

Моделирование движения автономной мобильной платформы-инспектора

Безобразова Анна Александровна

НИУ “МЭИ”

Магистрант

Аннотация

Исследуется автономная мобильная платформа-инспектор, предназначенная для обследования систем канализации и трубопроводов иного назначения. Этот внутритрубный робот состоит из четырёхколесной платформы и трёхзвенного манипулятора с видеокамерой, размещённой на последнем звене. Построено программное движение робота-инспектора в ходе обследования им мест потенциальных дефектов трубы, что включало решение для этого робота прямой и обратной задач кинематики; на этапе кинематического анализа использовался аппарат теории винтов. В системе автоматизированного проектирования SolidWorks реализована 3D-модель платформы-инспектора и проведено компьютерное моделирование её движения.

Ключевые слова: канализационная сеть, трубопровод, телеинспекция, внутритрубный робот, манипулятор, программное движение, теория винтов, SolidWorks, компьютерное моделирование

The motion simulation of the autonomous mobile platform-inspector

Bezobrazova Anna Aleksandrovna

NRU “MЭИ”

Graduate

Abstract

An autonomous mobile platform-inspector, designed for examination of sewerage systems and pipelines of other purposes, is being investigated. This in-tube robot consists of a four-wheel platform and a three-link manipulator with a video camera placed on the last link. The program motion of the robot-inspector during the inspection of the places of potential pipe defects was constructed, which included the solution of the direct and inverse kinematics problems for this robot; at the stage of the kinematic analysis the apparatus of the theory of screws was used. In the CAD system SolidWorks a 3D model of the platform-inspector was implemented, and the computer simulation of its motion was carried out.

Keywords: sewerage, pipeline, teleinspection, in-tube robot, manipulator, program motion, theory of screws, SolidWorks, computer simulation

Для поддержания безопасности, экологического благополучия и комфорта жителей городов обязательным условием является стабильная работа систем коммунального водного хозяйства [1,2]. Если прежде наиболее сложные задачи, связанные с эксплуатацией и ремонтом трубопроводных систем, возникали прежде всего по отношению к системам водоснабжения, тепловым и газовым сетям, нефте- и продуктопроводам (для которых характерен напорный характер движения жидкости или газа, а нарушения герметичности быстро приводят к аварийным ситуациям со значительным ущербом для окружающей среды), то в настоящее время всё чаще источниками повышенной опасности выступают трубопроводы систем канализации, где начало разрушения почти не поддаётся наблюдению, а аварийные ситуации могут формироваться годами: утечки первоначально происходят в малом объёме и под небольшим напором [3].

Некондиционность ветхих сетей коммунального водного хозяйства, износ канализационных трубопроводов влекут ряд негативных санитарно-гигиенических последствий, принося значительный экономический и экологический ущерб. В частности, утечки из изношенных трубопроводов ведут к сбросам сточных вод в водоёмы или просачиванию воды в грунт, что вызывает его провалы и просадки, затопление фундаментов зданий и даже их обрушение [4].

В России ситуация осложняется ещё и тем, что эксплуатируемые в настоящее время канализационные сети строились в течение многих десятилетий, так что затраты на их строительство были распределены во времени, а вот проявление негативных последствий обветшания сетей происходит за весьма короткий временной промежуток; в результате значительная часть трубопроводов канализации вышла за пределы расчётных сроков амортизации. В то же время вновь строящиеся сети канализации стали сложнее в технологическом отношении, увеличилась токсичность стоков [3].

В этих условиях важнейшей задачей становится своевременная и квалифицированная диагностика трубопроводов, в частности – с применением телеинспекционных робототехнических систем [5]. Телеинспекция выступает как современная технология, позволяющая оценивать техническое состояние трубопроводов; проведение регулярного телеинспекционного контроля приводит к сокращению числа аварийных ремонтов, более эффективно распределению средств на обслуживание и ремонт трубопроводов, уменьшению объёма земляных работ [2]. Данная технология предполагает визуальный осмотр внутренних поверхностей трубопроводов, при котором применяют средства фото- и видеорегистрации. В результате удаётся выявить наличие различных дефектов (трещин, разрушающихся стыков, участков заиливания и др.) [1].

