

Управление манипуляторами с числом степеней свободы более шести

© А.И. Жильцов, В.С. Жуков, Д.А. Рылеев

НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Излагается опыт разработки алгоритмов управления движущимся объектом со многими степенями свободы на примере многозвенного робота-манипулятора. Рассмотрена, в частности, задача согласованного ручного управления человеком-оператором несколькими многозвенными манипуляторами. Такая задача актуальна при создании медицинских роботов-ассистентов для малоинвазивной хирургии, т. е. для хирургических операций, выполняемых с минимальным повреждением тканей.

Ключевые слова: *распределенная система управления, грубые системы, робот-манипулятор, решение обратной задачи по скорости, согласованное движение.*

Введение. Многозвенные манипуляторы находят широкое применение во многих отраслях человеческой деятельности, что обусловлено основным их назначением — заменить человеческую руку. Везде, где требуется совершать однообразные рутинные операции или высокоточные действия, появляется желание заменить человека механическим манипулятором. Развитие вычислительной техники и технологии производства позволили изготавливать высокоточные изделия, способные во многом повторить, а иногда и превзойти по некоторым функциям руку человека.

Одна из областей, где широко применяются механические манипуляторы, — хирургия. После отработки в медицинской практике технологии ручной малоинвазивной хирургии, получившей обобщенное название лапароскопической, уже в 1990-х годах были созданы первые робототехнические комплексы, исполняющие роль робота-ассистента или робота-хирурга. В настоящее время целый ряд высокоточных хирургических операций совершается с помощью медицинских манипуляторов. При многократном (до 40 раз) увеличении на мониторе отображения внутренних органов, получаемого при помощи совершенной оптики эндоскопа, дистанционно управляемый хирургом манипулятор способен выполнять довольно тонкие движения.

В настоящее время широко применяется американский робот-хирург Da Vinci. Готовится к клиническим испытаниям другой яркий представитель современной техники роботоассистенции — немецкий робототехнический комплекс MIRO [1], семистепенные манипулято-

ры которого значительно компактнее манипуляторов комплекса Da Vinci. Комплекс MIRO имеет в своем составе как минимум три манипулятора. Два из них могут действовать согласованно под управлением одного хирурга (каждый управляется одной рукой с помощью специального джойстика).

Следует отличать современные хирургические роботизированные комплексы от манипуляторов-копиров. Классические роботы-копиры имеют идентичную конструкцию части, которая работает под управлением оператора, и части, работающей в камере. В своей работе роботы-копиры предназначены для точного повторения движений, задаваемых оператором в той части манипулятора, которая находится в изолированной камере. Другими словами, роботы-копиры — это механизмы, удаленно повторяющие движения оператора.

Медицинские роботы-хирурги работают по скоростной модели, отрабатывают движения, задаваемые джойстиком и в классическом определении не являются копиями. Такие манипуляторы не только выполняют сложные согласованные движения, не всегда в точности повторяющие движения оператора, но и дополняют их, предоставляя значительно более широкие возможности по сравнению с теми действиями, которые можно было бы совершить двумя руками. Соответственно, управлять такими роботами как роботами-копиями не всегда верно.

Постановка задачи. Не привязываясь к специфике конкретных хирургических операций, практически любая операция не обходится без таких движений как:

- плоскопараллельное движение для позиционирования инструмента на пациенте;
- прямолинейное движение вдоль инструмента для погружения в порт, размещенный на теле пациента;
- качание инструмента, погруженного в порт;
- возможность удобного позиционирования манипулятора в условиях стесненного пространства около операционного стола;
- движение по заданной траектории/сканирование определенной области для выполнения рутинных повторяющихся движений.

Чтобы реализовать указанные движения, необходимо, прежде всего, предложить такую конструкцию манипулятора, при которой этот спектр движений отрабатывался бы максимально точно и максимально гладко. От того, какие применяются типы шарниров (шаровой, квазишаровой, плоский и др.), и порядка их соединения зависят плавность и точность движений манипулятора.

