

В. А. Карташев, проф., вед. науч. сотр., kart@list.ru,
В. В. Карташев, мл. науч. сотр., vsevolod.kartashev@gmail.com,
А. А. Кириленко, аспирант, artemkirilenko@yandex.ru,
ФИЦ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва

Имитационное моделирование динамики сборочного механизма

Описывается метод имитационного моделирования, который основан на представлении узлов механизма в виде геометрических тел. Движение системы тел вычисляется с использованием принципа виртуальных перемещений Лагранжа.

Приводятся результаты применения метода для исследования зависимости результата выполнения сборочной операции вставки цилиндрического вала в отверстие от их размеров и начального положения. Использование комплекса программного имитационного моделирования существенно уменьшает трудоемкость такого исследования. По сравнению с существующими программными средствами достоверность имитационного моделирования выше, так как оно не связано условием неизменности кинематической схемы и допускает динамические изменения в составе контактирующих тел.

При моделировании получены все сценарии взаимного положения вала и отверстия в процессе сборки. Результаты моделирования показывают, что для механизмов, включающих несколько кинематических пар, вычислительной мощности персонального компьютера достаточно для выполнения всех вычислений в масштабе реального времени.

Ключевые слова: численное имитационное моделирование, автоматическая сборка, манипуляционный робот, автоматическое сборочное устройство

Введение

Одним из способов исследования работы сложных машин является программное моделирование динамики движения их узлов [1–3]. При численном моделировании определяются силы и моменты, которые действуют между основными элементами конструкции, находятся оценки энергетических характеристик машин, разрабатываются наилучшие способы управления машинами и роботами [4–6].

К настоящему времени моделирование движения роботов стало одним из направлений робототехники. С 2010 г. прошли пять конференций SIMPAR (Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots), посвященных моделированию, макетированию и программированию автономных роботов [7].

Наиболее популярными универсальными программными системами для исследования динамики машин и механизмов являются MathCAD Simulink [8] и "Универсальный механизм" [9].

Программный комплекс "Универсальный механизм" предназначен для компьютерного моделирования динамики технических систем абсолютно твердых связанных тел [10, 11]. Движение тел вычисляется путем численного решения дифференциальных уравнений, которые выводятся автоматически при описании пользователем механической системы. Комплекс в состоянии рассчитывать динамику достаточ-

но сложных систем, содержащих несколько сотен тел [12], например, моделировать движение колесных и гусеничных роботов в реальном масштабе времени [13].

Как "Универсальный механизм", так и MathCAD Simulink используют составленное пользователем формализованное представление механизма в виде системы тел и кинематических пар, которое автоматически преобразуется в систему уравнений Лагранжа второго рода. Движение формализованной системы, силы и моменты, действующие между телами и внешней средой, получаются путем численного интегрирования уравнений динамики.

Принципиальным ограничением в применении таких систем является условие, что состав точек контакта в процессе моделирования не меняется. Следует заметить, что в большинстве механизмов это условие не выполняется в силу того, что между их составными узлами имеются зазоры. Представление механизма в виде формализованной кинематической схемы не учитывает взаимную подвижность кинематических пар, наличие зазоров, люфтов, отклонений форм отверстий в пределах допусков и т.д.

Для механизмов, качество работы которых зависит от особенностей взаимодействия поверхностей его составных частей, использование перечисленных выше систем моделирования приводит к существенному увеличению трудоемкости исследования.

Отмеченных недостатков лишены системы имитационного моделирования, в которых движение механизма рассматривается как результат взаимодействия тел, из которых он составлен. Примером таких систем являются так называемые "физические движки", задачей которых является построение движения систем механических тел в реальном масштабе времени.

Наибольшее распространение среди них получил PhysX — кросс-платформенный пакет программ компании nVidia, предназначенный для разработчиков игр [14]. Он включает в себя модули моделирования физических явлений, включая динамику движения твердых тел, выявление их столкновений и совместного движения систем, объединенных общими связями.

Пакет программ моделирования физических явлений Bullet Physics [15] представляет собой развитие физического движка Havok. Он является свободно распространяемым программным продуктом, что способствует его популярности среди разработчиков игр.

Модуль моделирования динамики движения системы тел рассчитывает взаимные столкновения таких фигур, поверхность которых задана сферой, параллелепипедом, цилиндром, конусом. Поддерживается также возможность определения точек столкновений тел, поверхность которых задана триангуляционной сеткой. Для обнаружения столкновений между такими телами используется алгоритм Гилберта—Джонсона—Кирти в силу того, что он предъявляет минимальные требования к представлению геометрических данных об объектах. Это свойство позволяет уменьшить время получения информации о составе контактирующих тел при большом числе объектов и динамическом изменении их состава.

Наиболее популярным средством твердотельного программного моделирования робототехнических систем в различных приложениях является пакет Open Dynamics Engine (ODE) [16, 17]. Он позволяет моделировать движение локомоторных и манипуляционных роботов с учетом задержек управления, наличия переходных процессов в степенях подвижности и трения в суставах. Пакет поддерживает такие геометрические примитивы, как параллелепипед (box), сфера, цилиндр, капсула (цилиндр, накрытый полусферой) и представление поверхности в виде поля высот.

Box2D [18] является физическим движком реального времени и предназначен для работы

с двумерными физическими объектами в виде выпуклых многоугольников, окружностей и линий. Тела могут быть связаны в кинематические пары и могут подвергаться действию разных физических сил, таких как гравитация и трение. Допускаются столкновения тел, моделируется ударное взаимодействие между ними.

Возможности "физических движков" ориентированы на моделирование движения тел под действием внешних сил и сил, действующих в точках контакта со средой. Учитываются геометрические ограничения и столкновения тел друг с другом. Моделируемые объекты являются выпуклыми. Их поверхность составлена из плоскостей и поверхностей второго порядка. В некоторых движках поддерживаются поверхности, задаваемые триангуляционной сеткой.

Ограниченный набор базовых поверхностей тел и ограничение точности триангуляционного представления поверхности обусловлены основной парадигмой "физических движков" — необходимостью обеспечить расчеты в реальном масштабе времени даже в ущерб точности моделирования. Эти особенности ограничивают использование "физических движков" для моделирования сложных взаимодействий деталей в механизмах, так как при этом требуется высокая степень достоверности и точности вычисления траектории движения.

Исследование сборочной операции вставления вала в отверстие

Рассмотрим пример применения имитационного моделирования для исследования операции вставления манипулятором вала в отверстие детали. Его цель состоит в определении зависимости результата выполнения операции от начального положения деталей и их геометрических размеров (рис. 1).

На выходном звене манипуляционного робота 1 находится схват 2. В нем зажат вал 3, который вставляется в корпусную деталь 4. Сборка осуществляется опусканием манипулятора вниз. P_z — сборочное усилие, которое оказывает манипулятор, A — точка, в которой поверхность вала касается отверстия. Начало системы координат совпадает с центром выходного звена манипулятора. Ось OX направлена в горизонтальном направлении, ось OZ — вертикально вниз. Ось OY образует с ними правую тройку.