Телеинспекционные ТВ-роботы для обследования труб обычно снабжены блоками автономного управления, цифровыми видеокамерами и средствами связи. Сигнал с видеокамеры поступает на пост оператора, который вместе с аппаратурой управления роботом размещается в

специальном микроавтобусе. В настоящее время в России при принятии в эксплуатацию трубопроводов канализации применение находят как импортные, так и отечественные ТВ-роботы (последние производит московское предприятие «Тарис») [5].

Среди описанных в литературе внутритрубных роботов по конструкции различаются колёсные, шагающие, гусеничные, змеевидные и другие типы роботов [6].

В частности, в статье [6] рассмотрен четырёхногий шагающий робот, передвигающийся внутри трубы. Разработан метод генерации походок такого робота. Представлены результаты компьютерного моделирования движения данного робота в трубе, имеющей изгибы.

В работах [7,8] объектом исследования был выбран змеевидный робот. Рассмотрены конструкция и комплектация данного робота, изучены его движение и применение при диагностике трубопроводов. Змеевидный шестизвенный робот для обследования внутренней поверхности трубопроводов изучался также в статье [9], где была разработана его математическая модель и проведено компьютерное моделирование его движения при наличии сухого и вязкого трения в шарнирных сочленениях робота.

В работе [10] рассматривался мобильный двухмодульный робот для мониторинга внутренней поверхности трубопроводов. Каждый модуль снабжён шестью контактными элементами (актуаторами), касающимися при движении робота стенок трубы. Было проведено экспериментальное исследование макета данного робота на специальном стенде.

В статьях [11,12] были рассмотрены две конструкции офиуроподобных (с центральной платформой и тремя симметрично расположенными конечностями) роботов, ползающих по гладкой внутренней поверхности трубы эллиптического сечения. Для этих роботов составлены уравнения движения, выбрано управление и проведено компьютерное моделирование движения с помощью пакета Maple.

В работе [13] исследован внутритрубный робот параллельной структуры типа додекапод. Изучены условия проходимости им как прямолинейных труб (постоянного и переменного сечения), так и криволинейных труб. Разработаны алгоритмы перемещения данного робота в трубах указанного типа, создана его 3D-модель в системе SolidWorks.

Ряд публикаций посвящён колёсным внутритрубным роботам для телеинспекции трубопроводов. Так, в статье [14] рассмотрены конструкции двух колёсных минироботов, обладающих высокой манёвренностью и возможностями адаптации к изменению внутреннего диаметра трубы. Приведены некоторые функциональные характеристики этих роботов. В работе [15] представлен шестиколёсный внутритрубный миниробот из трёх адаптируемых модулей, размещённых симметрично по отношению к центральной оси робота, дано описание конструкции и оснащения данного робота. Автономный четырёхколёсный робот для телеинспекции труб

небольшого диаметра рассмотрен в статье [16]. Приведены результаты его натуральных испытаний.

Следует упомянуть также публикации, посвящённые изучению мобильных манипуляторов – колёсных роботов, на платформах которых установлены манипуляторы. В работах [17,18] для мобильного манипулятора KUKA youBot (это – управляемая платформа с размещённым на ней пятизвенным манипулятором) удалось получить точное аналитическое решение обратной задачи кинематики. В статье [19] для этого манипулятора была поставлена и решена задача идентификации параметров, входящих в его математическую модель. Применительно к мобильным манипуляторам отличающейся конструкции в работах [20,21] построена математическая модель и проведено численное моделирование их программного движения.

В настоящей работе в качестве объекта исследования был выбран мобильный четырёхколёсный робот-инспектор, а основной целью явилось компьютерное моделирование движения данного робота. Его прототипами служат автономные портативные системы для видеоинспекции трубопроводов, предлагаемые компаниями Panatec (см. страницу «Robot Inspection Canalisation» на сайте компании, URL: www.panatec.fr/robot-inspection-canalisation.php) и Riezler (см. страницу «Steerable Crawler» на сайте этой компании, URL: <https://www.kuka.com/ru-ru/отрасли/база-данных-решений/2016/07/solution-robotics-enko-staudinger/>).

Исследуемая в работе автономная мобильная платформа-инспектор представляет собой мобильный манипулятор и состоит из четырёхколёсной платформы и установленного на ней трёхзвенного манипулятора, несущего на конце рабочего органа видеокамеру.

