

УДК 378

DOI 10.25688/2072-9014.2020.51.1.12

**М. А. Патрин,
П. В. Полушкин,
И. С. Григорьев**

О движении манипулятора

В статье рассмотрены некоторые существующие манипуляторы и проводится сравнение их с рукой человека. Также рассматривается построение уровней движения и описаны проблемы программирования движений манипуляторов.

Ключевые слова: манипулятор; уровни построения движений; механика; биомеханика; программирование; кинематика.

Программирование движений манипулятора и непосредственно схвата кисти — сложный процесс, требующий от инженера знаний не только программирования, но и естественных наук, таких как физика и биология, а также математических знаний: математического анализа, дифференциальных уравнений, математической физики, геометрии и топологии. Наряду с этими знаниями необходимо иметь представления о еще одной науке из ряда естественно-научных дисциплин — биомеханике. Одной из основных задач биомеханики, является изучение свойств и функций опорно-двигательного аппарата человека и его двигательных действий, рассматриваемых с позиции механики [1].

На данный момент существует огромное количество манипуляторов. Роботами данного класса являются описанные, например, в работе [10] и представленные на специализированных сайтах¹.

Робот от компании Festo² наиболее похож на человеческую руку. Одна из наиболее интересных его возможностей — самостоятельное обучение по методу проб и ошибок: на основе получаемых при работе данных рука оптимизирует свои действия до тех пор, пока задача не будет решена успешно.

Следующим весьма характерным для исследуемого вопроса будет робот-манипулятор от компании Dobot³. Это многофункциональный робот с возможностью самообучения. Данный робот может использоваться не только как манипулятор, но и как 3D-принтер или устройство для лазерной гравировки, с его помощью можно даже рисовать.

¹ uArm Educational Kit. URL: <https://clck.ru/Je9SJ> (дата обращения: 21.08.2019).

² BionicSoftHand. Pneumatic robot hand with artificial intelligence. URL: <https://www.festo.com/group/en/cms/13508.htm> (дата обращения: 21.08.2019).

³ DOBOT Magician. URL: <https://www.dobot.cc/dobot-magician/product-overview.html> (дата обращения: 21.08.2019).

В анализ включим еще один робот, который также является манипулятором, но предназначен для имитации конвейерных линий.

Рассматривая движения представленных манипуляторов, можно провести аналогию с движением руки человека. С точки зрения биомеханики движения руки-манипулятора и движения руки человека схожи и для одного и того же действия требуются примерно одинаковые группы приводов [5].

Н. А. Бернштейн, исследуя движения человека, выяснил, что в зависимости от того, какую информацию получает мозг, можно классифицировать то или иное движение. Таким образом, были выделены уровни построения движений, при этом надо понимать, что эти уровни в буквальном смысле означают процессы, происходящие в нервной системе. В связи с этим каждый уровень имеет свои собственные специфичные моторные проявления и каждому уровню соответствует свой класс движений [4].

Первый уровень движений — бессознательный, то есть движения, относящиеся к данному уровню, происходят без участия мыслительной деятельности человека. Данный уровень — это поддержание тонуса мышц, способствующее организации движения человека вместе с остальными уровнями. Также на этом уровне регистрируются сигналы от чувствительных рецепторов, которые передают информацию о степени загруженности мышц и органов поддержания равновесия.

При рассмотрении данного уровня с точки зрения манипулятора можно заметить, что он как таковой отсутствует, то есть при отсутствии мышц, соответственно, отсутствует и их тонус, но это предположение будет не совсем верным. В случае механических устройств данный уровень можно представить как целостность механизмов, ответственных за движения, то есть если это пневматика или гидравлика, то это будет целостность трубок с воздухом или жидкостью.

На втором уровне обрабатываются сигналы от мышечно-суставных рецепторов, которые передают информацию о положении частей тела, то есть в мозг передается информация о том, какие группы мышц задействованы в данный момент, но при этом информация из окружающей среды не считывается и не передается. Этот уровень также отвечает за координацию движений, в которых задействована не одна группа мышц, и является неосознанным. С точки зрения механизмов этот уровень представляется процессами и устройствами сбора информации о занятости механизмов, ответственных за движение.

