

Машиностроение и машиноведение

УДК 681.5.01

doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-3-12

Использование силовой обратной связи при перемещении груза парой манипуляторов

Н.Ф. Сорокин¹, С.С. Гаврюшин²¹ Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии Наук² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Force Feedback Use When Moving Load by a Pair of Manipulators

N.F. Sorokin¹, S.S. Gavryushin²¹ Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences² Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрена задача о совместном переносе груза парой манипуляторов. В соответствии с парадигмой податливого управления предложено решение, включающее в себя силовую обратную связь, противодействующую нарастанию усилий в системе груз — манипулятор. С помощью тензорного представления и винтового исчисления одномерная задача обобщена на многомерный случай. Построена компьютерная модель исследуемой системы, и проведены вычислительные эксперименты с применением пакета робототехнической симуляции Gazebo. Полученные результаты подтверждают перспективность позиционно-силового подхода к решению задач группового управления.

Ключевые слова: групповое управление, система управления манипулятором, тензорное представление, позиционно-силовое управление, винтовое исчисление

The paper considers problem of joint cargo transfer by a pair of manipulators. In accordance with the compliant control paradigm, a solution is proposed that includes the force feedback counteracting the increase in forces in the load-manipulator system. Using tensor representation and screw calculus, the one-dimensional problem is generalized to the multidimensional case. Computer model of the system under study was built and computational experiments were carried out using the Gazebo robotic simulation package. The results obtained confirm the prospects of the position force approach to solving the group control problems.

Keywords: group control, manipulator control system, tensor representation, position force control, screw calculus

Совместное перемещение объектов группой манипуляторов представляет интерес, так как открывает пути к решению других практически важных задач. Помимо расширения возможно-

стей роботов, работающих на конвейерах в автомобильной, химической и кулинарной промышленности, эта тема связана с антропоморфной робототехникой и другими перспек-

тивными задачами группового управления, например, с построением группы оснащенных манипуляторами роботов, выполняющих совместные работы вне оборудованных помещений.

Для схемы совместного манипулирования необходимо обеспечить согласованное взаимодействие исполнительных механизмов, иначе может произойти выход усилий за рабочие режимы с последующим разрушением груза или поддерживающего механизма. Вместе с тем биологические объекты, в частности человек, без особого труда решают задачу совместного манипулирования как при одиночной деятельности, так и при совместной. Можно предположить, что в основе этого феномена лежит грамотное использование биологическими организмами силовой обратной связи.

Цель работы — создание методики позиционно-силового управления для повышения эффективности системы исполнительных механизмов и/или группового взаимодействия роботов-манипуляторов.

В работах, посвященных групповому управлению, большое внимание уделено построению траекторий движения отдельных роботов в составе группы. Часто эту задачу решают путем задания системы координат группы и поддержания заданного относительного положения роботов или манипуляторов внутри такой системы координат [1, 2].

Силовые обратные связи исследуют в контексте работ по телеуправлению, в частности [3, 4]. В этой задаче оператор должен обеспечить иллюзию тактильного контакта и не допустить применением манипулятором чрезмерных усилий.

Предлагаемое в настоящей статье техническое решение, предполагающее введение контура силовой обратной связи, также исследовано в работах по податливому/импендансному управлению [5] и в публикациях по позиционно-силового управлению, подробное изложение вопросов которого дано в книге [6]. В основном исследовании затронули вопросы поведения одного манипулятора, его устойчивости и жесткости.

В связи с этим уделим больше внимания вопросу, почему такое управление позволяет совместно работать группе манипуляторов.

Рассматриваемая задача управления парой манипуляторов и ее решение введением в закон управления слагаемого, отвечающего за пере-

мещение в направлении минимизации сил и моментов, уже исследовалась в трудах других авторов, например [7]. Решение предполагало наличие ведущего манипулятора и работающего «на подхвате» ведомого. Силовую обратную связь вводили только в систему управления ведомого манипулятора, в отличие от решения, предлагаемого в настоящей работе.

Практически важным направлением исследования, смежным с рассматриваемой темой, являются параллельные исполнительные механизмы. Исследованиям этой темы посвящены труды [8, 9] и ранее упомянутые работы по позиционно-силовому управлению.