Для обеспечения практической применимости манипулятора в роботоассистенции он должен обеспечивать необходимую точность позиционирования и скорость перемещения инструмента.

Исходя из сказанного, поставленную задачу можно сформулировать следующим образом.

1. Предложить вариант конструкции манипулятора, который бы обеспечивал максимально точное воспроизведение движения человеческой руки при имеющихся технологических ограничениях производства.

2. Разработать алгоритм управления манипулятором, обеспечивающий заданную точность позиционирования, скорость перемещения инструмента и отработку заданного спектра движений.

Известные методы решения. Все известные [2] алгоритмы управления манипуляторами подразумевают решение двух кинематических задач: прямой и обратной. Первая задача позволяет получить координаты положения инструмента по заданным углам в шарнирах манипулятора. Вторая задача предназначена для определения углов в шарнирах манипулятора по известным координатам инструмента.

Прямая задача:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\Omega, \quad (1)$$

где \mathbf{X} — вектор координат инструмента; \mathbf{T} — матрица преобразования координат; Ω — вектор углов в степенях свободы манипулятора.

Обратная задача:

$$\mathbf{T}^{-1}\mathbf{X} = \Omega, \quad (2)$$

где \mathbf{X} — вектор координат инструмента; \mathbf{T} — матрица преобразования координат; Ω — вектор углов в степенях свободы манипулятора.

Если продифференцировать указанные соотношения, то можно получить выражения для угловых скоростей в приводах и скорости движения инструмента:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\dot{\Omega}; \quad (3)$$

$$\mathbf{A}^{-1}\dot{\mathbf{X}} = \dot{\Omega}, \quad (4)$$

где \mathbf{A} — матрица частных производных (матрица Якоби).

Трудности использования известных методов. Разработка скоростных алгоритмов программирования движений (3), (4) представляет собой сложную задачу, но ее решение дает возможность получить наиболее естественные и плавные движения манипулятора, приемлемые для практического использования в работах хирурга. Основной же трудностью является возможное изменение ранга матрицы Якоби и ее вырождение [1].

На практике манипулятор не может идеально отрабатывать заданные скорости из-за неидеальности исполнения механизмов, люфтов и т. п. Всегда будет возникать ошибка позиционирования. При-

чем эта ошибка тем больше, чем большее количество времени манипулятор работает в переходных режимах, в которых происходит изменение скоростей движения, изменение конфигурации манипулятора. Следовательно, идеологическая составляющая построения системы управления заключается в следующем: по возможности так строить траектории движения, чтобы переходных режимов было как можно меньше. Манипулятор как можно дольше должен осуществлять движения по стационарным состояниям (с постоянными угловыми скоростями на каждом приводе).

Возможность выбора наилучшего варианта с точки зрения обеспечения плавности движения открывается при наличии избыточности степеней свободы. Это означает, что количество степеней свободы манипулятора должно быть по крайней мере больше шести. Такая конструкция манипуляторов реализована, например, в упомянутом выше комплексе MIRO. Не существует простого алгоритмического метода решения обратной задачи о скорости, если число степеней свободы более шести. Известны методы решения этой задачи, но все они в той или иной степени эвристические, основаны на методах оптимизации и по сути своей являются методами «отхода от запрещенных конфигураций». Иными словами, решение выбирается так, чтобы оно не попало в область запрещенных конфигураций. Однако это решение не всегда получается оптимальным с точки зрения плавности и естественности движения.

Если же решение все-таки удастся найти, то на реальном аппарате всегда будет присутствовать дрейф параметров приводов, люфты и погрешности изготовления. Это будет проявляться как некое стороннее воздействие, которое рассчитать аналитически невозможно. Поэтому необходимо принятие определенных мер, нивелирующих эти нежелательные воздействия. Такие меры будем называть *динамической коррекцией*, т. е. коррекцией проявлений неидеальности конструкции манипулятора, выражающихся в отклонении динамических параметров от идеальных (наличие инерции приводов, люфтов в редукторах и т. д.).

