геометрический метод.

На рис. 5 изображена геометрия ноги при виде сверху.

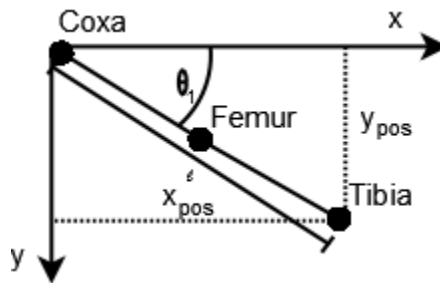


Рис. 5. Геометрия конечности робота на виде сверху, точками обозначены сочленения тазобедренного сустава, бедра и голени

Для перехода от центра масс тела робота к точке крепления ноги используем следующий радиус-вектор:

$${}_{leg}^B P = \begin{pmatrix} -y - \frac{Wb}{2} \\ x \\ z \end{pmatrix}.$$

Используя несложные тригонометрические формулы, найдём угол θ_1 :

$$\theta_1 = \begin{cases} \arctg\left(\frac{{}_{leg}^B P_2}{{}_{leg}^B P_1}\right) + 180^\circ & x = 0 \\ \arctg\left(\frac{{}_{leg}^B P_2}{{}_{leg}^B P_1}\right) & x < 0 \\ \arctg\left(\frac{{}_{leg}^B P_2}{{}_{leg}^B P_1}\right) & x > 0 \end{cases},$$

Далее, для нахождения углов θ_2 и θ_3 необходимо использовать радиус-вектор, локализирующий положение 2-го сочленения ноги относительно геометрического центра тела робота:

$${}^B_3 P = \begin{pmatrix} {}_{leg}^B P_1 \cos(\theta_1) - {}_{leg}^B P_2 \sin(\theta_1) - L_1 \\ {}_{leg}^B P_1 \sin(\theta_1) - {}_{leg}^B P_2 \cos(\theta_1) \\ z \end{pmatrix}.$$

На рис. 6 показано движение ноги по осям XOZ. Из рисунка видно, нога образует два треугольника: первый обозначен зеленым, второй – синим.

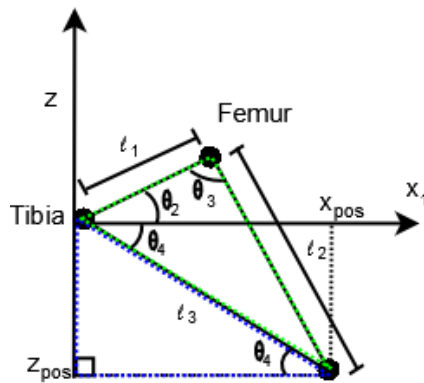


Рис. 6. Изображение геометрии ноги в плоскости XOZ

Решая эту геометрическую задачу, при нахождении θ_2 и θ_3 , получим оставшиеся два уравнения:

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{L_2^2 + {}^B_3P_1^2 + {}^B_3P_3^2 - L_3^2}{2L_2\sqrt{{}^B_3P_1^2 + {}^B_3P_3^2}}\right) - \arctg\left(\frac{|{}^B_3P_3|}{{}^B_3P_1}\right);$$

$$\theta_3 = -\arccos\left(\frac{L_2^2 - {}^B_3P_1^2 - {}^B_3P_3^2 + L_3^2}{2L_2L_3}\right) + \pi.$$

Используя полученные уравнения, в любой момент времени, по заданным координатам концов стоп каждой ноги, можно получить углы поворота выходных валов сервоприводов в сочленениях, чтобы переместить ноги к указанным точкам.

3 Реализация макета робота

Для отработки кинематической схемы и алгоритмов был разработан макет робота, имеющий тело и ногу R2. В качестве центрального вычислительного модуля использован одноплатный компьютер Hardkernel Odroid-C2. Были выбраны сервоприводы Dynamixel AX-12A, так как они имеют цифровой интерфейс обмена, который даёт возможность получать значения отработанного угла поворота выходного вала. Для взаимодействия с приводами использован конвертер Xeve Labs USB2AX. Вычислительный модуль подключается к локальной сети по Wi-Fi, что позволяет получать данные о состоянии системы в реальном времени. Так же имеется возможность подключения по протоколу Bluetooth, благодаря чему управление роботом производится с помощью геймпада Sony Dualshock 4. В качестве операционной системы выбрано Ubuntu Linux, программное обеспечение написано с использованием фреймворка ROS на языках C++ и Python. Весь исходный код располагается по адресу: <https://github.com/yoggi56/hexapod>. Перед отработкой алгоритмов на реальной конструкции использовались пакеты симуляции Rviz и Gazebo. Для графического представления текущего состояния системы используется пакет PlotJuggler (см. рис. 7).