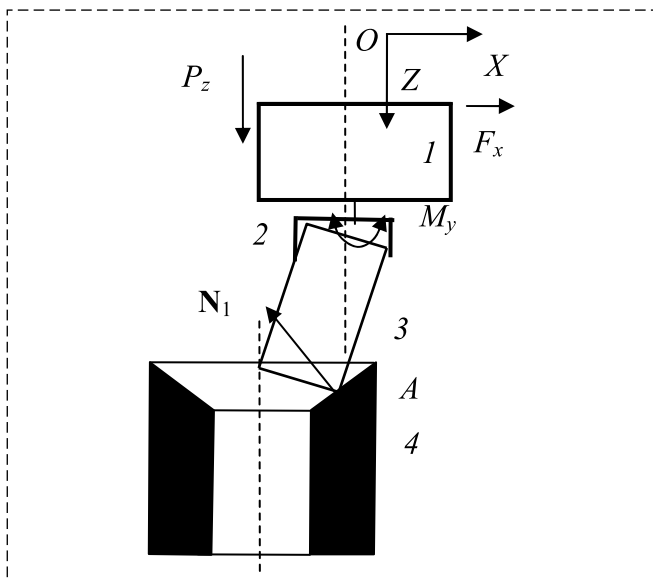


Рис. 1
Fig. 1

Начальные положения оси вала и оси отверстия не совпадают. В процессе сборки вал скользит по фаске до тех пор, пока не попадет в отверстие. В процессе опускания ось вала смещается в направлении оси отверстия в силу отклонения выходного звена манипулятора от начального положения и наклоняется за счет небольшого раскрытия губок схвата.

Следящая система препятствует смещению выходного звена. Возвращающая сила F_x пропорциональна смещению относительно положения, которое звено занимало перед началом сборки:

$$F_x = -kd,$$

где k — коэффициент пропорциональности, который часто называют коэффициентом жесткости следящей системы; d — смещение. Чем больше k , тем большее усилие требуется для того, чтобы сдвинуть манипулятор относительно заданной точки позиционирования.

При наклонении оси вала в губках возникает восстанавливающий момент M_y , который задается формулой

$$M_y = -\kappa\alpha,$$

где κ — постоянный коэффициент; α — угол наклона оси вала относительно вертикальной оси OZ .

N_1 обозначает вектор силы реакции опоры, которая возникает при касании вала поверхности отверстия. При попадании вала в отверстие он может касаться его поверхности в двух

точках. В этом случае движению вала препятствуют силы реакции N_1 и N_2 .

Уравнения квазистатики механической системы включают уравнение для активных сил и сил реакции связей:

$$\mathbf{P} + \mathbf{F} + \sum_{i=1}^n \mathbf{N}_i = 0, \quad F_x = -kd \quad (1)$$

и уравнения их моментов:

$$\mathbf{M}_P + \mathbf{M}_F + \mathbf{M} + \sum_{i=1}^n \mathbf{M}_i = 0, \quad M_y = -\kappa\alpha. \quad (2)$$

Здесь n — число точек контакта вала с поверхностью отверстия; $\mathbf{P}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{N}_i$ — векторы сборочного усилия, возвращающей силы и сил реакции опоры; $\mathbf{M}_P$, $\mathbf{M}_F$, $\mathbf{M}_i$, $\mathbf{M}$ — векторы моментов сборочного усилия, возвращающей силы, сил реакции связей и восстанавливающего момента.

Координаты точек вала, контактирующие с поверхностью отверстия, удовлетворяют уравнениям соответствующих поверхностей:

$$S_i(x_i, y_i) = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где (x_i, y_i) — координаты i -й точки контакта.

Следует также учесть, что собственные координаты вала в пространстве, которые задаются положением его центра масс x_c, y_c и углом поворота оси относительно вертикали α , связаны с координатами точек контакта (x_i, y_i) нелинейной зависимостью:

$$G_i(x_i, y_i, x_c, y_c, \alpha) = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Решением системы уравнений (1)–(4) являются положение вала в пространстве в собственных координатах x_c, y_c, α , сборочное усилие P_z , возвращающая сила F_x , восстанавливающий момент M_y и силы реакции связей N_i .

Уравнения (3) и (4) являются нелинейными относительно собственных координат вала, поэтому решение системы уравнений, в которую они входят, осуществляется итерационным методом минимизации невязок.

На каждом шаге моделирования определяются точки соприкосновения поверхностей вала и отверстия, затем они используются для автоматического составления системы уравнений (1)–(4).