Скорректировать движение манипулятора можно введением дополнительного вектора скорости, приложенного к инструменту, который приводит к уменьшению отклонения текущего положения инструмента от заданного положения. Тогда одновременное действие целенаправленного движения, формируемого с помощью решения обратной кинематической задачи, и корректирующего воздействия сведет к минимуму проявления неидеальности конструкции манипулятора.

При применении известного подхода к управлению шестизвенными манипуляторами такая коррекция работает следующим обра-

зом. Вначале вычисляются фактическое отклонение траектории от требуемой и вектор скорости корректирующего воздействия. Через решение обратной кинематической задачи вычисляются угловые скорости в приводах, которые и отрабатывают корректирующее воздействие.

Недостатком такого подхода является довольно значительный объем вычислений, направленный на умножение матриц и вычисление обратных матриц. Более серьезным недостатком является невозможность задания определенных весов степеням свободы. Любое, даже незначительное отклонение будет отрабатываться всеми степенями свободы, поскольку оно преобразуется в угловые скорости каждой степени подвижности в соответствии с приведенными формулами. Выделить, каким степеням свободы эти отклонения отрабатывать, не представляется возможным.

Последний существенный недостаток связан с возможным вырождением матрицы Якоби и возникающими трудностями выделения решения из множества возможных, если число степеней свободы превышает шесть. В этом случае матрица преобразования координат становится неквадратной и можно вычислить лишь квазиобратную матрицу. На практике используются методы вычисления квазиобратных матриц, основанные на минимизации функционалов. Эти методы позволяют получить квазиобратные матрицы, и обратная кинематическая задача решается. Однако минимизация функционалов требует дополнительных вычислительных мощностей, а сами функционалы несут чисто математическую функцию и инженерное представление этих функционалов в парадигме задачи управления не всегда понятно и приемлемо.

Предлагаемый метод решения задачи. Для преодоления трудностей использования известных методов для управления манипуляторами с числом степеней свободы более шести предлагается разработанный авторами метод базовых движений, основанный на концепции иерархии вычислителей.

Из-за неидеальности исполнительных механизмов манипулятора при его работе может накапливаться ошибка отработки движения. Чтобы устранить подобного рода ошибки, предлагается решение задачи динамической коррекции движения. Исходя из этого, можно выделить три основных момента предлагаемого метода.

1. Требуемые движения инструмента представляются в базисе движений, уже реализованных вычислителями нижележащего уровня.

2. Динамическая коррекция движения инструмента осуществляется исходя из выполняемого в данный момент движения. В зависимости от величины отклонения задействуются сначала «легкие» степени свободы (кость, запястье, предплечье), а если этого недостаточно, то

подключаются «тяжелые» степени свободы (плечо, опорно-поворотные устройства (ОПУ)).

3. Метод базовых движений позволяет сравнительно легко увеличивать количество степеней свободы манипулятора посредством создания иерархической структуры, в которой каждое сложное движение представляется более простым на каждой ступени иерархии.

Концепция иерархии вычислителей. Предлагается разработанный метод построения системы управления по иерархической схеме как один из методов обеспечения целенаправленного движения инструмента для манипуляторов с числом степеней свободы более шести. В основе схемы лежат движения (будем называть их атомарными), которые обеспечиваются использованием только одной степени свободы (например, сгибание локтя, качание или кручение плеча и т. д.).

Следующий класс движений (будем называть их базовыми движениями первого уровня) обеспечивают уже более сложное согласованное движение. Выбор их зависит от специфики применения манипулятора. Поскольку по конструкции манипулятор представляет собой устройство для доставки инструмента в нужную точку пространства, авторы посчитали логичным в качестве базовых движений первого уровня выбрать такие, которые бы имитировали сферическую систему координат. Таким образом, чтобы достигнуть любой точки из области достижимости, надо задать радиус-вектор этой точки. Положение радиус-вектора в пространстве определяется углом азимута, углом места и модулем радиус-вектора. Следовательно, получается три базовых движения первого уровня: перемещение инструмента на угол азимута, перемещение инструмента на угол места и изменение длины радиус-вектора с сохранением его направления. Первые два движения могут быть объединены в одно посредством вычисления оси эквивалентного разворота, которое мы будем называть «Орбитальное». Движение, направленное на изменение длины радиус-вектора, будем называть «Радиальное».

