
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 531.8, 621.01

**РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПОСТОЯННЫХ СКОРОСТЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
МАНИПУЛЯТОРОМ С УДАЛЕННЫМ ЦЕНТРОМ ВРАЩЕНИЯ**© 2024 г. К. А. Шалюхин^{1, *}, К. А. Пичугин¹, А. Н. Терехова²¹Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, Москва, Россия²Российский госудаственный университет им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия

*e-mail: constmeister@gmail.com

Поступила в редакцию 25.04.2024 г.

После доработки 04.06.2024 г.

Принята к публикации 15.06.2024 г.

Предметом статьи являются проблемы ручного управления манипулятором, использующего задатчики движения с логическим выходным сигналом. Рассмотрены задатчики различной конструкции и логики действия. Освещены различные режимы и принципы управления, допускающие одновременную работу нескольких приводов на примере механизма с четырьмя степенями свободы и удаленным центром вращения. Приведены рекомендации для выбора способов и законов управления при разработке пространственных манипуляторов.

Ключевые слова: задатчик движения, механизм с удаленным центром вращения, режим постоянных скоростей, двухкоординатный логический джойстик, логический коммутатор, управляющий сигнал, рабочие состояния механизма

DOI: 10.31857/S0235711924050017, **EDN:** NUUBTU

В процессе деятельности по инновационному развитию машиноведения [1], специалисты, работающие в этой области, сталкиваются с рядом требующих решения актуальных проблем. В задачах автоматизации производственных и технологических процессов во множестве отраслей, использующих робототехнику, удаленное управление различными механизмами и техническими устройствами является широко распространенной практикой. Автономные робототехнические системы действуют по заложенной программе, с возможной коррекцией по сигналам датчиков обратной связи о состоянии окружающей среды и результатах выполняемых операций. Роль человека-оператора сводится к наблюдению за работой системы и вмешательству в случае нештатных ситуаций.

Значительно более распространенными являются системы, непосредственно управляемые оператором и использующие его адаптивные и аналитические возможности. Взаимодействие человека с такой системой осуществляется, с одной стороны, средствами объективного контроля над процессом выполнения требуемых операций, визуального контроля непосредственно или через системы видеонаблюдения, с другой стороны, через задатчики движения, интерпретирующие действия оператора в сигналы управления.

Законы управления, связывающие работу задатчиков движения с реакциями системы, различны. Исполнительные механизмы и манипуляторы могут работать в следящей системе, минимизирующей рассогласование между сигналом управле-

ния и фактическим положением исполнительного механизма, получаемого с датчиков обратной связи. Такая логика приводит к тому, что механизм повторяет движение задатчика управления в случае его перемещения в другое положение. В качестве примера можно привести управление манипулятором робот-ассистированной хирургической системы *DaVinci*, в которой основой управляющего сигнала является перемещение руки оператора, преобразованное задатчиками движения [2].

Более простой закон управления применяется в системах управления по скорости исполнительных механизмов. Задатчик движения в этих системах имеет устойчивую нейтральную позицию, в которой не выдаются сигналы управления. При отклонении от нейтральной позиции в прямом или реверсивном направлении исполнительным механизмам задается скорость, которая тем выше, чем больше величина отклонения. Достижение требуемого положения визуально фиксируется оператором, после чего задатчик переводится в нейтральную позицию. Таким образом, функцию обратной связи выполняет оператор, а датчики обратной связи используются только при необходимости пересчета координат для согласованной работы нескольких приводов.

Еще более простой закон управления используется в системах с фиксированными значениями скоростей приводов. Модуль скорости по каждому приводу является постоянной величиной, меняется только направление, при этом сигналы управления являются логическими. Такой принцип используется в системе *SoloAssist* [3] — самостоятельном робототехническом комплексе для управления медицинским эндоскопом с видеокамерой посредством двухкоординатного логического джойстика, закрепляемого на лапароскопическом инструменте, или с помощью голосовых команд на движение и остановку.

Базовый механизм. Предметом настоящей статьи является поиск оптимальных режимов и вариантов формирования задающих сигналов системы управления с постоянными скоростями вращения приводов на примере работы четырехкоординатного манипулятора с шаговым приводом, опытный образец которого разработан в ИМАШ РАН [4]. Образец выполнен в рамках программы исследований механизмов с удаленным центром вращения. Подобные конструкции решают проблему перемещений рабочего инструмента в замкнутом объеме, с доступом через небольшое отверстие, в частности, задачу управления медицинским эндоскопом в ходе малоинвазивных операций [5]. В качестве варианта немедицинского применения механизма — техническая эндоскопия, например, для задачи перемещения зонда диагностики плазменных потоков в камере турбореактивного авиационного двигателя [6].