Альтернативным к подходу, базирующемуся на преобразовании сигналов, является управление подвижными объектами через решение обратной задачи динамики. Подход получил существенное развитие вследствие значительного роста возможностей вычислительной техники в последние десять–двадцать лет.

Управление схватами двурукого робота на основе решения обратной задачи динамики исследовано в книге [10]. Совершенствование датчиков и алгоритмов оценки окружающего мира дают дополнительные возможности к комбинированию этих методов с кажущимся перспективным нейросетевым подходом. Примером работы по этой теме может служить [11].

Фундаментальным трудом по управлению роботами-манипуляторами является книга [12], которая важна в связи с тем, что в ней изложен метод однородных координат, применяемый при составлении структурной схемы пространственной задачи. В целях сокращения структурной сложности алгоритмов управления положением объектов в геометрическом пространстве лежащие в основе соотношения записаны в тензорном виде. Вопросы компактной записи геометрических соотношений исследованы в публикациях [12–14].

Рассмотрим одномерную задачу совместного переноса груза парой манипуляторов (рис. 1). Пусть груз выведен из положения уставки. Задача манипуляторов состоит в том, чтобы вернуть груз в целевое положение. Манипуляторы, управляемыми независимыми системами управления, имеют датчики, позволяющие отслеживать текущую координату x положения груза. Управление происходит заданием скоростей выходных звеньев \dot{y}_1 и \dot{y}_2 . Пружины введены в качестве модели конечной жесткости связи груз — манипулятор.

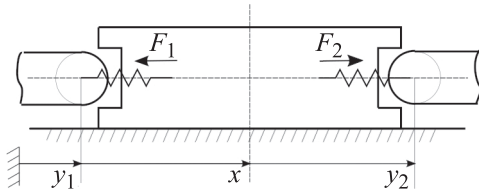


Рис. 1. Схема постановки одномерной задачи совместного переноса груза парой манипуляторов:

x и y_1 , y_2 — положение груза и выходных звеньев первого и второго манипуляторов соответственно; F_1 и F_2 — силы взаимодействия в системах груз — первый манипулятор и груз — второй манипулятор

Уравнение движения груза имеет вид

$$m\ddot{x} + D\dot{x} = F_2 - F_1,$$

где m — масса груза; D — коэффициент вязкого трения.

Пренебрегая слагаемым вязкого трения $D\dot{x}$, проведем линеаризацию, получив уравнение движения

$$m\Delta\ddot{x} = F_2 - F_1 = k(\Delta y_2 - \Delta x) + k(\Delta y_1 - \Delta x) = k(\Delta r_1 + \Delta r_2), \quad (1)$$

где Δx и Δy_1 , Δy_2 — отклонение положений груза и выходных звеньев от исходного режима; k — коэффициент упругости; Δr_1 и Δr_2 — отклонения относительных положения захватов в системе координат груза от исходного режима.

При введении тривиального закона управления $\Delta y_1 = -\xi\Delta x$, $\Delta y_2 = -\xi\Delta x$ (где ξ — коэффициент усиления обратной связи по положению) проблема схемы, показанной на рис. 1, будет состоять в наличии не одного, а множества положений равновесия $F_1 = F_2 = F_{\text{равн}}$ ($F_{\text{равн}}$ — силовой параметр равновесного режима), т. е. статической неопределенности этой задачи.

При условии устойчивости систем управления манипуляторов фазовые траектории системы будут сходиться в область равновесных режимов. Однако поскольку эта область протяженная и не является точкой, из-за шумовых отклонений установившийся режим будет выглядеть как хаотическое смещение точки по непрерывному множеству положений равновесия, что может приводить к непредсказуемому поведению графиков $F_1(t)$ и $F_2(t)$.

Для ограничения зоны допустимых решений и недопущения чрезмерного нарастания усилий введем силовую обратную связь, пока-

занную на структурной схеме одномерной системы (рис. 2) пунктирными линиями. Центральная цепь отвечает динамике груза, верхняя и нижняя цепи — логике работы системы управления манипулятора.