Для увеличения скорости перемещения инструмента при минимальной ошибке отклонения траектории от заданной желательнее сконфигурировать манипулятор таким образом, чтобы при движении вдоль инструмента плечо и предплечье находились в одной плоскости. В такой конфигурации минимизирован нежелательный гироскопический эффект, суставы манипулятора не испытывают механических перегрузок, а движение получается органичным и естественным. Для решения задачи выведения сустава локтя в плоскость движения авторы предложили ввести в базовые движения первого уровня дополнительное. Назовем его вращением вокруг радиус-вектора или просто «Вращение».

Базовые движения первого уровня реализуются путем комбинации движений нулевого уровня, или атомарных движений.

Для реализации рабочих движений манипулятора, таких как плоскопараллельное, движение по произвольной прямой, качание инструмента вокруг заданной точки и др., предлагается использовать движения второго уровня. Вектор скорости движения по произвольной прямой может быть представлен как сумма орбитального и радиального движения. Вектор скорости качания вокруг произвольной точки также может быть представлен как векторная сумма скоростей в ортогональных направлениях. Таким образом, движения второго уровня реализуются как комбинация базовых движений первого уровня.

Итак, концепцию иерархии вычислителей можно сформулировать следующим образом. Движения каждого последующего уровня реализуются на базе движений предыдущего. Задача вычислителей каждого последующего уровня — задать требуемое движение через комбинацию движений предыдущего, не заботясь о том, каким образом эти движения реализованы. Такой подход позволяет минимизировать объем вычислений каждым вычислителем, создать легко масштабируемую, наращиваемую систему. Проектирование системы управления в этой концепции носит прозрачный и интуитивно понятный характер. Четкое разделение областей принятия решения позволяет вносить любые коррекции точно в том месте, где это необходимо.

Базовые движения первого уровня. Пусть вектор R — вектор, проведенный из ОПУ в точку запястья.

Базовое движение первого уровня «Орбитальное». Представляет собой движение по переносу инструмента из одной точки области достижимости манипулятора в другую точку этой области. Обе точки принадлежат одной сфере радиуса R . При этом $|R| = \text{const}$.

Базовое движение «Вращение». Предназначено для вращения локтя манипулятора вокруг вектора R . При этом положение инструмента стабилизировано и не изменяется, $R = \text{const}$.

Базовое движение «Радиальное». Осуществляет изменение длины вектора R с сохранением его направления.

Реализация базовых движений первого уровня. Базовые движения первого уровня реализуются следующим образом. Вектор угловой скорости, направленный вдоль оси желаемого движения, раскладывается на составляющие угловые скорости, которые отрабатываются имеющимися степенями свободы: ОПУ, качание плеча и кручение плеча.

Пусть \mathbf{p}_1 — единичный вектор оси кручения плеча, а \mathbf{p}_2 — единичный вектор оси качания плеча. Тогда разложение вектора общей угловой скорости движения выглядит следующим образом:

$$\omega_{\text{кач. плеча}} = (\Omega \mathbf{p}_2) \mathbf{p}_2, \quad (5)$$

$$\omega_{\text{круч. плеча}} = (\Omega \mathbf{p}_1) \text{sign}(\Omega \mathbf{p}_1) \frac{1}{\sin q_1} \mathbf{p}_1, \quad (6)$$

где q_1 — текущий угол качания плеча,

$$\omega_{\text{ОПУ}} = ((\Omega \cdot \mathbf{k}) - (\omega_{\text{круч. плеча}} \cdot \mathbf{k})) \mathbf{k}, \quad (7)$$

где \mathbf{k} — единичный вектор оси вращения ОПУ.