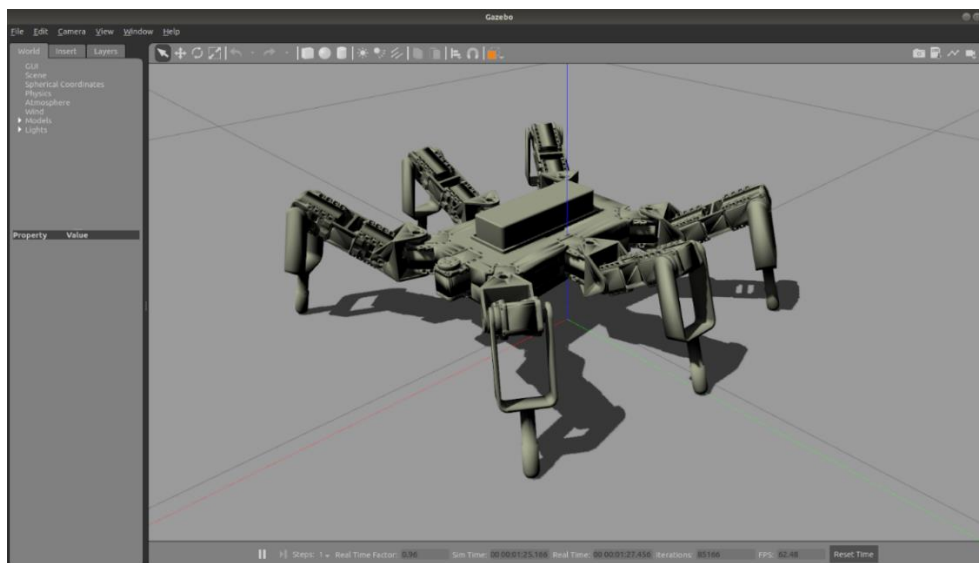


Рис. 7. Скриншот среды моделирования Gazebo в момент симуляции

На рис. 8 показана блок схема взаимодействия основных узлов программы, которые выполняют следующие функции:

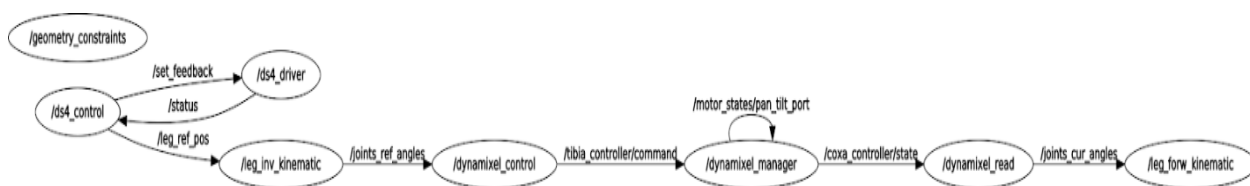


Рис. 8. Блок схема взаимодействия основных узлов программы

ds4_driver – драйвер геймпада, взаимодействует с ним на низком уровне и передаёт все данные в программу управления роботом;

ds4_control – узел обработки данных полученных с геймпада, переключает режимы работы робота и выводит вектор задающих значений координат конца стопы. На данный момент реализованы режимы управления концом стопы при помощи стиков и формирования задающих траекторий окружности и квадрата;

geometry_constraints – сервис, вычисляющий геометрические ограничения робота касательно желаемого положения конца стоп. Вход: массив координат заданных положений конца стоп. Выход: возможно или невозможно использовать данную точку в качестве задающей.

leg_inv_kinematic – узел решения обратной задачи кинематики;

dynamixel_control – принимает на вход данные о задающих углах сгиба сочленений и преобразует к виду, необходимому для передачи на драйвер сервоприводов;

dynamixel_manager – драйвер для взаимодействия с сервоприводами. Осуществляет обмен данными между операционной системой и конвертером USB2AX;

dynamixel_read – читает данные о текущем положении выходных валов электроприводов из драйвера и преобразует в вектор текущих углов сгиба сочленений;

leg_forw_kinematic – узел решения прямой задачи кинематики.

На графиках (см. рис. 9) представлены результаты работы устройства при задающей траектории конца стопы в виде окружности, спроецированной по осям XY. Как можно заметить, отработанная окружность имеет неровности. При монтаже шариковой ручки на конец стопы, был выявлен похожий результат. Это связано с ограничениями самих сервоприводов, так как они имеют погрешность угла $0,29^\circ$, заявленную производителем, а также, судя по графикам на рис. 9, довольно высокое фазовое запаздывание. Тем не менее, полученные результаты показывают работоспособность алгоритмов решения прямой и обратной задачи кинематики на примере одной конечности. Это позволяет перейти к дальнейшему проведению исследований по разработке алгоритмов управления роботом.

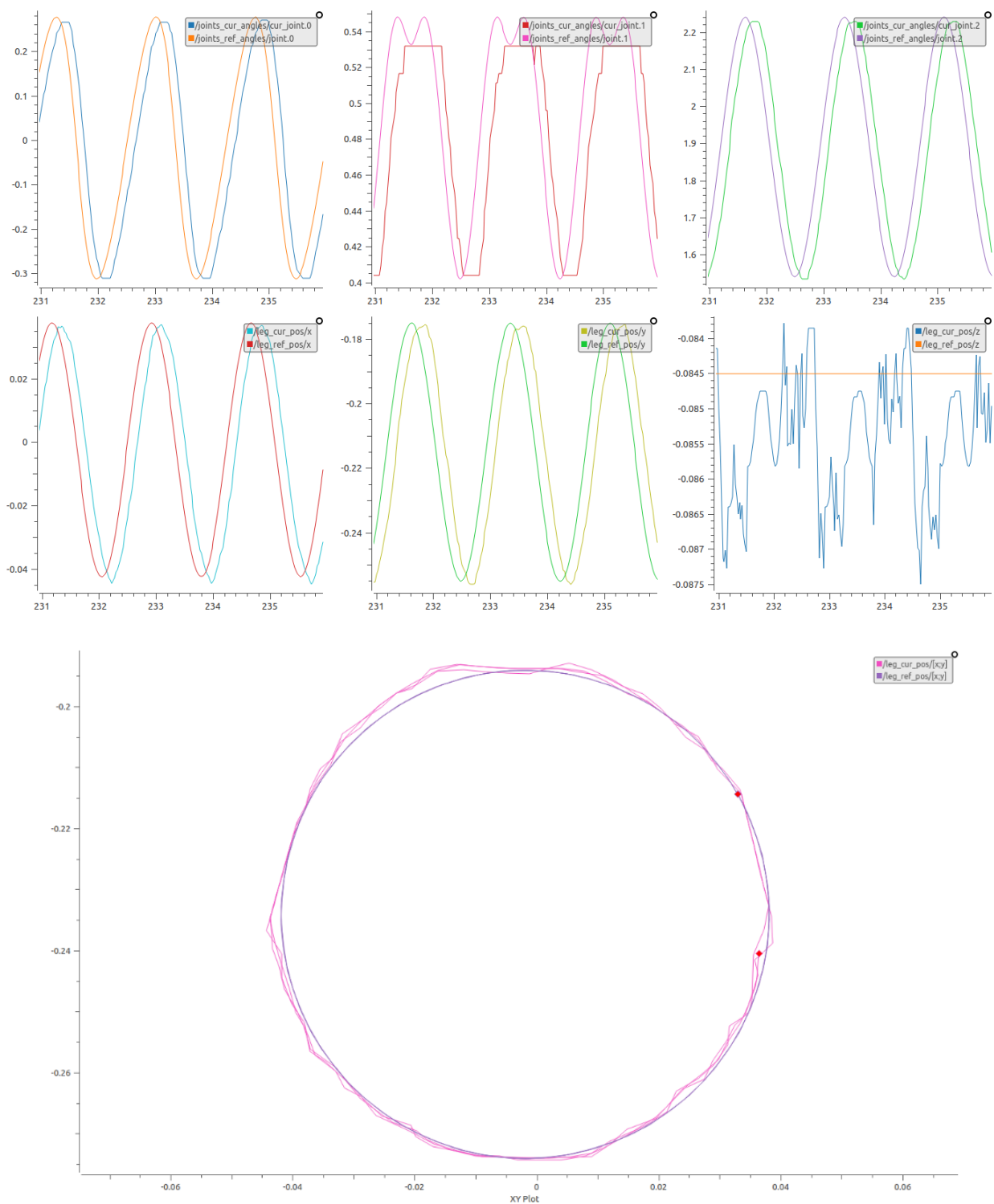


Рис. 9. Результаты работы устройства при задающей траектории в виде окружности

Заключение

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.

Литература

1. *Eugene F. Fitcher, Becky L. Fichter.* A survey of legs of insects and spiders from a kinematic perspective. *Biology, Engineering, Computer Science. Proceedings.* 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1988). DOI:10.1109/ROBOT.1988.12188.
2. *Крейг Д.Дж.* Введение в робототехнику. Механика и управление. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2013. 564 с.
3. *Гаврилов А.Е.* Экспериментальное получение законов движения приводов ноги робота с инсектоморфным движителем // Научные исследования и разработки молодых ученых. 2015. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-poluchenie-zakonov-dvizheniya-privodov-nogi-robota-s-insektomorfnyum-dvizhitelem>.
4. *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>.
5. *Михайлов В.В., Соловьева Т.Н., Попов В.П.* Моделирование кинематики шагающего робота // Информационно-управляющие системы // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. 2015. №6 (79). С. 50-56.
6. *Павловский В.Е.* О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 101. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>.
7. *Буданов В.М.* Алгоритмы планирования движений шестиногого шагающего аппарата // Фундамент. и прикл. матем., 2005, том 11, выпуск 7. С. 197–206.
8. Lynxmotion Robotic Kits // URL: <http://www.lynxmotion.com>.
9. *Голубев Ю.Ф., Корянов В.В.* Перелезание инсектоморфного робота через свободно катающийся шар // Известия РАН. Теория и системы управления, 2014, № 5. С. 116-125.
10. *Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini.* Feedback Control of Dynamic Systems, Addison-Wesley, 2010. MathWorks // URL: <http://www.mathworks.com>.