Структура механизма манипулятора показана на рис. 1.

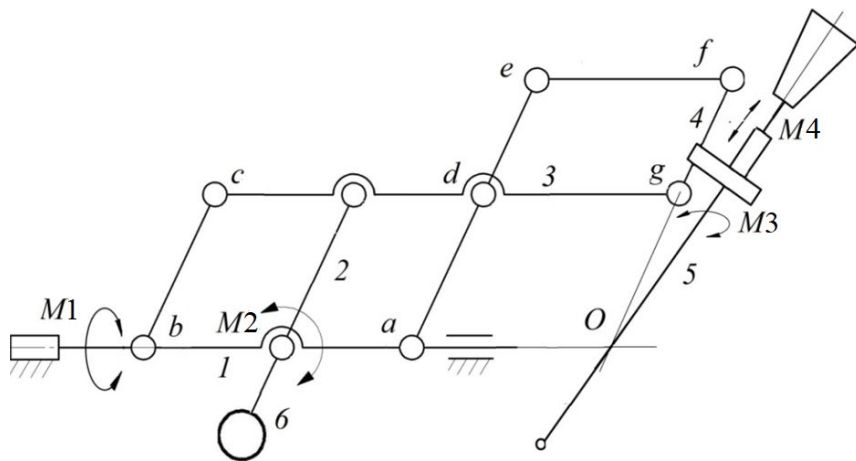


Рис. 1. Кинематическая схема механизма.

В конструкции механизма используются два параллелограмма $abcd$ и $defg$, с обшими звеньями cg и ae , установленными на поворотной платформе, что позволяет выходному звену копировать движение двух приводных звеньев, при этом точка O на выходном звене остается неподвижной.

Все четыре привода манипулятора используют шаговые двигатели. Привод поперечного наклона $M1$ расположен на основании, привод продольного наклона $M2$ установлен на поворотной платформе, а приводы вращения $M3$ и линейного перемещения $M4$ рабочего инструмента — на выходном звене манипулятора.

Управление приводами, состоящее в преобразовании входных сигналов с задатчиков движения, поступающих на четыре логических входа, в необходимую последовательность импульсов для коммутации обмоток шаговых двигателей, осуществляется схемой, в основе которой используется процессор *Arduino uno*, который дает широкие возможности использования различных программ и алгоритмов движения в сочетании с цифровыми или аналоговыми датчиками движения [7].

Необходимость управления через малое число логических входов изначально определялось наличием выводов интерфейса процессора, оставшихся после коммутации цепей управления драйверами [8]. Для драйверов двигателей продольного и поперечного наклона это по два вывода, для драйверов вращения и продольного перемещения — по четыре вывода, т.е., суммарно двенадцать. Всего интерфейс процессора содержит двенадцать логических выводов (со 2-го по 13-й) и шесть аналоговых ($A0$ – $A5$). Схема системы управления приводами манипулятора приведена на рис. 2.

Для управления драйверами *SMD-2,8mini* приводов поперечного и продольного наклона использованы выходы 2, 3 и 4, 5 соответственно. Драйвер *ULN2003A* мотор-редуктора линейного перемещения использует для управления выходы с 6-го по 9-й, а драйвер *Mini L298N* привода собственного вращения — выходы с 10-го по 13-й. Таким образом, все логические цепи использованы для управления драйверами, остается всего шесть аналоговых выводов (которые также можно использовать в качестве логических).

Четыре имеющихся привода могут находиться в трех состояниях каждый: прямое и реверсивное движение, а также состояние покоя. Суммарно это насчитывает восемь состояний движения и одно состояние неподвижности всего механизма, при условии, что двигаться в любой момент времени будет не более одного привода. Число состояний входов логического интерфейса, необходимых для управления механизмом в таком режиме, должно быть не менее девяти, включая одно состояние