Первым этапом исследования стало создание 3D-модели данного робота при помощи пакета трёхмерного моделирования SolidWorks 2016 [22]. Этот пакет является системой автоматизированного проектирования (САПР), которая охватывает все основные этапы конструирования разнообразных изделий – от построения начального эскиза до выпуска конструкторской документации. Считается, что данная система принадлежит к САПР среднего класса [23,24].

Процесс создания модели робота в SolidWorks предусматривает выбор деталей, которые служат составными частями звеньев робота, указание кинематических сочленений между деталями, задание размеров всех звеньев и осей кинематических сочленений, и последующую «сборку» всех звеньев в единую систему твёрдых тел.

Первым шагом стало построение в графической среде SolidWorks моделей для 8 деталей, представляющих собой звенья робота (имеются в виду звенья манипулятора, платформа и четыре колеса). Создание модели робота-инспектора велось методом «снизу вверх». Для каждой детали был построен её эскиз с указанием размеров, после чего из полученного эскиза была создана объёмная фигура, которая была подвергнута окончательной обработке (для колёс было добавлено изображение протекторов шин, для всех звеньев было проведено скругление граней, выбраны цвет и фактура).

Для примера здесь показаны: внешний вид ведомого колеса (рис.1), платформы (рис.2) и рабочего органа (рис.3)