Итерационная процедура поиска решения затрачивает значительные вычислительные ресурсы моделирующей ЭВМ. Тем не менее, для рассматриваемой модели сборочной опе-

рации вычислительная мощность персонального компьютера с одноядерным процессором оказывается достаточной для выполнения расчетов в масштабе реального времени.

Моделирование позволяет получить интервал изменения значения сборочного усилия P_z и допустимого начального отклонения осей вала и отверстия, при которых обеспечивается успешное выполнение сборочной операции для заданной жесткости следящей системы и подвижности вала в губках схвата.

Сборочные операции вставления деталей, которые имеют сопрягаемую поверхность в виде цилиндра, достаточно широко распространены как в автоматической, так и роботизированной сборке. Различие в них состоит в том, что в автоматических системах успешное завершение операции достигается за счет механических свойств элементов конструкции, в то время как в роботизированной сборке широко используются возможности адаптивного управления.

Примером такого устройства является автомат для вставления вала в отверстие корпусной детали, схема которого изображена на рис. 2. Он состоит из основания (1), линейного привода (2), ползуна (3), шарнира (4), удерживающего устройства (5) при вставлении вала (6) в корпусную деталь (7), пружин (8) и (9).

Сборка соединения осуществляется вертикальным движением линейного привода 2

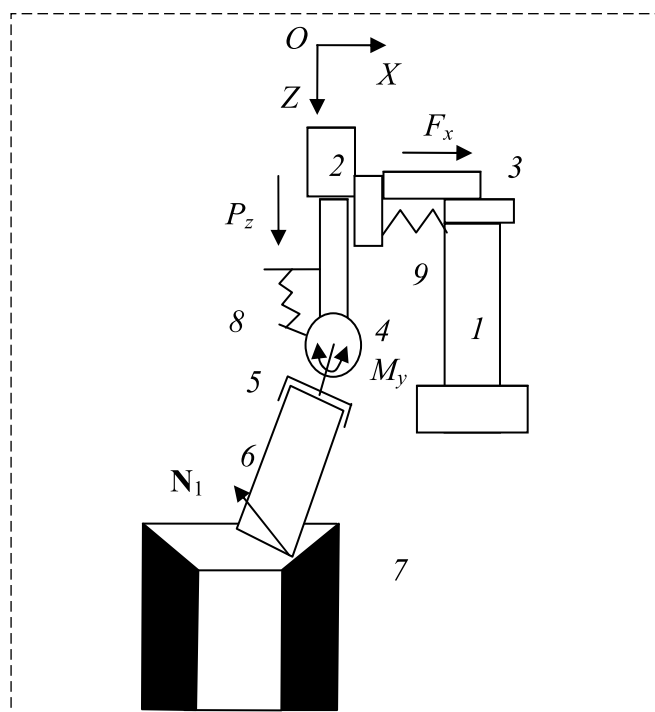


Рис. 2
Fig. 2

вниз. Адаптивность выполнения сборочной операции к начальному смещению оси вала и ее наклону сборки обеспечивается двумя пружинами 8 и 9. От того, насколько удачно выбрана их упругость, зависит значение допустимого начального отклонения осей вставляемой детали и отверстия.

С этой целью конструкторы выполняют аналитические исследования работы механизма. Численная модель устройства позволяет упростить процедуру поиска приемлемого решения.

Моделирование операции вставления вала в отверстие

Рассмотрим применение системы имитационного моделирования для исследования зависимости результата сборочной операции от взаимного положения вала и отверстия перед началом сборки, геометрических размеров вала и отверстия, жесткости следящей системы и силы сжатия губок.

В модели предполагается, что отверстие втулки снабжено фаской. В начальном положении оси вала и отверстия параллельны и могут быть смещены друг относительно друга.