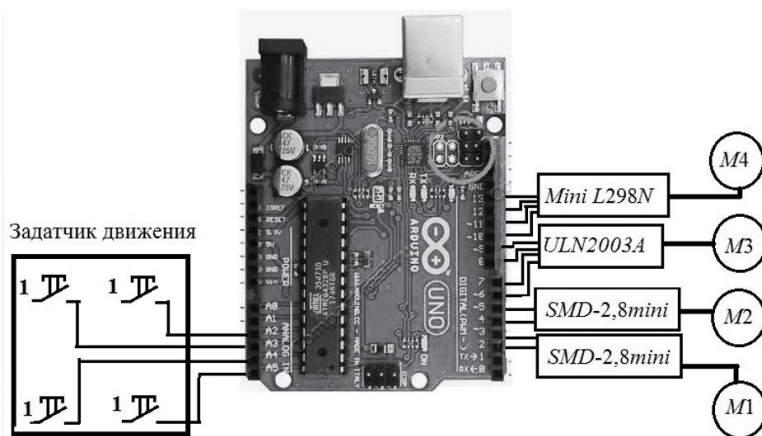


Рис. 2. Схема управления приводами манипулятора.

отсутствия сигналов управления. Такое число можно обеспечить минимально четырьмя входами, которые дают 2^4 , т.е., шестнадцать возможных состояний. В качестве опытного образца изготовлен педальный задатчик с четырьмя микропереключателями, установленными на платформе для управления ногами [9]. Сигнал в систему управления манипулятором поступает через четыре провода. Общий вид задатчика представлен на рис. 3.



Рис. 3. Педальный задатчик движения.

Конструкция позволяет стоять, не нажимая ни на один из микропереключателей, что соответствует отсутствию сигналов управления. Кроме того, опора ног на среднюю часть платформы, между передними и задними микропереключателями, не допускает одновременного их нажатия одной ногой, и как следствие, невозможность одновременного нажатия трех микропереключателей двумя ногами. Число оставшихся комбинаций равно

$$C_4^1 + C_4^2 - 2 + 1 = \frac{4!}{(4-1)!(1!)} + \frac{4!}{(4-2)!(2!)} - 2 + 1 = 9,$$

что является достаточным числом для управления четырьмя приводами.

Также для управления манипулятором используется задатчик в виде двух отдельных джойстиков для рук оператора [9]. В конструкции использованы пятипозиционные кнопки (центральный контакт не используется), каждая из которых выдает четыре логических сигнала: вверх, влево, вниз и вправо. Левый джойстик управляет приводами $M1$ и $M2$, правый — $M3$ и $M4$. Число проводов на выходе задатчиков равно восьми. Определим число состояний для такого двойного задатчика. Необходимо отметить, что конструкция кнопки допускает одновременное нажатие двух соседних направлений (например, вверх и вправо), что увеличивает число ненулевых состояний с четырех до восьми. Поскольку возможна одновременная работа двух джойстиков, общее число состояний для этого режима: $8 \times 8 = 64$, т.е., любое из восьми ненулевых состояний левого джойстика дополняется восемью состояниями одновременно нажатого правого джойстика. Всего получается состояний, с учетом одного нулевого

$$8 + 8 + 64 + 1 = 81.$$

Такое число состояний является избыточным, а при управлении в вышеописанном режиме большинство их логически недопустимо, т.к. требует одновременного

движения нескольких приводов. Кроме того, избыточным является и число выходов джойстиков, поскольку управление ведется только через 4 входа. Для блокировки недопустимых состояний джойстиков и согласования интерфейсов используется логический коммутатор, построенный также на основе процессора *Arduino uno*. Он блокирует все состояния одновременного нажатия обоих джойстиков, а также одновременное нажатие двух соседних направлений в каждом из них. Выходной сигнал коммутатора формируется в логике, использованной в педальном датчике [9]. Общий вид коммутатора и отдельных джойстиков показан на рис. 4.

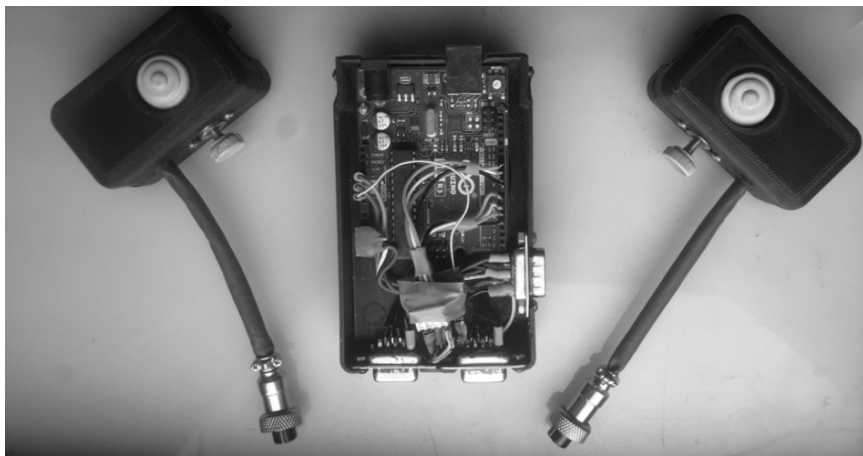


Рис. 4. Коммутатор сигналов с отдельными джойстиками.