Для скоростей выходных звеньев запишем

$$\dot{y}_1 = -\xi\Delta\dot{x} - \eta F_1 = -\xi\Delta\dot{x} - \eta k(\Delta y_1 - \Delta x); \quad (2)$$

$$\dot{y}_2 = -\xi\Delta\dot{x} - \eta F_2 = -\xi\Delta\dot{x} - \eta k(\Delta y_2 - \Delta x), \quad (3)$$

где η — коэффициент усиления обратной силовой связи.

Такой закон соответствует принципу «ухода по силе». Манипулятор будет стремиться отодвинуться от источника давящей на него силы настолько, насколько позволяет уставка по положению перемещаемого груза. Взвешенная сумма сигналов обратной связи по силе и положению груза реализует физически допустимый установившийся режим.

Могут существовать разные подходы к практической реализации этого принципа. Концепция податливого управления допускает задание уставки на положения r_1 и r_2 внутри груза в его собственной системе координат [5]. Очевидно, что такая уставка никогда не будет достигнута, но при этом создается прижимное усилие, препятствующее выскальзыванию груза. Другой вариант, предполагающий введение уставки на усилие, несколько хуже поддается формализации, но дает более предсказуемый силовой режим.

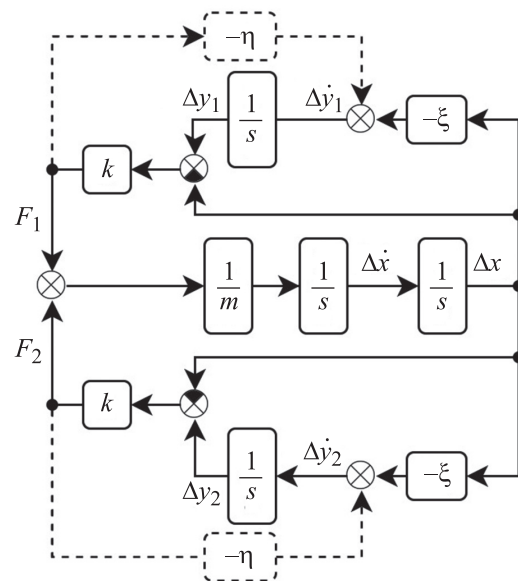


Рис. 2. Структурная схема одномерной системы (s — оператор Лапласа)

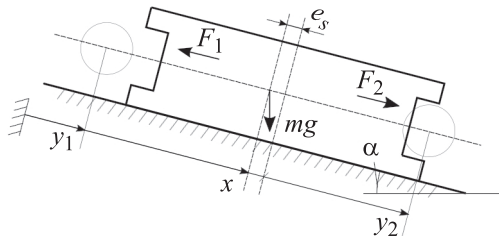


Рис. 3. Схема постановки одномерной задачи совместного переноса груза парой манипуляторов при наличии внешней силы: mg — сила тяжести груза; α — угол наклона платформы

Статическая ошибка. Учет гравитации и прочих внешних усилий. Усложним расчетную схему, добавив постоянно действующую силу — гравитацию, разместив груз на наклонной платформе (рис. 3).

Запишем условие равновесия, вытекающее из законов (1)–(3):

$$0 = k\Delta r_1 + k\Delta r_2 + F_{\text{вн}};$$

$$0 = -\xi\Delta x - \eta k\Delta r_1;$$

$$0 = -\xi\Delta x - \eta k\Delta r_2,$$

где $F_{\text{вн}}$ — внешняя сила.

Отсюда получаем

$$\Delta x = e_s = -\frac{\eta F_{\text{вн}}}{2\xi} = -\frac{\eta mg \sin \alpha}{2\xi},$$

где e_s — статическая ошибка, возникающая при использовании пропорционального закона управления.

Статическая ошибка возникает вследствие того, что манипулятор податлив не только к силам упругости груза, но и к любой внешней или внутренней силе. Компенсация ошибки требует введения дополнительных мер, например интегрирующих звеньев в закон управления.

Модельный объект. В качестве объекта исследования выберем упрощенную модель промышленного манипулятора, характеризуемого простой кинематической цепью роторных звеньев и реализующего плоское движение.

Типовая конструкция манипулятора предполагает использование сервоприводов: по одному на каждую кинематическую пару механизма. Учитывая высокие эксплуатационные качества современных исполнительных систем в плане надежности и точности позиционирования, а также отсутствие механических люфтов в силу специфики нагруженной собственной тяжестью конструкции, считаем возможным создавать

сервоприводами манипуляторов необходимые угловые скорости в широких пределах.