Третий уровень, по Н. А. Бернштейну, — это уровень пространственного поля, именно он предполагает взаимодействие человека с окружающим миром. На этом уровне в мозг передается информация от органов чувств: визуальные образы, слуховые сигналы, осязательные сигналы, а также температура и давление в окружающей среде. На третьем уровне строятся движения, зависящие от внешних факторов. Также к нему относятся все переместительные и манипуляционные движения. В рамках уровней механической руки сюда будут отнесены все движения, которые она делает, а также обработка показаний датчиков, например датчика расстояния или тепла.

Четвертый уровень — это уровень предметных действий здесь производятся уже полностью осознанные действия с предметами. На этом уровне все действия соответствуют логике предмета, то есть это не просто набор неосознанных движений, а целенаправленное действие. В данном случае движение производится с опорой на конечный результат, а не на средство его достижения. Реализация четвертого уровня для механических устройств представляет трудоемкий процесс, так как машина в отличие от человека не обладает интеллектом и не может действовать независимо от заложенной в нее программы, таким образом, если при выполнении заданного алгоритма возникают непредвиденные события, то выполнение алгоритма либо прекращается, либо продолжается, но исполняется некорректно.

На последнем уровне описания движения производятся уже не просто как действиями с объектами, а это действия интеллектуального характера, то есть они несут смысловую нагрузку. Это может быть письмо, речь, а также творческая работа: складывание оригами, резка по дереву и т. д. В плане работы различных устройств этот уровень может быть представлен как независимое от обстоятельств достижение решения поставленной задачи [2; 3; 4].

Таким образом, в более развернутом виде получается, что первый уровень построения движений, если говорить о механической руке, представлен устройствами, отслеживающими состояние механизмов, регистрирующими все отклонения от нормы и передающими данные в управляющую часть механизма. Следовательно, данный уровень движений является по большей части средством диагностики, то есть средством сбора информации о состоянии всего устройства.

Второй уровень ответственен за сбор информации о занятости частей механизма. Этот уровень важен не только тем, что позволяет отслеживать, какие механизмы задействованы, но и тем, что препятствует получению исполнительным механизмом дублирующих команд, которые могли бы привести к противоречию.

Следуя Н. А. Бернштейну, все данные, касающиеся положения механизма в пространстве, могут быть отнесены к третьему уровню. Информация, поступающая с этого уровня, также является важной, так как неточность определения положения механизма в пространстве может влиять не только на работу самого устройства, но и на успешность выстраивания системы взаимодействующих механических устройств. Такой системой может быть автоматизированная производственная линия, сборочный конвейер.

На четвертом уровне происходят движения, связанные с предметами: перемещение их, изменение, создание. Эти действия не могут исполняться сами собой, для их реализации необходим алгоритм, написанный на машинном коде. Современные языки программирования позволяют написать код программы не только быстро, но сделать его гибким, удобным к прочтению, легко изменяемым.

Пятый уровень связан непосредственно с самостоятельными и осознанными действиями с предметами и перемещениями в пространстве. Реализация движений такого уровня доступна для устройств, обладающих искусственным интеллектом. Можно воспроизвести осознанные движения для манипулятора путем установки датчиков, которые собирают информацию об окружающей среде. И если полученные данные из окружающей среды не соответствуют заданным, то исполняемый алгоритм прерывается и запускается другой — достижение решения задачи будет обеспечено.

Опираясь на уровни описания движений, предложенные А. Н. Бернштейном, можно предположить, что для движения механическим устройствам необходимы — по аналогии с человеком — приблизительно те же группы приводов, а также требуются те же группы органов, позволяющих собирать информацию как о внешнем окружении, так и о состоянии компонентов, входящих в состав устройства. Рассматривая непосредственно особенности кинематики самого манипулятора, можно провести для него аналогию с движениями руки человека и выделить из анатомической терминологии движения, характеризующиеся пространственными отношениями, схожие по механике с движениями механической руки. Такие движения могут быть классифицированы различными способами касательно человека, но касательно манипулятора необходимо учитывать ограничения, накладываемые конструкцией.

Движения как манипулятора, так и руки человека ограничены не только суставами. В обоих случаях присутствует связочный аппарат и мышечная тяга. В человеческом организме связочный аппарат и мышечная тяга реализуются за счет связок и мышц, в манипуляторе — за счет моторов и серводвигателей.

Основной задачей механических сочленений является обеспечение подвижности сочленяющихся частей манипулятора относительно друг друга. Существует несколько типов движений в сочленениях: сгибание, разгибание, пронация, супинация и вращение. Эти движения совершаются за счет трех типов суставов:

- трехосные суставы — данный тип суставов является наиболее подвижным, такие суставы обеспечивают движения конечности в трех направлениях;
- двухосные суставы — обеспечивают движение в двух направлениях;
- одноосные суставы — обеспечивают движение в одном направлении.