Необходимо отметить, что управление от джойстиков предоставляет возможность более сложного управления манипулятором, включая одновременную работу двух и более приводов, но для этого необходимо увеличить число состояний входов процессора системы управления. Например, если задействовать неиспользованные входы *A0* и *A1* (рис. 2), то для шести управляющих входов число состояний составляет 2^6 , т.е. 64.

При одновременном движении не более, чем двух из четырех приводов (каждый привод может совершать два движения — прямое и реверсивное) общее число состояний

$$C_8^2 + C_8^1 + 1 = \frac{8!}{(8-2)!(2!)} + \frac{8!}{(8-1)!(1!)} + 1 = 37,$$

включая одно состояние неподвижности. Число состояний шести логических входов 64 достаточно для такого режима управления.

При одновременном движении до трех приводов общее число состояний

$$C_8^3 + C_8^2 + C_8^1 + 1 = \frac{8!}{(5)!(3!)} + \frac{8!}{(6)!(2!)} + \frac{8!}{(7)!(1!)} + 1 = 93.$$

При одновременном движении до четырех приводов общее число состояний

$$C_8^3 + C_8^3 + C_8^2 + C_8^1 + 1 = 70 + 56 + 28 + 8 + 1 = 163.$$

Последние два варианта управления можно реализовать путем расширения интерфейса до семи и восьми логических входов соответственно, или переходом к последовательному интерфейсу.

Выводы. 1. Управление в режиме постоянных скоростей вращения позволяет эффективно решать вопросы применения манипуляторов, используя ручное теле-

управление без использования обратной связи посредством простых и надежных логических задатчиков движения. 2. Число логических входов системы, необходимых для управления, существенным образом зависит от сложности режима движения и специфики конструкции задающих устройств. 3. При выборе способов и законов управления манипулятором необходимо выбирать наиболее простые решения, отвечающие нужным параметрам качества движения и выполняемым техническим задачам.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН и Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев Р. Ф., Глазунов В. А., Филиппов Г. С. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, роботохирургия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 5. С. 16.
2. Freschi C., Ferrari V., Melfi F., Ferrari V., Mosca F., Cuschieri A. Technical review of the daVinci surgical telemanipulator // The Int. J. of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 2013. V. 9. P. 394.
3. Ohmura Y., Nakagawa M., Suzuki H., Kotani K., Teramoto A. Feasibility and Usefulness of a Joystick-Guided Robotic Scope Holder (Soloassist) in Laparoscopic Surgery // Visceral Medicine. 2018. V. 34. P. 37.
4. Глазунов В. А., Ларюшкин П. А., Шалюхин К. А. Структура, кинематика и прототипирование параллельного манипулятора с удаленным центром вращения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 6. С. 54.
5. Zhang X., Lehman A., Nelson C. A., Farritor S. M., Oleynikov D. Cooperative robotic assistant for laparoscopic surgery: CoBRASurge // The 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems October 11–15, 2009 St. Louis, USA, 2009. P. 5540.
6. Филиппов Г. С., Глазунов В. А., Алешин А. К. и др. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в зондовой диагностике плазменных потоков // Лесной вестник. 2019. Т. 23 (6). С. 88.
7. Warren J.-D., Adams J., Molle H. Arduino for Robotics. In: Arduino Robotics. NY: Apress, Berkeley, 2011. 628 p.
8. Shalyukhin K. A. Control of a Four-Coordinate Manipulator with a Remote Center of Motion // J. of Mach. Manuf. and Reliab. 2024. V. 53 (1). P. 73.
9. Шалюхин К. А. Разработка задатчиков движения для управления роботизированными системами с постоянной точкой ввода инструмента // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 9 (762). С. 45.
<https://doi.org/10.1109/iros.2009.5354446>