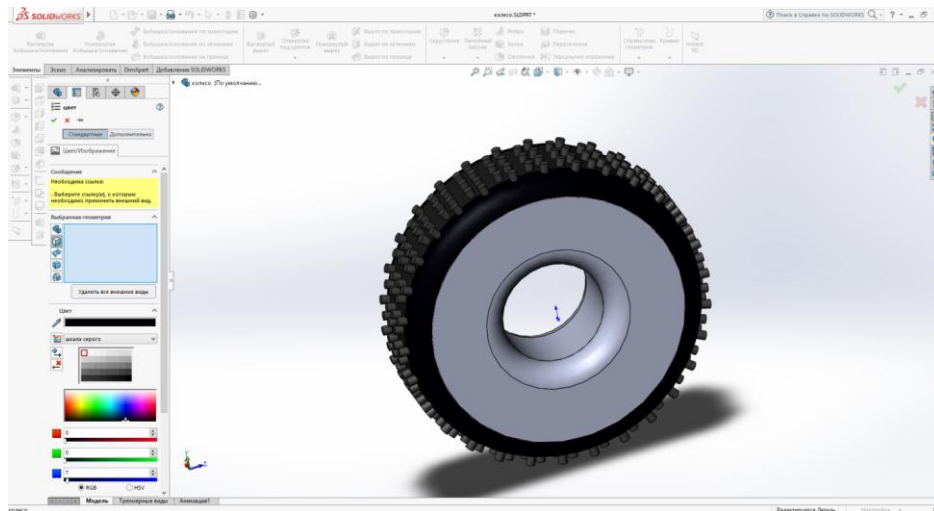


Рисунок 1 — Внешний вид ведомого колеса

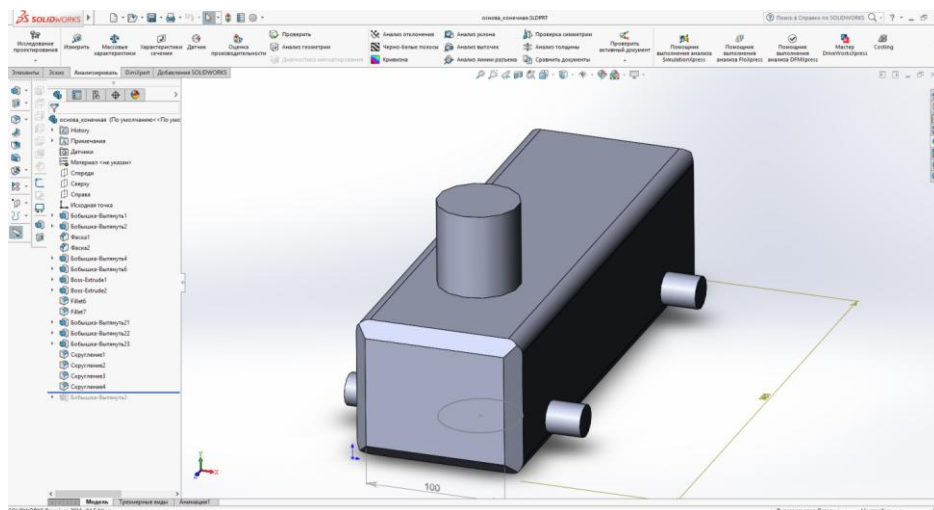


Рисунок 2 — Внешний вид платформы робота

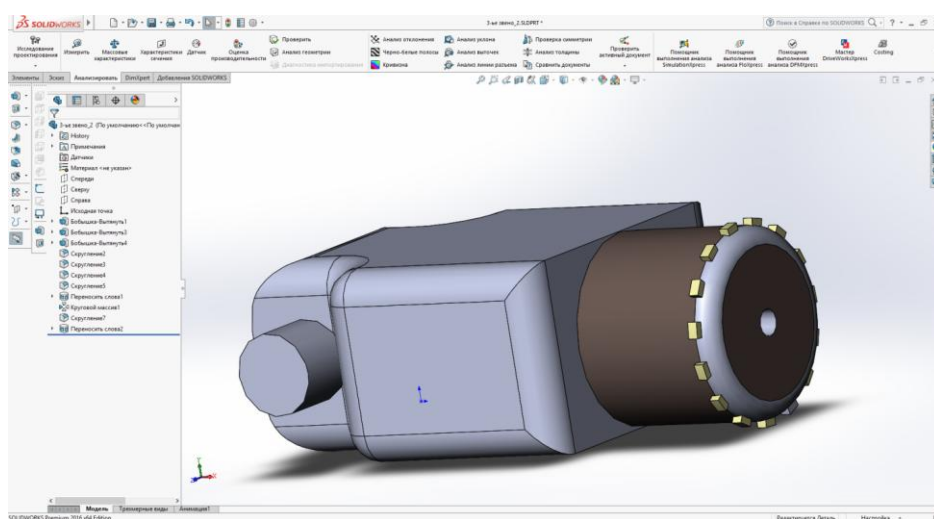


Рисунок 3 — Внешний вид рабочего органа

Затем был проведён процесс сборки: объединение всех звеньев в окончательную модель робота-инспектора. Для задания геометрических взаимосвязей между компонентами сборки был использован механизм *Сопряжение*. На рис.4 представлена готовая 3D-модель автономной мобильной платформы-инспектора.

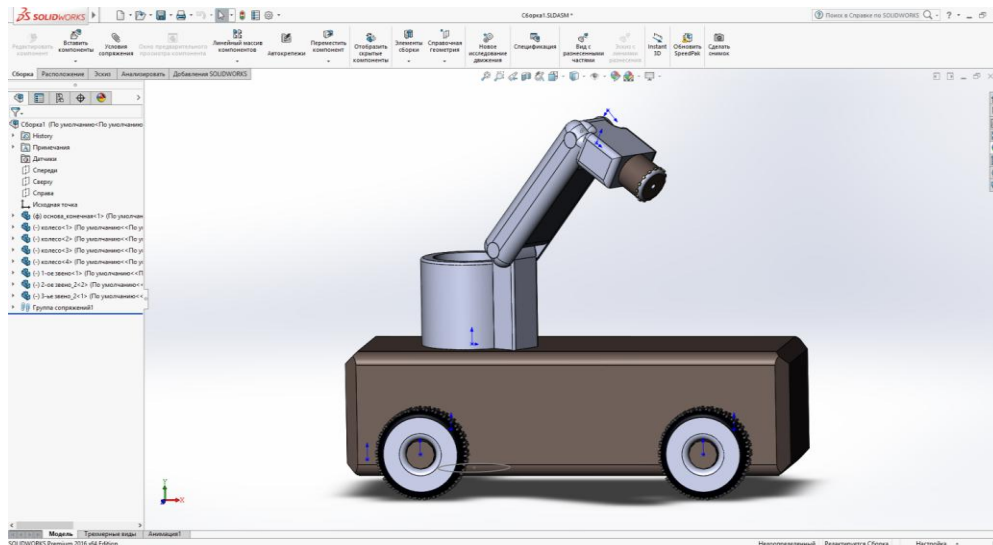


Рисунок 4 — Готовая 3D-модель платформы-инспектора

Приступаем к построению программного движения робота-инспектора. Рассматриваемое здесь программное движение робота состоит из трёх этапов. На первом этапе платформа движется по расположенной в горизонтальной плоскости канализационной трубе, следуя её изгибам, к нужному месту (месту, где может находиться первый потенциальный дефект), а манипулятор остаётся в покое (углы в его сочленениях не изменяются). На втором этапе робот подводит рабочий орган с видеокамерой непосредственно к нужному участку трубы. Третий этап включает обследование участка трубопровода; на нём рабочий орган перемещается вдоль участка внутренней поверхности трубы, несколько отодвинувшись от него, к месту расположения второго потенциального дефекта, к которому видеокамера опять подводится вплотную.

На первом этапе движения происходит решение прямой задачи кинематики, которое выполняется в среде системы компьютерной математики Maple [25]. Для платформы, конфигурацию которой задаём координатами x и y центра её нижнего основания и углом поворота φ , задаём зависимости трёх перечисленных величин от времени t . Предполагаем, что труба имеет форму косинусоиды, а скорость движения плавно возрастает от нуля, а затем – плавно убывает до нуля. Возьмём в условно неподвижной системе координат:

$$x(t) = L * (3 * s^2 - 2 * s^3), \text{ где } s = t/T;$$

$$y(t) = A * \left(1 - \cos\left(\frac{\pi * x}{L}\right)\right);$$

$$\varphi(t) = \text{arctg}(dy/dx).$$

Здесь T – длительность первого этапа движения, а параметры A и L определяют размеры косинусоиды.

Результаты расчёта x , y и φ Maple-программа выводит с постоянным по t шагом во внешние файлы для дальнейшего их импорта в среду SolidWorks. После завершения расчёта полностью определена исходная конфигурация робота к началу второго этапа движения.

На втором и третьем этапах движения решаем обратную задачу кинематики. Будем следовать подходу, использованному в работах [26,27] для решения модельной задачи о роботе-бармене. В этих работах программное движение рабочего органа шестизвенного манипулятора было реализовано в виде последовательности элементарных транспортных операций с получением законов изменения координат в сочленениях, что требовало многократного решения обратной задачи о скоростях и численного интегрирования уравнений кинематики робота.

Данный подход предусматривает, что со всеми звеньями манипулятора связаны системы координат в соответствии с формализмом Денавита – Хартенберга [28,29]. В учебном пособии [29] описана типовая программа **kin_31.c**, служащая для решения задачи о роботе-бармене применительно к лабораторному практикуму по курсу вычислительной механики.

Формализм Денавита – Хартенберга непосредственно применим к механизмам с неподвижными сочленениями. Поэтому введём в рассмотрение три фиктивных звена – с номерами 0 (стойка), 1 и 2 – и будем имитировать движение робота-инспектора движением воображаемого шестизвенного манипулятора, 3-е звено которого соответствует платформе робота-инспектора, а звенья 4,5,6 – звеньям трёхзвенного манипулятора. У этого воображаемого манипулятора 1-е сочленение – вращательное (оно отрабатывает поворот на угол φ вокруг вертикальной оси), а 2-е и 3-е сочленения – поступательные (отрабатывают перемещения по x и y); далее следуют три вращательных сочленения. Порядок следования первых трёх сочленений означает, что значения x и y , выводимые Maple-программой во внешние файлы, должны быть предварительно пересчитаны для повернутых координатных осей, и такой пересчёт в программе предусмотрен.

На основе типовой программы **kin_31.c** для построения программного движения робота-инспектора была путём её доработки создана программа **KIN_RI.c**, также написанная на языке Си и работающая под управлением DOS. Доработка включала добавление операторов, отвечающих за вывод значений координат во всех сочленениях шестизвенного манипулятора во внешние файлы для последующего их импорта в среду SolidWorks.

Программа **KIN_RI.c** на каждом шаге численного интегрирования уравнений кинематики вычисляет текущие значения угловой скорости 6-го звена (она меняется на втором этапе движения робота-инспектора и равна нулю в течение третьего этапа) и решает обратную задачу о скоростях, вычисляя текущие значения скоростей в сочленениях \dot{q}_j .