В процессе моделирования на экран дисплея выводится видеоизображение перемещения вала относительно отверстия втулки и графики зависимости сборочного усилия P_z (рис. 3, б — 6, б), возвращающей силы F_x (рис. 3, в — 6, в) и восстанавливающего момента M_y (рис. 3, г — 6, г) в зависимости от высоты u положения схвата манипулятора.

Соответствующий выбор значений перечисленных выше параметров позволил получить все четыре возможные финальные конфигурации взаимного положения вала и отверстия. Они представлены на рис. 3, а — 6, а. Заметим, что во всех случаях использовался единый моделирующий алгоритм.

Рис. 3 соответствует успешному выполнению операции. В финальной конфигурации вал касается отверстия в двух точках. Этот случай получен при значениях коэффициентов k и κ , соизмеримых по порядку величины и начальном отклонении оси вала от отверстия, немногом большим, чем зазор между ними.

Рис. 4 также соответствует успешному выполнению операции. В отличие от предыдущего случая в финальной конфигурации вал касается отверстия в одной точке. Это проис-

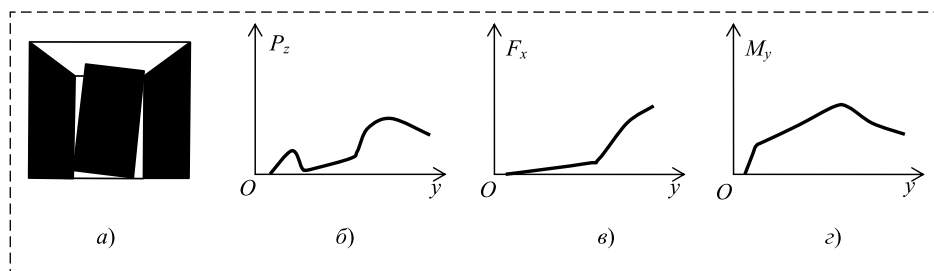


Рис. 3
Fig. 3

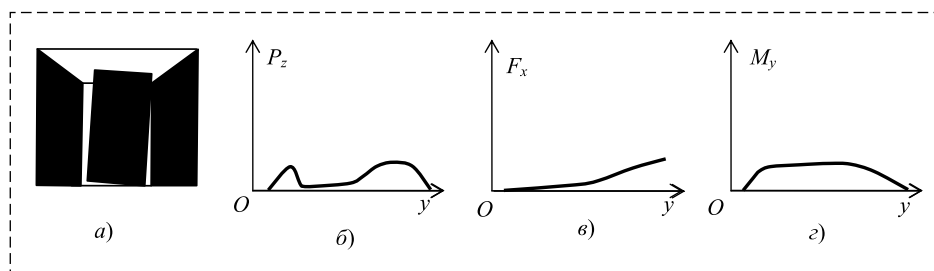


Рис. 4
Fig. 4

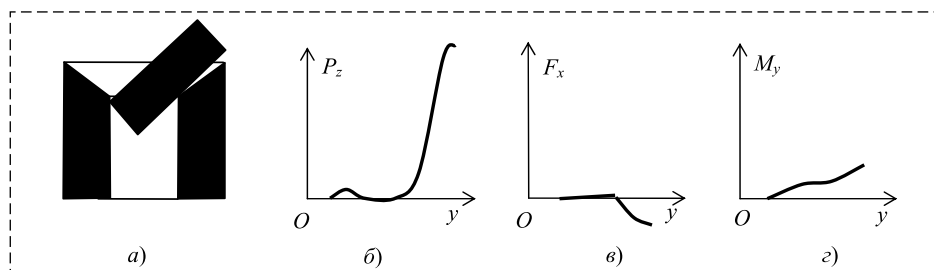


Рис. 5
Fig. 5

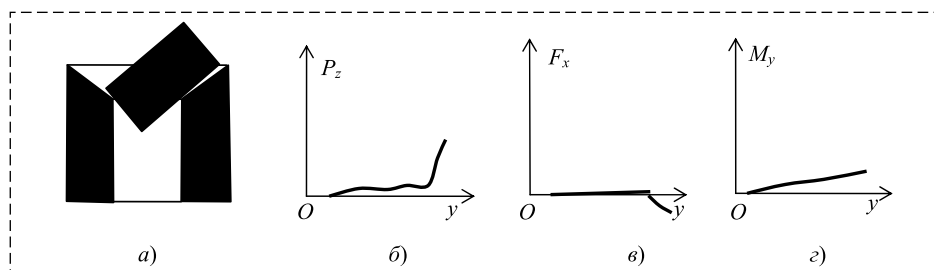


Рис. 6
Fig. 6

ходит при достаточно большом заглублении вала, если k мало и k велико.

На рис. 5 представлен случай, в котором вал первоначально попадает в отверстие, но затем выскакивает из него. В заключительной фазе операции левая нижняя вершина вала движется вверх и выходит из контакта с поверхностью отверстия. Этот случай получен при малой величине k по сравнению с величиной k и начальном отклонении оси вала от оси отверстия, существенно большем зазора.

В случае, представленном на рис. 6, вал не попадает в отверстие и скользит нижней гранью по фаске. Для того, чтобы рассматриваемый случай реализовался, достаточно, чтобы выполнялось условие $k \ll k$, и начальное отклонение оси вала от оси отверстия было на порядок больше зазора.

При проектировании операций манипуляционной сборки и конструировании адаптивных сборочных устройств случаи, в которых вал не попадает в отверстие (рис. 5 и 6), не рассматриваются. Условия, при которых вал попадает в отверстие, достаточно хорошо исследованы аналитически и численно в предположении малых начальных отклонений осей [18, 19].

Однако с увеличением начального отклонения сложность аналитического решения быстро возрастает в силу того, что положение вала в пространстве описывается нелинейными функциями, и ошибки от замены их линейными приближениями соизмеримы со значениями начальных отклонений. Для исследования таких задач большую роль начинают играть методы численного имитационного моделирования.

Заключение

Программное имитационное моделирование существенно уменьшает трудоемкость исследования зависимости движения механизма от изменения значений параметров в широких интервалах их изменений. По сравнению с существующими программными системами достоверность имитационного моделирования выше, так как оно не связано условием неизменности кинематической схемы и допускает

динамические изменения в составе контактирующих тел. Результаты моделирования показывают, что для механизмов, включающих несколько кинематических пар, вычислительной мощности персонального компьютера достаточно для выполнения всех вычислений в масштабе реального времени.

Список литературы

1. Краснощеченко В. И. Разработка и исследование математической модели гибкого однозвенного манипулятора с использованием принципа наименьшего действия Гамильтона // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 6. С. 383–390. DOI: 10.17587/mau.18.383-390.
2. Васильев А. В. Разработка компьютерной динамической модели и исследование прямолинейного движения транспортной системы малогабаритного мобильного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 5. DOI: 10.17587/mau.19.312-326. С. 312–326.
3. Колесниченко Е. Ю., Павловский В. Е., Орлов И. А., Алисейчик А. П., Грибков Д. А., Подопрасветов А. В. Математическая модель робота на омни-колесах, расположенных в вершинах прямоугольного треугольника // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 5. С. 327–330. DOI: 10.17587/mau.19.327-330.
4. Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Силовое взаимодействие мобильного нагруженного робота с грунтом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 12. С. 819–824. DOI: 10.17587/mau.18.819-824.
5. Градецкий В. Г., Чашухин В. Г. Исследование динамики миниатюрных внутритрубных роботов вибрационного типа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 6. С. 396–401. DOI: 10.17587/mau.19.396-401.
6. Тачков А. А., Калиниченко С. В., Малыхин А. Ю. Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономного робота вертикального перемещения с вакуумными захватами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 3. С. 178–187.
7. 2018 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR).

Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2018. 191 p.

8. Дьяков В. П. Simulink: Самоучитель // ДМК-Пресс, 2013. 784 с.
9. Погорелов Д. Ю. Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса "Универсальный механизм" // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. Т. 10, № 4. С. 27–34.
10. Pogorelov D. Y. Numerical modelling of the motion of systems of solids // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1995. V. 35, I. 4.
11. Погорелов Д. Ю. О численных методах моделирования движения систем твердых тел // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1995. № 4. С. 501–506.
12. Погорелов Д. Ю. Алгоритмы моделирования динамики систем тел с большим числом степеней свободы // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Общая и прикладная механика. 2011. № 4 (2). С. 278–279.
13. Ковалев Р. В., Михеев Г. В., Погорелов Д. Ю., Агапов Д. Г. Моделирование динамики колесных и гусеничных роботов в реальном времени с использованием программного комплекса "Универсальный механизм" // Вопросы оборонной техники. Серия 16. С.-Петербург. Научно-производственное объединение специальных материалов. 2010. № 9-10. С. 69–74.
14. Kumar K. Learning Physics Modeling with PhysX. Packt Publishing, 2013. 104 p.
15. Dickinson C. Learning Game Physics with Bullet Physics and OpenGL. Packt Publishing, 2013. 250 p.
16. Drumwright E., Hsu J., Koenig N.P., Shell D. Extending Open Dynamics Engine for Robotics Simulation. International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots SIMPAR-2010 // Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2010. Vol. 6472. P. 38–50.
17. Surhone L., Tennoe M., Henssonow S. Open Dynamics Engine. Betascript Publishing, 2011. 108 p.
18. Miller F., Vandome A., McBrewster J. Box2D. Alphascript Publishing, 2011. 92 p.
19. Бедрин В. М., Бедрина А. В. Обзор методов и устройств автоматического ориентирования деталей при сборке // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2000. № 2. С. 7–21.
20. Vartanov M., Martynovich N. Reliability for the Robotic Assembly of Cylindrical Parts. International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2016 // Procedia Engineering. 2016. 150. P. 376–383.

Numerical Imitation Simulation of Assembly Mechanism Dynamics

V. A. Kartashev, kart@list.ru, V. V. Kartashev, vsevolod.kartashev@gmail.com,

A. A. Kirilenko, artemkirilenko@yandex.ru,

FRC Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS, Moscow, 125047, Russian Federation

Corresponding author: Kartashev Vladimir A., Full Professor, Doctor of Math., Leading Research Fellow,
FRC Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS, 125047, Moscow, Russian Federation,
e-mail: kart@list.ru

Accepted on September 08, 2020

Abstract

Numerical simulation is widespread method to investigate machines and robotic mechanisms in different applications. Program complexes such as MATHLAB Simulink and similar ones are based on the assumption that mechanism kinematics can be described by kinematic scheme and it does not change on time interval of simulation. This is used to generate equations of dynamics automatically and then calculate the mechanism motion. Formulated assumption does not take place

for numerous applications cause a set of contact points between mechanism parts is not permanent. This circumstance restricts application area of simulation method and accuracy of investigations. "Physical drives" are software systems for motion simulation of interacting bodies in real time. This restricts the complicity of dynamics model that are used in simulation. The paper describes the simulation method in which mechanism is represented as mechanical system of geometrical bodies. Their motion is defined by Lagrange virtual movement principle. Simulation algorithm generates equations automatically when all contact points between mechanism parts and with external environment are found. Simulation program has been used to investigate the motion of cylindrical shaft in assembly operation. It has become all scenarios of shaft motion relatively hole. Each of them is defined by initial position of shaft and hole and also mechanical features of assembly device units or features of assembly manipulator servo control system. Simulation algorithm calculates assembly force, forces and moments are acted in mechanism and between mating surfaces. Developed simulation program can be used for choosing of constructive parameters and defining acceptable deviation in initial shaft position.

Keywords: numerical imitation simulation, automatic assembly, manipulation robot, automatic assembly device

For citation

Kartashev V. A., Kartashev V. V., Kirilenko A. A. Numerical Imitation Simulation of Assembly Mechanism Dynamics, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 35–41.

DOI: 10.17587/mau.22.35-41

References

1. **Krasnoshchechenko V. I.** Development and Investigation of the Mathematical Model of a Flexible Single-Link Manipulator with the Use of the Hamilton's Principle, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 383–390 (in Russian).
2. **Vasiliev A. V.** Development of Computer Dynamic Model and the Study of Motion of Small Mobile Robot Transport System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 5, pp. 312–326 (in Russian).
3. **Kolesnichenko E. Y., Pavlovsky V. E., Orlov I. A., Aliseychik A. P., Gribkov D. A., Podoprosvetov A. V.** Mathematical Model of a Robot with Omni-Wheels Located at the Vertices of the Right Triangle *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 5, pp. 327–330 (in Russian).
4. **Gradetskiy V. G., Ermolov I. L., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N.** Force Interaction between Soil and Loaded UGV, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 819–824 (in Russian).
5. **Gradetsky V. G., Chashchukhin V. G.** Studying the Dynamics of Miniature in-Pipe Vibration Type Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 6, pp. 396–401 (in Russian).
6. **Tachkov A. A., Kalinichenko S. V., Malykhin A. J.** Simulation and Evaluation of the Adhesion System Effectiveness for a Miniature Mobile Wall-Climbing Robot with Suction Cups, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 178–186 (in Russian).
7. **2018 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR).** Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2018, 191 p.
8. **Dykov V. P.** Simulink: Tutorial, DMK-Press, 2013, 784 p. (in Russian).
9. **Pogorelov D. Yu.** Numerical simulation of technical system dynamics by program complex "Universal mechanism", *Vestnik komputernykh i informacionnykh tehnologiy*, 2005, vol. 10, no. 4, pp. 27–34 (in Russian).
10. **Pogorelov D. Yu.** Numerical modelling of the motion of systems of solids, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1995, vol. 35, iss. 4.
11. **Pogorelov D. Yu.** About numerical methods to simulate solid bodies systems, *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*, 1995, no. 4, pp. 501–506 (in Russian).
12. **Pogorelov D. Yu.** Algorithms to simulate dynamics of mechanical system with a large number degrees of freedom, *Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta imeni N. I. Lobachevskogo. General and applied mechanics*, 2011, no. 4 (2), pp. 278–279 (in Russian).
13. **Kovalev R. V., Miheev G. V., Pogorelov D. Yu., Agapov D. G.** Simulation of wheel and crawler robots dynamics in real time by software complex Universal mechanism, *Nauchno-proizvodstvennoe objedinienie specialnykh materialov*, 2010, no. 9–10, pp. 69–74 (in Russian).
14. **Kumar K.** Learning Physics Modeling with PhysX, Packt Publishing, 2013, 104 p.
15. **Dickinson C.** Learning Game Physics with Bullet Physics and OpenGL, Packt Publishing, 2013, 250 p.
16. **Drumwright E., Hsu J., Koenig N. P., Shell D.** Extending Open Dynamics Engine for Robotics Simulation. International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots SIMPAR-2010, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2010, vol. 6472, pp. 38–50.
17. **Surhone L., Tennoe M., Henssonow S.** Open Dynamics Engine, Betascript Publishing, 2011, 108 p.
18. **Miller F., Vandome A., McBrewhster J.** Box2D, Alphascript Publishing, 2011, 92 p.
19. **Bedrin V. M., Bedrina A. V.** Review of methods and devices for automatic orientation parts in assembly, *Sborka v mashinostroenii i priborostroenii*, 2000, no. 2, pp. 7–21 (in Russian).
20. **Vartanov M., Martynovich N.** Reliability for the Robotic Assembly of Cylindrical Parts. International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2016, *Procedia Engineering*, 2016, 150, pp. 376–383.