В случае движения «Орбитальное» вектор суммарной угловой скорости движения направлен вдоль вектора оси эквивалентного разворота. В случае движения «Вращение» этот вектор направлен вдоль радиуса-вектора «ОПУ — запястье». В случае базового движения «Радиальное» этот вектор является вектором нормали к плоскости, образованной плечом и предплечьем. Для движения «Радиальное» еще добавляется вектор угловой скорости вращения локтя, который вычисляется следующим образом:

$$\omega_{\text{локоть}} = \frac{|\mathbf{R}|}{|\mathbf{R}_1| \cdot |\mathbf{R}_2| \cdot \sin q_3} \mathbf{z}_3, \quad (8)$$

где \mathbf{R} — вектор, проведенный от ОПУ к запястью; \mathbf{R}_1 — вектор, представляющий собой плечо манипулятора; \mathbf{R}_2 — вектор, образующий предплечье; q_3 — текущий угол локтя.

Таким образом, базовые движения «Радиальное» и «Орбитальное» выглядят как векторы функций:

$$RAD = \begin{bmatrix} \omega_{\text{кач. плеча}} \\ \omega_{\text{круч. плеча}} \\ \omega_{\text{ОПУ}} \\ \omega_{\text{локоть}} \end{bmatrix}; \quad ORB = \begin{bmatrix} \omega_{\text{кач. плеча}} \\ \omega_{\text{круч. плеча}} \\ \omega_{\text{ОПУ}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Движение по произвольной прямой как пример реализации базовых движений второго уровня. Прямолинейное движение, или движение по произвольной прямой в пространстве, в концепции иерархии вычислителей можно представлять как базовое движение второго уровня, поскольку оно реализуется методами базовых движений первого уровня. Аналогично и плоскопараллельное движение можно рассматривать как базовое движение второго уровня.

Прямолинейное и плоскопараллельное движение манипулятора, закрепленного на ОПУ и вращающегося на ОПУ, может быть представлено геометрическим сложением базового движения «Орбитальное» и «Радиальное». При отработке базового движения «Орбиталь-

ное» шарнир запястья получает вектор линейной скорости, направленный по касательной к дуге с центром в ОПУ. При обработке базового движения «Радиальное» шарнир запястья получает вектор линейной скорости, направленный вдоль вектора ОПУ — запястье, т. е. он направлен вдоль радиуса дуги с центром в ОПУ и, следовательно, перпендикулярен вектору линейной скорости, порожденному базовым движением «Орбитальное». Назовем их *тангенциальной* и *нормальной* составляющими.

Для решения задачи вычисления угловой скорости двузвенника по известной линейной скорости какой-либо его точки применили метод центра мгновенных скоростей. Этот графический метод, известный из теоретической механики, позволяет вычислить угловые скорости в шарнирах манипулятора по известной линейной скорости точки запястья.

При реализации прямолинейного движения задается вектор прямой, вдоль которой необходимо двигаться, определяющий вектор скорости. Далее этот вектор представляется как сумма векторов нормальной и тангенциальной составляющих. После этого, вычисляя по известным нормальным и тангенциальным составляющим угловые скорости базовых движений первого уровня «Радиальное» и «Орбитальное», получаем представление базового движения второго уровня методами базовых движений первого уровня.

Представление прямолинейного движения как базового движения второго уровня через базовые движения первого уровня выглядит следующим образом. Пусть \mathbf{V} — вектор скорости, совпадающий с вектором направления прямой требуемого движения,