Для замыкания контура силовой обратной связи робот должен быть обеспечен тензодатчиком в сочленении выходного звена манипулятора. В работе [5] указано, что для реализации алгоритмов позиционно-силового управления существует распространенная практика восстановления силовых сигналов не применением тензодатчиков, а анализом измерений силы тока в сочленениях манипулятора. Такой подход может обеспечивать меньшую точность, чем установка тензодатчиков, однако не требует внесения изменений в конструкцию.

В собственной системе координат выходного звена манипулятора пара линейной \mathbf{v} и угловой $\boldsymbol{\omega}$ скоростей выходного звена имеет вид скалярного произведения вектора приведенных векторов чувствительности $\mathbf{w}_k^*(\mathbf{q})$ и вектора обобщенных скоростей отдельных звеньев манипулятора:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \mathbf{w}_k^*(\mathbf{q}) \dot{q}_k;$$

$$\mathbf{w}_k^*(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_k(\mathbf{q}) \mathbf{w}_k \\ -\mathbf{R}_k(\mathbf{q}) \mathbf{w}_k \times \mathbf{r}_k(\mathbf{q}) \end{bmatrix},$$

где \mathbf{w}_k — вектор чувствительности роторного k -го звена, являющийся константой; \dot{q}_k — обобщенная скорость k -го звена; \mathbf{R}_k и \mathbf{r}_k — текущие матрица поворота и вектор сдвига выходного звена относительно k -го звена; N — количество обобщенных координат манипулятора.

Задав желаемое управление в виде желаемых линейной \mathbf{v}^* и угловой $\boldsymbol{\omega}^*$ скоростей выходного звена и рассчитав на каждой итерации алгоритма управления матрицу чувствительности кинематической системы $\boldsymbol{\Psi} = [\mathbf{w}_1^* \mathbf{w}_2^* \dots \mathbf{w}_N^*]$, можно сформировать систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [12], решение которой позволит получить вектор желаемых обобщенных скоростей $\dot{\mathbf{q}}^*$:

$$[\boldsymbol{\omega}^* \quad \mathbf{v}^*]^T = \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}^*, \quad (4)$$

Вопрос решения СЛАУ (4) и учет возможных сингулярных режимов лежит за рамками настоящей статьи. Далее будем считать, что задача управления выходной скоростью манипулятора решена и выполняется выделенной системой управления, подчиненной системе верхнего уровня, исследование которой проведем далее. Рассмотрим схему постановки многомерной за-

для другого манипулятора на рис. 5 не показана). Здесь обозначены следующие параметры: \mathbf{Q}_i — тензор относительного положения i -го манипулятора в системе координат груза, принятый константой в первом приближении; \mathbf{Y}_i и \mathbf{u}_i — тензор положения и винт скорости выходного звена i -го манипулятора; \mathbf{Y}_i^* — нейтральное положение, в котором манипулятор не испытывает силы упругости со стороны груза, но и не удален от него; k — матричный коэффициент упругости; $W_{исп}$ — оператор, учитывающий поведение системы управления манипуляторами, являющийся линейным в первом приближении; \mathbf{F}_i — сила воздействия i -го манипулятора на груз.

На входе верхней цепи условно показано, что винт желаемой скорости (twist) $\mathbf{v}_{жел}$ подвергается преобразованию переноса по известному закону для винтов скорости $[\mathbf{Q}_i]_{tw}$. На выходе верхней цепи условно показано, что винт силы (wrench) подвергается обратному переносу по закону для винтов силы $[\mathbf{Q}_i]_{wr}$. Силовые винты всех манипуляторов суммируются.

Введенный оператор scg — это функция преобразования тензора положения в винт положения. Оператор tns выполняет обратную операцию scg преобразование и необходимые преобразования систем координат. Символ $[\]$ при коэффициенте обозначает умножение входного сигнала на коэффициент слева. Тензор \mathbf{Q}_i умножается слева на сигнал положения из кинематических соображений (5).