К основным суставам руки человека, обеспечивающим наибольший объем движений верхней конечности, относят: плечевой, локтевой (это сложный сустав, включающий плечелоктевой сустав, плечелучевой и проксимальный лучелоктевой суставы), лучезапястный (сформированный сочленением лучевой кости с костями запястья, а также дистальным лучелоктевым сочленением), пястно-фаланговые сочленения и суставы фаланг пальцев. Также можно выделить 1-й запястно-пястный сустав, обеспечивающий значительную свободу движений большому пальцу кисти.

Плечевой, лучезапястный суставы, пястно-фаланговые и суставы фаланг пальцев — это трехосные суставы и являются они одними из самых подвижных суставов руки. Локтевой сустав благодаря своей сложности позволяет осуществлять движения в двух осях [2; 9].

Сочленения в манипуляторе чаще всего реализуются при помощи двух типов сочленений: вращательного и поступательного, в некоторых случаях используются сферические сочленения, когда манипулятору требуется больше свободы движения.

Механические устройства могут быть ограничены в некоторых возможностях по сравнению с человеком, и поэтому часть движений не может быть выполнена с нужной точностью. Но наряду с ограничениями есть и расширение возможностей, например человек не может повернуть ладонь на 360° , а для механического устройства, если позволяет его конструкция, это движение может существовать.

Любое движение подчиняется определенным законам механики, что позволяет описать его простыми механическими моделями. Управление манипуляторами сопряжено с некоторыми проблемами, источником которых является их главное преимущество — универсальность и многозадачность. Даже в том случае, когда манипулятор предполагается использовать в рамках решения одной задачи, могут возникнуть дополнительные условия, например необходимо подбирать траекторию движения или менять ориентацию используемого инструмента, а также скорость и протяженность работы. При этом круг возможностей любого робота ограничен, и он может функционировать только в рамках заданных программистом условий рабочего пространства. Так же как и у человека, сила манипулятора ограничена возможностями его приводов, то есть моторов и сервомоторов.

Манипулятор можно рассмотреть как управляющую систему, образованную совокупностью датчиков и приводов, работающих на общую механическую нагрузку. Анализируя устройство роботов и проводя аналогию с человеком, можно выявить, что манипуляторы и антропоморфные роботы являются наиболее схожими с человеком по строению и, следовательно, для описания механических движений манипулятора могут быть применены те же кинетические уравнения.

Робот может быть представлен динамической моделью, вписывающейся в зависимости от установленных задач в конфигурационное или операционное пространство. Описать движения манипулятора возможно при помощи уравнений движения, которые представляют собой систему дифференциальных уравнений, задающихся через законы движения и определяющих состояние системы в координатах времени и пространства. В таком случае переменными уравнений движения становятся координаты и их производные, а коэффициентами при них — комбинации геометрических и динамических параметров, относящихся к системе тел, это могут быть, например, масса, моменты инерции, координаты центров масс и т. п. [6; 8].

Основываясь на таком подходе, можно выделить две наиболее подходящие задачи для описания движений манипулятора, а именно прямую и обратную задачи динамики. Главной целью решения первой задачи является определение равнодействующих сил, действующих на тело. Целью второй задачи является определение по заданным силам характера движения тела, то есть его координат, скорости и ускорения.

С точки зрения кинематики манипуляторы являются сложными для рассмотрения механизмами. Они могут работать не только в одном режиме, но в зависимости от обстоятельств способны переключаться между заданными алгоритмами, режимами. Здесь возможно выделить дополнительные подзадачи управления движениями манипулятора. Определяемые подзадачи должны основываться на динамике движения робота.

Первой подзадачей можно обозначить планирование траектории движения, проводимое с учетом как кинематических, так и динамических ограничений. То есть это расчет допустимых значений, при которых работа будет выполняться корректно и без лишних дополнительных действий. Решение этой задачи является одним из важнейших аспектов в работе программиста по разработке кода, управляющего действиями и движениями манипулятора. Если код написан некорректно или были допущены ошибки при его написании, может произойти отказ системы или понизится ее общая производительность [1; 8].

Второй подзадачей становится анализ устойчивости движения при возмущениях различной природы. Решение данной задачи непосредственно связано с устранением и предупреждением проблем, возникающих вследствие непредвиденных обстоятельств, возможных как по вине человека, так и внешних причин, таких, например, как землетрясение. Алгоритм работы манипулятора в подобных ситуациях должен приводить систему к остановке с наименьшими последствиями для нее. При таком подходе возможно существенное снижение затрат на восстановление общей работоспособности системы.

Следующая подзадача относится к динамике движения манипулятора — это вычисление скорости ответа системы на заданную команду, то есть анализ качества всей системы в целом. В случае долгого ответа системы на команду производительность системы может заметно снизиться, что приведет к дополнительным расходам или убыткам.

Последней выделяемой подзадачей может быть оценка применимых диапазонов скоростей и ускорений перемещения, при которых работа механизма укладывается в допустимые нормы и не происходит нежелательных операций или не возникает деформации механизмов.

Литература

1. Беклемишев Н. Д., Платонов А. К., Соколов С. М., Трифонов О. В. Алгоритмы управления движением схвата манипулятора // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша. 2017. № 47. 36 с.

2. Батуев А. С., Куликов Г. А. Введение в физиологию сенсорных систем: учебное пособие для студентов биологических специальностей университетов. М.: Высшая школа, 1983. 247 с.
3. Бернштейн Н. А. Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990. 494 с.
4. Бернштейн Н. А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина, 1966. 349 с.
5. Бранков Г. Основы биомеханики. М.: Мир, 1981. 254 с.
6. Гельмгольц К. Скорость распространения нервного возбуждения. М.: Политиздат, 1923. 134 с.
7. Гиппенрейтер Ю. Б. Введение в общую психологию: курс лекций: учебное пособие. М.: Издательство Московского университета, 1988. 320 с.
8. Никандров В. В. Психомоторика: учебное пособие для вузов. СПб: Речь, 2004. 14 с.
9. Сиразетдинов Р. Т., Фадеев А. Ю., Хисамутдинов Р. Э. Новые технологии образования на основе малоразмерного антропоморфного робота РОМА // Информатика и образование. 2019. № 1 (300). С. 33–39.
10. Salisbury J. K., Craig J. Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues // International Journal of Robotics Research. 1982. № 1. Vol. 1. P. 4–17.

Literatura

1. Beklemishev N. D., Platonov A. K., Sokolov S. M., Trifonov O. V. Algoritmy` upravleniya dvizheniem sxvata manipulyatora // Preprint IPM im. M. V. Keldy`sha. 2017. № 47. 36 s.
2. Batuev A. S., Kulikov G. A. Vvedenie v fiziologiyu sensoryn`x sistem: uchebnoe posobie dlya studentov biologicheskix special`nostej universitetov. M.: Vy`sshaya shkola, 1983. 247 s.
3. Bernshtejn N. A. Fiziologiya dvizhenij i aktivnost`. M.: Nauka, 1990. 494 s.
4. Bernshtejn N. A. Ocherki po fiziologii dvizhenij i fiziologii aktivnosti. M.: Medicina, 1966. 349 s.
5. Brankov G. Osnovy` biomexaniki. M.: Mir, 1981. 254 s.
6. Gel`mgol`cz K. Skorost` rasprostraneniya nervnogo vozvuzhdeniya. M.: Politizdat, 1923. 134 s.
7. Gippenrejter Yu. B. Vvedenie v obshhuyu psixologiyu: kurs lekcij: uchebnoe posobie. M.: Izdatel`stvo Moskovskogo universiteta, 1988. 320 s.
8. Nikandrov V. V. Psixomotorika: uchebnoe posobie dlya vuzov. SPb: Rech`, 2004. 14 s.
9. Sirazetdinov R. T., Fadeev A. Yu., Xisamutdinov R. E`. Novy`e texnologii obrazovaniya na osnove malorazmernogo antropomorfного робота ROMA // Informatika i obrazovanie. 2019. № 1 (300). S. 33–39.
10. Salisbury J. K., Craig J. Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues // International Journal of Robotics Research. 1982. № 1. Vol. 1. P. 4–17.

*M. A. Patrin.,
P. V. Polushkin.,
I. S. Grigoryev*

About the Movement of the Manipulator

The article considers some existing manipulators and compares them with the human hand. Also, consider the construction of levels of motion and describe the problems of programming the movements of manipulators.

Keywords: manipulator; levels of construction of movements; mechanics; biomechanics; programming; kinematics.