Сами уравнения кинематики получаются при помощи теории винтов. Они имеют тот же вид, что и в задаче о роботе-бармене:

$$\dot{q} = U_6 \setminus A_K. \quad (1)$$

В уравнениях (1), записанных здесь в матричной форме, q – столбец из координат в сочленениях, U_6 – столбец из компонент кинематического винта 6-го звена, а A_K – это квадратная матрица 6-го порядка. В качестве её столбцов после того, как программа вычислит матрицы верзоров всех подвижных звеньев робота (это делается по рекуррентным формулам геометрии движения [26]) выбираются некоторые столбцы этих матриц (выбор столбца зависит от типа сочленения). Обратная дробная черта в правой части уравнений обозначает операцию левого деления столбца на матрицу (т.е. операцию решения системы линейных алгебраических уравнений).

Значения координат в сочленениях, вычисленные в ходе численного интегрирования программой **KIN_RI.c**, были импортированы в систему SolidWorks (заметим, что в последней есть возможность задавать движение сборки, записывая во внешних файлах значения данных координат в определённые дискретные моменты времени; для этого нужно предусмотреть соответствующую настройку связанных с сочленениями «двигателей»).

После этого построенное программное движение робота-инспектора можно наблюдать на экране компьютера. Такое наблюдение позволяет сделать вывод о правильности построения программного движения: робот проследовал по изгибающейся трубе к месту расположения первого потенциального дефекта, после чего рабочий орган приблизился к данному месту вплотную, а затем перешёл к месту второго потенциального дефекта и вновь вплотную приблизился к нему.

На рис.5 показана исходная конфигурация робота-инспектора, на рис.6 – подведение его рабочего органа к нужному участку стенки трубы, а на рис.6 – конечная конфигурация робота-инспектора.

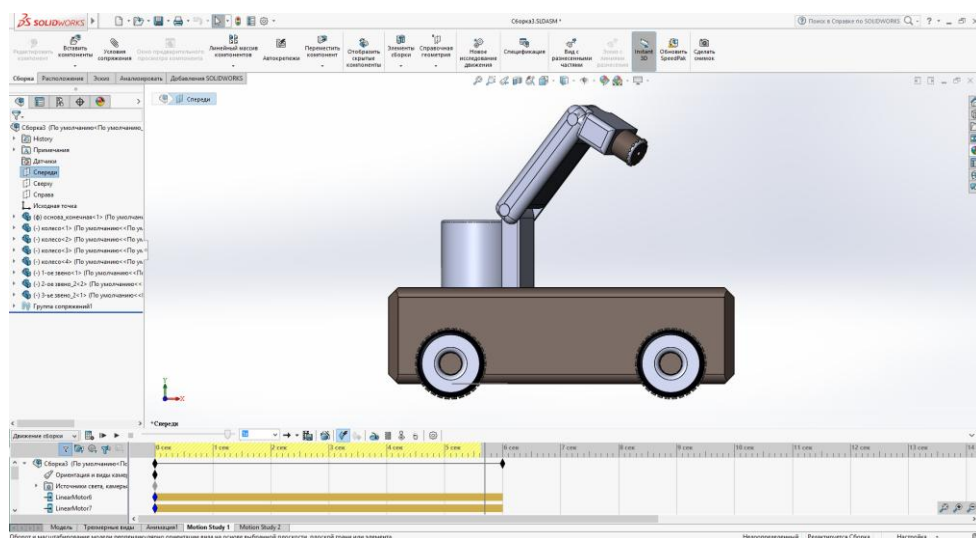


Рисунок 5 — Исходная конфигурация робота-инспектора

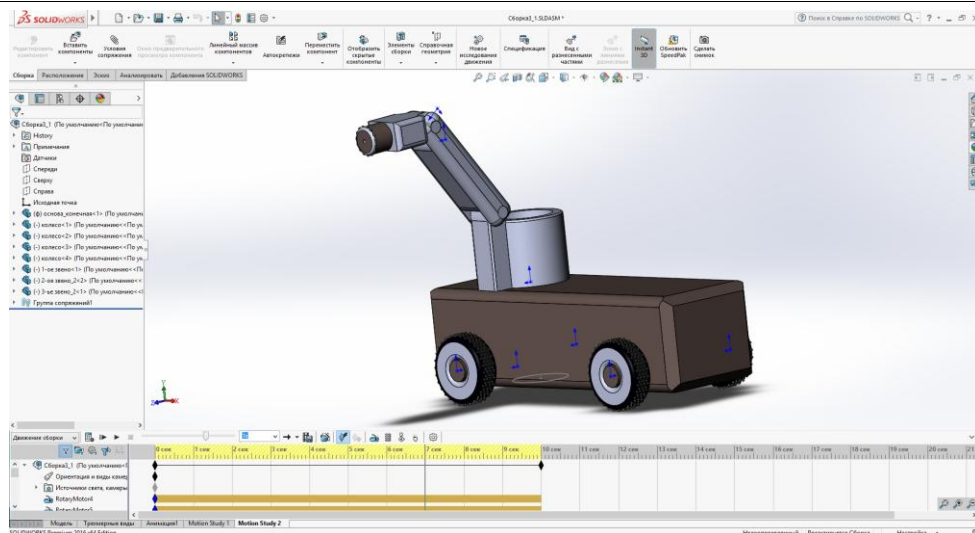


Рисунок 6 — Робот начинает обследование участка трубы

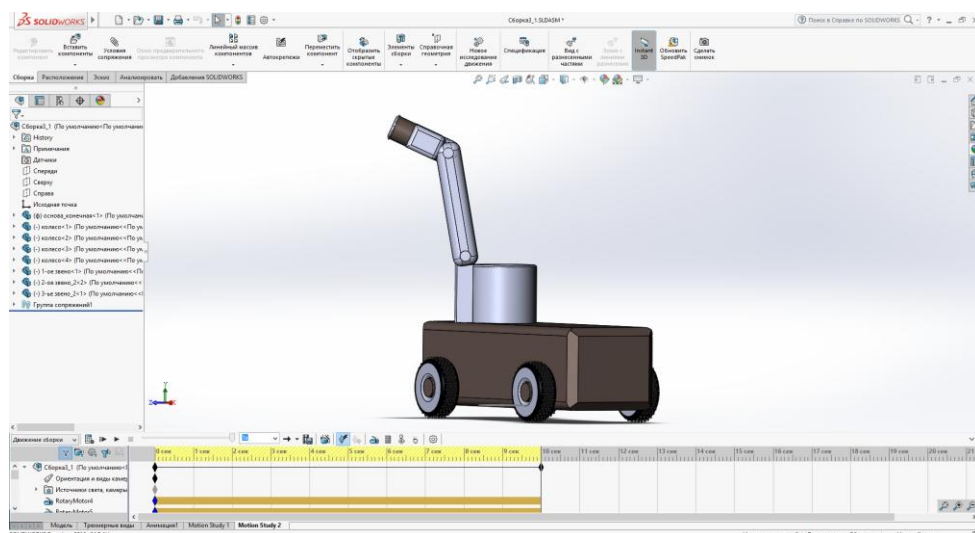


Рисунок 7 — Конфигурация робот после завершения обследования

Библиографический список

1. Лаврентьева Н.М., Гапонова Л.В. Обследование канализационных трубопроводов с использованием методов теледиагностики // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2014. № 16 (21). С. 51–54.
2. Щавелев А.С., Цвилий С.В., Сливенко К.Б. Опыт внедрения систем телеинспекции коллекторов // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 6. С. 82–85.
3. Гальперин Е.М. О техническом обслуживании канализационной сети // Градостроительство и архитектура. 2016. № 3 (24). С. 31–37. doi: 10.17673/Vestnik.2016.03.5
4. Кириченко С.В., Нгуен Куанг Хюи, Шилин А.А., Кириленко А.М. Прогнозирование состояний конструкций коллекторов с целью предотвращения экологической аварии // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2010. № 2. С. 36–

- 40.
5. Бакутин П.М., Ефремов И.А. Системы для телевизионной инспекции трубопроводов // Современное состояние и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы VI Международной научно-практической конференции (Саратов, 9–10 ноября 2017 г.). Саратов: Амирит, 2017. ISBN 978-5-6040341-0-1. С. 41–44.
 6. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Ворочаев А.В. Алгоритм генерации походок для робота, осуществляющего движение в трубопроводах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 1 (22). С. 90–97.
 7. Поезжаева Е.В., Балабанов Д.С., Перевозчикова Н.О. Кинематика бесколёсного змеевидного робота для диагностики трубопроводов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. Т. 1. С. 291–299.
 8. Поезжаева Е.В., Федотов А.Г., Заглядов П.В. Разработка робота для контроля трубопроводов // Молодой учёный. 2015. № 16 (96). С. 218–222.
 9. Мальчиков А.В., Яцун С.Ф., Рублёв С.Б. Исследование движения плоского шестизвённого внутритрубного мобильного робота // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4-5. С. 1263–1265.
 10. Савин С.И., Яцун С.Ф., Рублёв С.Б. Экспериментальные исследования управляемого движения робота с внешними актуаторами для мониторинга трубопроводов малого диаметра // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4-5. С. 1277–1279.
 11. Осадченко Н.В., Абдельрахман А.М.З. Компьютерное моделирование движения мобильного ползающего робота // Вестник МЭИ. 2008. № 5. С. 131–136.
 12. Осадченко Н.В., Абдельрахман А.М.З. Моделирование движения робота, ползающего по гладкой поверхности // Вестник МЭИ. 2010. № 3. С. 28–36.
 13. Данг Суан Хиеп, Карпенко А.П., Саяпин С.Н. Внутритрубный робот параллельной структуры типа додекапод // Экстремальная робототехника. 2016. Т. 1, № -1. С. 330–339.
 14. Tătar M.O., Măndru D., Ardelean I. Development of mobile minirobots for in pipe inspection tasks // *Mechanika*. 2007. Vol. 6, no. 68. P. 60–64.
 15. Tătar M.O., Pop A. Development of an in pipe inspection minirobot // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 147. Article ID 012088. doi: 10.1088/1757-899X/147/1/012088
 16. Abdellatif M., Mohamed H., Hesham M., Abdelmoneim A., Kamal A., Khaled A. Mechatronics design of an autonomous pipe-inspection robot // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 153, no. 1. Article ID 02002. doi: 10.1051/mateconf/201815302002
 17. Капустина О.М. Описание множества точных решений обратной задачи кинематики робота KUKA youBot с помощью обобщённых координат его платформы // *Естественные и технические науки*. 2016. № 12. С. 176–180.

18. Капустина О.М. Аналитическое решение обратной задачи кинематики KUKA youBot, параметризованное обобщёнными координатами его платформы // Экстремальная робототехника. 2017. № 1. С. 42–52.
19. Адамов Б.И., Кобрин А.И. Идентификация параметров математической модели мобильной роботизированной платформы всенаправленного движения KUKA youBot // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 4. С. 251–258. doi: 10.17587/mau.19.251-258
20. Адамов Б.И., Орлов И.В. Управление мобильным манипулятором, работающим в цилиндрической системе координат // Вестник МЭИ. 2012. № 1. С. 28–35.
21. Орлов И.В. Построение математической модели мобильного манипулятора и оценка энергетических затрат при его движении // Вестник МЭИ. 2017. № 1. С. 79–83. doi: 10.24160/1993-6982-2017-1-79-83
22. Гузненков В.Н., Журбенко П.А., Бондарева Т.П. SolidWorks 2016. Трёхмерное моделирование деталей и выполнение электронных чертежей. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 128 с. ISBN 978-5-7038-4763-3.
23. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарёв Н.Б. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с. ISBN 978-5-94157-994-5.
24. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. SolidWorks 2011 на примерах. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 496 с. ISBN 978-5-9775-0690-8.
25. Игнатъев Ю.Г. Математическое моделирование фундаментальных объектов и явлений в системе компьютерной математики Maple. Лекции для школы по математическому моделированию. Казань: Казанский университет, 2014. 298 с. ISBN 978-5-94990010-9.
26. Корецкий А.В., Осадченко Н.В. Метод винтов и решение на ЭВМ задач кинематического анализа манипуляционных роботов // Тезисы докладов международной конференции “Информационные средства и технологии” (Москва, 22–24 октября 1996 г.), т. 2. М.: Изд-во “Станкин”, 1996. С. 48–53.
27. Корецкий А.В., Осадченко Н.В., Погорелов Д.Ю. Практика моделирования робототехнических систем средствами программного комплекса “Универсальный механизм” // Тезисы докладов международной конференции “Информационные средства и технологии” (Москва, 22–24 октября 1996 г.), т. 2. М.: Изд-во “Станкин”, 1996. С. 54–59.
28. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с. ISBN 5-7038-2567-9.
29. Корецкий А.В., Осадченко Н.В. Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 48 с.