Отдельного пояснения требует интегральное преобразование

$$\mathbf{X}(t) = \int \text{tns}[\mathbf{v}(t)] \mathbf{X}(t) dt. \quad (6)$$

Выражение (6) получают путем обращения операции дифференцирования тензора положения:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{R}} & \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega}\mathbf{R} & \boldsymbol{\Omega}\mathbf{r} + \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega} & \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{r} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \text{tns}(\mathbf{v})\mathbf{X}, \end{aligned}$$

где $\boldsymbol{\Omega}$ — тензор спина.

Дифференцирование тензоров поворота и спина описано в фундаментальном труде [17].

Приведенная схема верхнего уровня системы управления строга, в меру лаконична и достаточна для разработки реализующего ее программного обеспечения, а также допускает

строгое формальное проектирование на оси с целью анализа устойчивости. Отличие ее от классических структурных схем заключается в использовании комплексных линейно-угловых сигналов.

Интерес к методу построения схем такого рода вызывает возможность их применения в широком спектре физико-геометрических задач в отношении систем многих тел, и благодаря использованию аппарата однородных координат, широко распространенному в системах технического зрения, в возможности интеграции с датчиками визуального наблюдения. Метод требует отдельного обсуждения и выглядит достаточно интересным, чтобы его исследование было продолжено в дальнейших работах.

Для проверки теоретических результатов в робототехническом симуляторе Gazebo проведен вычислительный эксперимент по выполнению плоской задачи манипулирования грузом (рис. 6). В схеме установки угловая часть выражения (5) в силу выбранной формы захвата проигнорирована, что соответствует обнулению угловой скорости желаемого управления положением $\dot{\mathbf{Y}}_i$ при подстановке его компонент в уравнение (4).

В эксперименте перед двумя манипуляторами поставили задачу переместить груз по плоской прямоугольной траектории, т. е. проверить работу алгоритма в частном двумерном случае. Для компенсации статической ошибки в регулятор $W_{рег}$ схемы введено интегрирующее звено, что придало ей вид передаточной функции пропорционально-интегрирующего регулятора. В соответствии с оговоренной концепцией подающего управления уставка положения манипуляторов внесена внутрь груза и недостижима для них.

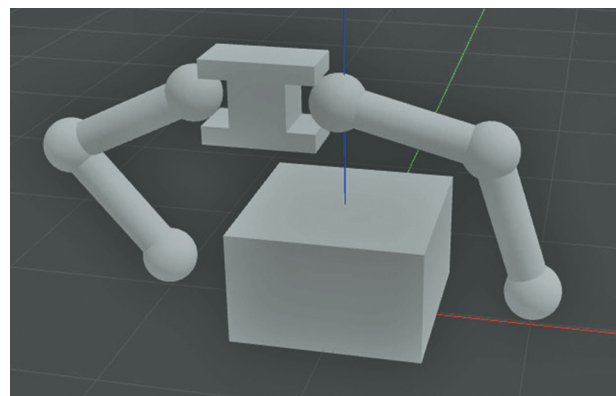


Рис. 6. Модель манипулирования грузом в вычислительном эксперименте

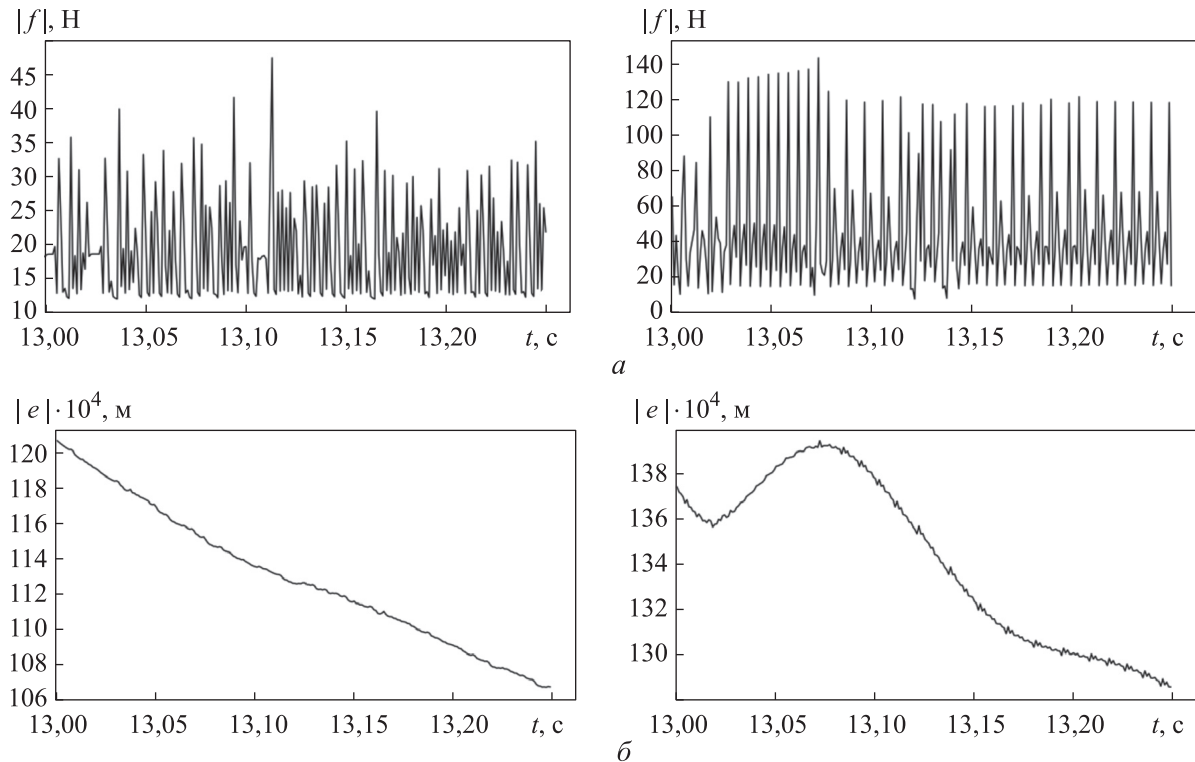


Рис. 7. Зависимости модуля силы, приложенной к грузу манипулятором, $|f|$ (а) и ошибки позиционирования груза $|e|$ (б) от времени t при коэффициенте усиления силовой обратной связи $\eta = 1$ (слева) и 10 (справа)

По результатам эксперимента теоретически предсказанное поведение удалось подтвердить. Несмотря на исходную неустойчивость системы, добавление силовой обратной связи помогло манипуляторам справиться с задачей. При этом поведение модели, как и ожидалось, достаточно сильно зависело от выбранного коэффициента η . При повышении коэффициента η уровень усилий, приложенных к грузу, снижался, а податливость внешним силам возрастала.

Начиная с некоторого уровня η , манипулятор вследствие введенных ограничений на допустимые уровни сигналов, становился настолько податлив внешней силе, что ложился на землю и терял способность выполнить задачу. Понижение коэффициента η приводило к увеличению сжимающих груз усилий и уровня силового шума. При устремлении коэффициента η к нулю система демонстрирует потерю устойчивости.

Небольшой интервал времени, отражающий характерное поведение модуля силы одного из манипуляторов и модуля невязки положения, приведены на рис. 7. Характерный горб на графике положения объясняется тем, что к моменту начала данного интервала не успел закончиться переходный процесс после очередной

смены направления движения груза. Зависимость времени переходного процесса от коэффициента η является особенностью, выявленной в эксперименте.

С одной стороны, высокочастотный силовой шум объясняется избыточной жесткостью модельной системы груз — манипулятор, а с другой, — ставит вопрос о необходимости демпфирования в конструкции захватов манипулятора и внутри самой схемы управления. Способы такого демпфирования исследуются.

Обобщение результатов для групп манипуляторов. Несложно заметить, что схема, приведенная на рис. 5, никак не меняется при увеличении количества манипуляторов. Уравнение статического равновесия неподвижного груза можно записать как

$$0 = \mathbf{F}_{\text{тяж}} + \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i,$$

где $\mathbf{F}_{\text{тяж}}$ и \mathbf{F}_i — вектор силы тяжести и силы i -го манипулятора; N — количество манипуляторов.

Для $N > 2$, как и для $N = 2$, имеем те же самые проблемы хаотического перемещения фазового состояния системы по множеству возможных положений равновесия. Наложение

силовых обратных связей на каждый из манипуляторов ограничит хаотическое движение фазового состояния точно так же, как и для двумерного случая.

Вывод

Проведенный анализ и вычислительный эксперимент показали, что проблема силовых

невязок, возникающая при решении задач группами манипуляторов, естественным образом разрешается при добавлении силовой обратной связи в систему, что соответствует существующей концепции податливого управления. Возникающую статическую ошибку позиционирования груза устраняют методами классической теории управления.

Литература

- [1] Sarkar S., Kar I.N. Formation control of multiple groups of robots. *52nd IEEE Conf. on Decision and Control*, 2013, pp. 1466–1471, doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6760089>
- [2] Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С. и др. Координированное управление группой роботов в задачах перемещения груза. *Вычислительные технологии*, 2016, т. 21, № 1, с. 70–79.
- [3] Лесков А.Г., Морошкин С.Д. Исследование динамики системы управления манипуляционными роботами двустороннего действия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2013, № 2, с. 66–78.
- [4] Kobayashi F., Ikai G., Fukui W. et al. Two-fingered haptic device for robot hand teleoperation. *J. Robot*, 2011, vol. 2011, art. 419465, doi: <https://doi.org/10.1155/2011/419465>
- [5] Серебрянный В.В., Бошняков А.А., Огородник А.И. Импедансное позиционно-силовое управление в роботах и механизмах с кинематическими замкнутыми цепями. *Технологии аддитивного производства*, 2019, т. 1, № 1, с. 24–35.
- [6] Егоров И.Н. *Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами*. Владимир. Изд-во ВлГУ. 2010. 192 с.
- [7] Лесков А.Г., Калеватых И.А. Экспериментальные исследования алгоритмов управления связанным движением двурукого манипуляционного робота. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, № 4, с. 33–43.
- [8] Siciliano B., Khatib O., eds. *Springer handbook of robotics*. Springer. 2008. 1611 p.
- [9] Антонов А.В. *Разработка механизмов параллельной структуры с двигателями, установленными на основании вне рабочей зоны*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва. ИМАШ РАН. 2018. 123 с.
- [10] Глазунов В.А., ред. *Новые механизмы в современной робототехнике*. Москва. Техносфера. 2018. 316 с.
- [11] Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Использование нейронных сетей для прогнозирования нормальных реакций шагающего робота. *Известия Юго-Западного государственного университета*, 2019, т. 23, № 4, с. 8–18, doi: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-8-18>
- [12] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Основы управления манипуляционными роботами*. Москва. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. 480 с.
- [13] Сорокин Ф.Д. Прямое тензорное представление уравнений больших перемещений гибкого стержня с использованием вектора конечного поворота. *Известия РАН. МТТ*, 1994, № 1, с. 164–168.
- [14] Сорокин Н.Ф. Применение тензорных сигналов в системах автоматического управления положением мобильных объектов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, № 1, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2147>
- [15] Голованов Н.Н. *Геометрическое моделирование*. Москва. Физматлит. 2002. 472 с.
- [16] Диментберг Ф.М. *Винтовое исчисление и его приложения к механике*. Москва. Наука. 1965. 200 с.
- [17] Жилин П.А. *Векторы и тензоры второго ранга в трехмерном пространстве*. Санкт-Петербург. Изд-во СПбГТУ. 1992. 276 с.

References

- [1] Sarkar S., Kar I.N. Formation control of multiple groups of robots. *52nd IEEE Conf. on Decision and Control*, 2013, pp. 1466–1471, doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6760089>
- [2] Zolotukhin Yu.N., Kotov K.Yu., Mal'tsev A.S. et al. Coordinated control of the mobile robots group for cargo transportation. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2016, vol. 21, no. 1, pp. 70–79. (In Russ.).
- [3] Leskov A.G., Moroshkin S.D. Studying dynamics of manipulation robot control system with force feedback telepresence. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2013, no. 2, pp. 66–78. (In Russ.).
- [4] Kobayashi F., Ikai G., Fukui W. et al. Two-fingered haptic device for robot hand teleoperation. *J. Robot*, 2011, vol. 2011, art. 419465, doi: <https://doi.org/10.1155/2011/419465>
- [5] Serebrennyy V.V., Boshlyakov A.A., Ogorodnik A.I. Impedance position-force control in robots and mechanisms with kinematic closed chains. *Tekhnologii additivnogo proizvodstva* [Additive Fabrication Technology], 2019, vol. 1, no. 1, pp. 24–35. (In Russ.).
- [6] Egorov I.N. *Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami* [Position-force control on robotics and mechatronic systems]. Vladimir. Izd-vo VIGU Publ., 2010. 192 p. (In Russ.).
- [7] Leskov A.G., Kalevatykh I.A. Experimental studies of algorithms for control of coordinated motion of two-manipulator cooperative system. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2012, no. 4, pp. 33–43. (In Russ.).
- [8] Siciliano B., Khatib O., eds. *Springer handbook of robotics*. Springer. 2008. 1611 p.
- [9] Antonov A.V. *Razrabotka mekhanizmov paralel'noy struktury s dvigatelyami, ustanovlennymi na osnovanii vne rabochey zony*. Diss. kand. tekhn. nauk [Design of parallel mechanisms with engines based out the working zone. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow. IMASH RAN Publ., 2018. 123 p. (In Russ.).
- [10] Glazunov V.A., ed. *Novye mekhanizmy v sovremennoy robototekhnike* [New mechanisms in modern robotics]. Moscow. Tekhnosfera Publ., 2018. 316 p. (In Russ.).
- [11] Savin S.I., Vorochaeva L.Yu. Using neural networks to predict the normal reactions of a walking robot. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwest State University], 2019, vol. 23, no. 4, pp. 8–18, doi: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-8-18> (in Russ.).
- [12] Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* [Fundamentals of control on manipulating robots]. Moscow. Bauman MSTU Publ., 2004. 480 p. (In Russ.).
- [13] Sorokin F.D. Direct tensor representation of the equations of large displacements of a flexible rod using the Euler rotation vector. *Izvestiya RAN. MTT*, 1994, no. 1, pp. 164–168. (In Russ.).
- [14] Sorokin N.F. Tensor signals in automatic positioning control systems for mobile object. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2022, no. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2147> (in Russ.).
- [15] Golovanov N.N. *Geometricheskoe modelirovanie* [Geometric modelling]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 472 p. (In Russ.).
- [16] Dimentberg F.M. *Vintovoe ischislenie i ego prilozheniya k mekhanike* [Theory of screws and its application in mechanics]. Moscow. Nauka Publ., 1965. 200 p. (In Russ.).
- [17] Zhilin P.A. *Vektory i tenzory vtorogo ranga v trekhmernom prostranstve* [Second-rank vectors and tensors in 3D space]. Sankt-Petersburg. Izd-vo SPbGTU Publ., 1992. 276 p. (In Russ.).

Информация об авторах

СОРОКИН Николай Федорович — аспирант. Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии Наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: mirmikns@yandex.ru).

ГАВРЮШИН Сергей Сергеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: gss@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сорокин Н.Ф., Гаврюшин С.С. Использование силовой обратной связи при перемещении груза парой манипуляторов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 1, с. 3–12, doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-3-12

Please cite this article in English as:

Sorokin N.F., Gavryushin S.S. Force Feedback Use When Moving Load by a Pair of Manipulators. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 1, pp. 3–12, doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-3-12

Information about the authors

SOROKIN Nikolay Fedorovich — Postgraduate. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: mirmikns@yandex.ru).

GAVRUSHIN Sergey Sergeevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Computer Systems of Industrial Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gss@bmstu.ru).



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию

«Оборудование для лазерной обработки»

Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров

В монографии рассмотрены инженерно-физические основы построения и функционирования технологических лазеров, применяемых в машиностроении. Даны классификация и описание принципов работы твердотельных и газовых лазеров, их характеристики, показаны особенности эксплуатации, современное состояние и перспективы развития. Большое внимание уделено оптическим системам технологических лазеров. Представлено оборудование для промышленной реализации основных процессов лазерной обработки, в том числе аддитивных лазерных технологий. Описаны методы и средства измерения параметров лазерного излучения.

Изложены вопросы лазерной безопасности и охраны труда.

Для инженерно-технических работников, занимающихся использованием технологических лазеров, а также для студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>