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{(\mathbf{V} \cdot \mathbf{R})}{|\mathbf{R}|}, \\
 \omega_{\text{локоть}} &= K \frac{|\mathbf{R}|}{|\mathbf{R}_1| \cdot |\mathbf{R}_2| \cdot \sin q_3} \mathbf{z}_3, \\
 \omega_{\text{рад}} &= \frac{-K(|\mathbf{R}|^2 + |\mathbf{R}_2|^2 - |\mathbf{R}_1|^2)}{2 \cdot |\mathbf{R}| \cdot |\mathbf{R}_1| \cdot |\mathbf{R}_2| \cdot \sin q_3} \mathbf{z}_3, \\
 \omega_{\text{орб}} &= \frac{-[\mathbf{R} \times (\mathbf{V} - K \cdot \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|})] \cdot |\mathbf{V} - K \cdot \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|}|}{|[\mathbf{R} \times (\mathbf{V} - K \cdot \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|})]| \cdot |\mathbf{R}|},
 \end{aligned} \tag{10}$$

где пара $\omega_{\text{локоть}}, \omega_{\text{рад}}$ представляет собой базовое движение первого уровня «Радиальное», а $\omega_{\text{орб}}$ — базовое движение первого уровня «Орбитальное».

Динамическая коррекция движения. В использовании базовых движений для генерации корректирующего воздействия заключается динамическая коррекция движения. Использование базового движения второго уровня «Движение по произвольной прямой» позволяет осуществить динамическую коррекцию движения инструмента. В этом случае не проводится пересчет координат в угловые скорости посредством вычисления обратной матрицы, а осуществляется движение по прямой, которое подмешивается к исходному целенаправленному движению. Степень этого воздействия регулируется величиной отклонения траектории от заданной. При этом осуществляется управление вектором скорости корректирующего воздействия. Также появляется дополнительная возможность создать другие базовые движения второго уровня. Разные движения могут быть задействованы для различных величин отклонения и разных конфигураций манипулятора, появляется возможность присвоить «веса» степеням свободы, что позволит не задействовать все степени свободы для компенсации небольших отклонений.

Динамическая коррекция движения вдоль каждого отрезка осуществляется опять же с помощью вычисления отклонения от заданной прямой и отработки этого отклонения таким же методом. В итоге получается система, которая компенсирует внутренние ошибки по конечному результату, а не по ошибкам в каждой степени свободы, что позволяет добиться лучшего качества движения по сравнению со способом стабилизации при пересчете ошибки на каждую степень свободы.

Заключение. В результате работы были получены следующие результаты.

1. Предложен вариант методики разработки системы управления манипуляторами с числом степеней свободы более шести. Методика позволяет создавать системы управления для многозвенных манипуляторов, основываясь на концепции иерархии вычислителей.

2. Способ реализации базовых движений первого уровня позволяет авторам предложить модель конструкции манипулятора. Как вариант, предлагается использовать чередование шарового шарнира (квазишарового) и плоского. В шаровом шарнире реализуются $\omega_{\text{Рад}}$ и $\omega_{\text{Орб}}$, а в плоском — $\omega_{\text{локоть}}$. Такие пары шарниров можно соединять в цепочки и создавать систему управления ими, используя концепцию иерархии вычислителей.

3. Данная методика была использована при создании робота-ассистента для малоинвазивной хирургии. В конструкции этого робота было использовано следующее последовательное соединение шарниров: квазишаровой (три степени свободы) — плоский (одна степень свободы) — квазишаровой (три степени свободы).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тимофеев А.В. *Управление роботами*. Ленинград, Изд-во ЛГУ, 1986, 240 с.
- [2] Hagn U., Nickl M., Forg S. et al. The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications. Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center (DLR), Wessling, Germany. *Industrial Robot: An International Journal*, 2008, 35/4, pp. 324–336. Emerald Group Publishing Limited.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Жильцов А.И., Жуков В.С., Рылеев Д.А. Управление манипуляторами с числом степеней свободы более шести. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1086.html>

Жильцов Александр Иванович — начальник отдела «Системы управления движущимися объектами» НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: a.i.zhiltsov@yandex.ru

Жуков Вадим Сергеевич — старший научный сотрудник отдела «Системы управления движущимися объектами» НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Рылеев Дмитрий Александрович — лаборант-исследователь отдела «Системы управления движущимися объектами» НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана.