

**СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ**

DOI: 10.58168/ROBOTICS2024_6-12

УДК 681.5

**ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ УПРАВЛЕНИИ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ
RATIONALE FOR THE USE OF SIMULATION TOOLS IN CONTROL
OF MANIPULATION ROBOTICS**

Герман Ю.А., магистрант

Лапшина М.Л., д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

marina_lapshina@mail.ru

Herman Yu.A., undergraduate student

Lapshina M.L., DSc (Engineering), Professor

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov"

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: В статье рассматриваются возможности использования средств математического и имитационного моделирования для формирования автоматизированного управления процессом перемещения гидравлического ковшового экскаватора, где в качестве рабочей модели сложной технической системы рассматривается гидросистема экскаваторных машин.

Abstract: The article discusses the possibilities of using mathematical and simulation modeling tools to form automated control of the process of moving a hydraulic bucket excavator, where the hydraulic system of excavator machines is considered as a working model of a complex technical system.

Ключевые слова: модель, манипулятор, механизм, уравнение, система координат

Keywords: model, manipulator, mechanism, equation, coordinate system

Определяющей проблемой робототехники является составление динамических уравнений, которым присуща возможность адаптировать средства компьютерного исчисления. Решение этого вопроса может быть найдено с использованием средств имитационного моделирования на базе оптимальной алгоритмизации динамических характеристик, с учетом дальнейшей эффективности функционирования [1]. Пионерами в этой области были Кейн [2] и Виттенбург [3]. Сформулированные и обоснованные теоретические выкладки этих авторов хорошо адаптируются не только к роботам, но они могут быть использованы и для других технических систем, построенных на основе шарнирно-связанной конфигурации. Позднее, были сформулированы и апробированы алгоритмические подходы к решению динамических уравнений манипуляторов, основой которых являются различные подходы отыскания кинематических и динамических величин, с привлечением разных видов динамических уравнений системы тел. Рукоять ковша экскаватора схожа с человеческой рукой и выполняет схожую функцию (рис. 1). Можно резюмировать, что рука гидравлического ковшевого экскаватора и манипулятор промышленного робота PM-01 (PUMA) аналогичны и математические модели динамики могут быть реализованы посредством одних и тех же уравнений.

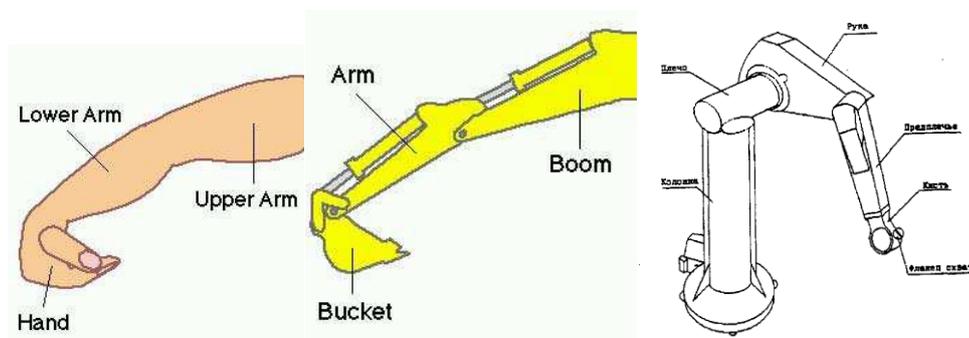


Рисунок 1 – Аналогии промышленного манипулятора и человеческой руки

Рукоять ковша является элементом конструкции одноковшового экскаватора, соединяющим ковш и стрелу, а также обеспечивающий соединение с напорным или подъёмным механизмом, служащим для направленного движения ковша. Различают рукояти однобалочные и двухбалочные, определяющиеся по виду конструкции, они также подразделяются на рукояти изменяемой и неизменяемой длины. Телескопический тип рукоятей может быть применен в конструкциях экскаваторов-погрузчиков. Он что

способствует повышению эффективности технологического процесса таких экскаваторов. Поворотом рукояти позволяет произвести копание. Ось, вокруг которой вращается рукоять, называют осью напорного вала. Длина рукояти определяется массой экскаватора и может быть вычислена эмпирическим путем. Замена ковша на другое оборудование позволяет выполнять другой вид работ, например, захват грейфером или долбление. Движение стрелы в различных направлениях производится 4-звенным механизмом с приводом от 2-х гидроцилиндров. Все действия по подъему и опусканию рукояти тоже происходят с привлечением 4-звенного механизма и единственного гидроцилиндра.

Процедура открывания и закрывания емкостей грейфера происходит с использованием гидроцилиндра посредством двух шатунных механизмов. Построение модели механической подсистемы манипулятора происходит с использованием алгоритмического подхода Денавита-Хартенберга, используемого в кинематике.

Динамические модели динамики были построены на основе методов Ньютона-Эйлера, Эйлера-Лагранжа и Кейна или с использованием программного обеспечения, предназначенного для моделирования многотельных систем.

Вяхя и Скибневским была построена кинематическая модель манипулятора с тремя степенями свободы, сопоставив систему координат с каждым активным сочленением механизма. Койво сформировал кинематическую модель робота, учитывая в ней три степени свободы механизма в вертикальной плоскости. Тут также была рассмотрена модель обратной кинематики шарниров и цилиндров манипулятора. В работах Франкеля, Пателя и Праджапати были представлены модели кинематики экскаватора с обратной лопатой с использованием четырех степеней свободы механизма, а также Франкелем была разработана обратная кинематическая модель гидроцилиндров. Надо отметить, что алгоритм Денавита-Хартенберга хорошо адаптируется для построения кинематических моделей. А это может быть использовано для построения однородных матриц преобразования, посредством которых производятся выполнения преобразования между назначенными системами координат.

Шалиничем, Бошковичем и Николичем была разработана имитационная модель манипулятора гидравлического манипулятора с тремя степенями свободы, применяемый при выемке земли. Авторы воспользовались матрицами

вращения, полученными по формуле Родригеса, для проведения преобразований между системами координат суставов манипулятора. Таким образом, для получения матриц вращения требовалось только направление и направление вращения каждого активного сустава. В работе также была представлена модель обратной кинематики гидроцилиндров манипулятора. Анализ работ, в которых были использованы алгоритм Денавита-Хартенберга, алгоритм Шалинича, Бошковича и Николича, показал, что в последнем можно было получить рекурсию к модели, так как матрицы вращения строятся сразу, что и обуславливает рекурсивность характера построенной модели.

Вяхя и Скибневски также представили модель манипулятора для работ по выемке грунта с тремя степенями свободы, но при формализации и обоснования используемых уравнений движения они воспользовались методом Ньютона-Эйлера. Надо заметить, что некоторые упрощающие гипотезы относительно центров масс звеньев носят нереалистичный характер.

Койвос группой соавторов представили модель манипулятора с тремя степенями свободы, но с учетом всех недостатков, представленные в модели Вяхя и Скибневски. В данной модели были включены усилия, направленные на выемку грунта, а также конвертация крутящего момента двигателя в гидравлические силы. А также, был приведен пример использования модели для синтеза нелинейного регулятора с пропорционально-производным действием (PD). Отметим, что модель, представленная разработанная Койво считается одной из наиболее теоретически описанных, и может быть использована при разработке контроллера манипулятора для автоматической выемки грунта [4].

Франкелем были предложены уравнения динамики манипулятора обратной лопаты с учетом четырех степеней свободы механизма. В основе их был положен метод Эйлера-Лагранжа, здесь, также было реализовано преобразование крутящих моментов двигателя в гидравлические силы. Но эксплуатационные усилия данная модель не учитывает.

Сулейман, Мелини, Видолов представили модель манипулятора экскаватора MECALAC12MXT на основе SimMechanics TM, особенностью данной модели является использование гидроцилиндров в движении как отдельных тел, скрепленных призматическими шарнирами.

В полной аналогии с данной моделью, Янссен и Нивельштейн представили модель 500-тонного гидравлического экскаватора-манипулятора Terex O&K RH 200, разработанной на основе SimMechanics TM (рис. 2).

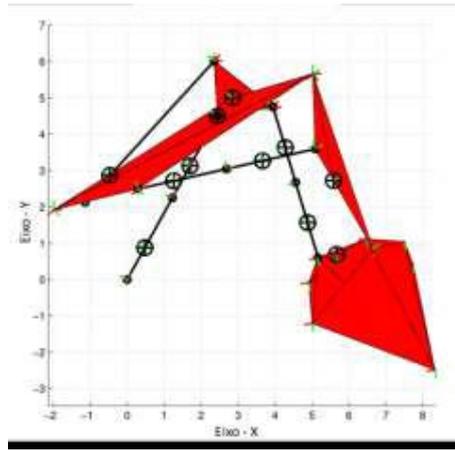


Рисунок 2 – Модель гидравлического экскаватора-манипулятора Terex

Проведем анализ многозвенного робота с шарнирами вращения. Имитационная модель подразумевает привязку звеньев к системе координат, участвующей в вычислении параметров для каждого звена. Дополнительно вводим координаты, устанавливающие направления углов поворота звеньев. Основание манипулятора T_0 свяжем с постоянной системой координат (СК) S_0 и потребуем совпадения хотя бы одной из осей с осью первого поворота e_{rot1} , а точку координатного начала совместим с центром первого шарнира, т.е. с точкой O_1 (рис. 3).

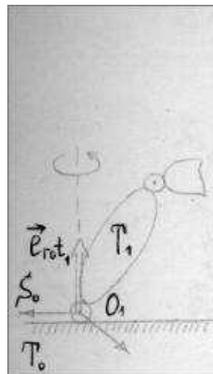


Рисунок 3 – Схематическое представление манипулятора

Затем сформируем координатную систему S_1 , связанную с первым звеном T_1 , начало которой поместим в центр первого шарнира. Одну из координатных осей S_1 расположим параллельно оси первого поворота. Если ось второго поворота $e_{rot2} \parallel e_{rot1}$, то направления 2-х остальных координатных осей возьмем с учетом расположения звена [5]. Если, $e_{rot2} \perp e_{rot1}$, то одну из осей в плоскости, перпендикулярной e_{rot1} , расположим параллельно e_{rot2} , а третья

координатная ось дополнит выбранные две до правой ортогональной тройки. То есть, как СК S_0 и S_1 , так и СК S_1 и S_2 имеют одну координатную ось с общим направлением, определяемым для S_0 и S_1 вектором e_{rot1} , а для S_1 и S_2 - вектором e_{rot2} . Поэтому, матрицы перехода от S_0 к S_1 и от S_1 к S_2 , служат матрицами поворотов относительно соответствующих координатных осей: $C_i = \{C_x, C_y, C_z\}$, где C_x, C_y, C_z являются матрицами поворотов относительно соответствующих осей x, y и z . Аналогично опишем системы координат S_2, S_3, \dots, S_n остальных звеньев робота. Для чего зададим направления отсчета координат q_1, \dots, q_n , введем вектора e_0, q_i, T_{i-1} и $e_{rot1}q_iT_i$. Матрица $G = 1 \times n$ соответствует ориентации СК схвата относительно основной СК S_0 . Шалиничем, Бошковичем и Николичем была разработана имитационная модель манипулятора гидравлического манипулятора с тремя степенями свободы, применяемый при выемке земли.

Авторы воспользовались матрицами вращения, полученными по формуле Родригеса, для проведения преобразований между системами координат суставов манипулятора. Таким образом, для получения матриц вращения требовалось только направление и направление вращения каждого активного сустава. В работе также была представлена модель обратной кинематики гидроцилиндров манипулятора. Анализ работ, в которых были использованы алгоритм Денавита-Хартенберга, алгоритм Шалинича, Бошковича и Николича, показал, что в последнем можно было получить рекурсию к модели, так как матрицы вращения строятся сразу, что и обуславливает рекурсивность характера построенной модели.

Вяхя и Скибневски также представили модель манипулятора для работ по выемке грунта с тремя степенями свободы, но при формализации и обоснования используемых уравнений движения они воспользовались методом Ньютона-Эйлера. Надо заметить, что некоторые упрощающие гипотезы относительно центров масс звеньев носят нереалистичный характер.

Койвос группой соавторов представили модель манипулятора с тремя степенями свободы, но с учетом всех недостатков, представленные в модели Вяхя и Скибневски. В данной модели были включены усилия, направленные на выемку грунта, а также конвертация крутящего момента двигателя в гидравлические силы. А также, был приведен пример использования модели для синтеза нелинейного регулятора с пропорционально-производным действием (PD). Отметим, что модель, представленная разработанная Койво

считается одной из наиболее теоретически описанных, и может быть использована при разработке контроллера манипулятора для автоматической выемки грунта. Вычислительное быстродействие алгоритма достигается благодаря программной реализации геометрических нюансов и учета масс конкретных роботов.

Список литературы

1. Фу К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли - М.: Мир, 2019. - 332 с. – ISBN 5-03-000805-5.
2. Kane T. Dynamics / T. Kane –New York, Holt, Rinehart and Wiston, 2018.- 335 p. – ISBN 10. 0030711606.
3. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел / Й. Виттенбург. - М.: Мир, 2020. – 289 с.
4. Denavit J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J. Denavit, R.S. Hartenberg // J. Appl. Mech., 95. - 1995, - P.P. 215-221.
5. Вукобратович М. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами /М. Вукобратович, Д. Стокич, Н. Кирчански. - М.: Мир, 1989. – 372 с.
6. Накано Э. Введение в робототехнику /Э. Накано - М.: Мир, 2018. - 275 с. – ISBN 5-03-000396-7.

References

1. Fu K. Robotics / K. Fu, R. Gonzalez, K. Li - M.: Mir, 2019. - 332 p. – ISBN 5-03-000805-5.
2. Kane T. Dynamics / T. Kane –New York, Holt, Rinehart and Wiston, 2018.- 335 p. – ISBN 10. 0030711606.
3. Wittenburg J. Dynamics of systems of solid bodies / J. Wittenburg. - M.: Mir, 2020. – 289 p.
4. Denavit J. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J. Denavit, R.S. Hartenberg // J. Appl. Mech., 95. - 1995, - P.P. 215-221.
5. Vukobratovich M. Non-adaptive and adaptive control of manipulation robots /M. Vukobratovic, D. Stokic, N. Kirchanski. - M.: Mir, 1989. – 372 p.
6. Nakano E. Introduction to robotics /E. Nakano - M.: Mir, 2018. - 275 p. – ISBN 5-03-000396-7.