

В.И. ПЕТРЕНКО, Ф.Б. ТЕБУЕВА, М.М. ГУРЧИНСКИЙ,
В.О. АНТОНОВ, А.С. ПАВЛОВ
**ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТРАЕКТОРИИ РУКИ ОПЕРАТОРА
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ПРИ
КОПИРУЮЩЕМ УПРАВЛЕНИИ**

Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Гурчинский М.М., Антонов В.О., Павлов А.С. **Прогнозная оценка траектории руки оператора для решения обратной задачи динамики при копирующем управлении.**

Аннотация. Одной из важнейших задач современной робототехники является разработка роботов для выполнения рутинных, вредных и опасных видов работ без непосредственного участия человека. Несмотря на активное развитие технологий искусственного интеллекта, на данный момент робототехнические системы не способны заменить человека при решении сложных задач в динамической среде. Наиболее перспективными для применения в ближайшее время являются роботы, реализующие копирующий тип управления, или так называемое виртуальное присутствие оператора. Принцип копирующего управления построен на захвате движения удаленно находящегося оператора и формировании управляющих сигналов для приводов робота. Для управления приводами могут использоваться следящие системы или системы на основе планирования движения. Следящие системы более просты, однако системы на основе планирования движения позволяют добиться большей плавности движения и меньшего износа деталей объекта управления. Для реализации управления на основе планирования движения вводится искусственная задержка между движениями оператора и объекта управления для накопления необходимых данных.

Цель исследования — устранение задержки, возникающей при управлении приводами антропоморфного манипулятора на основе решения обратной задачи динамики при копирующем типе управления в масштабе реального времени. Предлагается использовать для планирования движения не измеренные, а прогнозные значения обобщенных координат руки оператора. На основе измеренных значений обобщенных координат руки оператора формируются временные ряды и выполняется их прогнозирование. Прогнозные значения обобщенных координат используются при планировании траектории движения антропоморфного манипулятора и решении обратной задачи динамики. Прогнозирование осуществляется методом линейной регрессии, имеющим относительно малую вычислительную сложность, что является важным критерием для работы системы в масштабе реального времени.

Разработанный математический аппарат позволяет на основе параметров прогнозирования и максимальных допустимых ускорений движения приводов манипулятора найти теоретическую оценку пределов значений ошибки прогнозирования траектории движения руки оператора при использовании предлагаемого подхода для конкретных задач.

Проведенная программная симуляция в среде Matlab подтвердила адекватность полученной теоретической оценки максимального значения ошибки прогнозирования, а также перспективность предлагаемого подхода для проверки на практике.

Ключевые слова: прогнозирование; обратная задача динамики; захват движения; антропоморфный манипулятор; копирующий тип управления; траектория движения руки оператора; виртуальное присутствие.

1. Введение. Огромный интерес для разработчиков робототехнических комплексов представляют интенсивно

развивающиеся безлюдные технологии. Концепция безлюдных технологий заключается в применении роботов для выполнения рутинных, вредных и опасных видов работ без непосредственного участия человека. Автоматизация является залогом безопасности и высокой эффективности решения поставленных задач [1, 2].

Одним из важнейших направлений, развиваемых в рамках безлюдных технологий, являются антропоморфные роботы. Антропоморфные роботы универсальны, так как с физиологической точки зрения обладают функциональностью, наиболее близкой к человеческой. Подобные роботы предназначены в первую очередь для работы в условиях человекоориентированной среды, например в составе космических миссий [3-6]. Наиболее известными антропоморфными роботами, позволяющими выполнять работы в опасных условиях, являются робот Robonaut 2 [5], и российский робот FEDOR, разрабатываемый для выполнения аварийно-спасательных операций на земле и в космосе [6]. Антропоморфные роботы могут работать в различных режимах управления: автоматическом, супервизорном и копирующем.

Автоматическое управление подразумевает полностью самостоятельные действия робота, то есть автономию при принятии решений. Несмотря на активные исследования в области искусственного интеллекта и разработки автономных роботов [7, 8], роботы пока не способны полностью заменить человека при выполнении сложных задач в динамической среде.

Супервизорное управление подразумевает постановку задачи оператором и ее самостоятельное выполнение роботом [9, 10]. При этом используются методы автоматического управления на уровне исполнения решений [11]. В таком режиме могут решаться только штатные задачи, требующие небольшой адаптации под конкретные условия.

На данном этапе развития науки и техники полностью заменить человека при выполнении сложных задач в динамической среде могут только роботы, реализующие удаленное присутствие оператора путем использования копирующего типа управления. В режиме копирующего управления робот повторяет действия оператора, то есть реализуется технология телеоперации, или так называемого удаленного присутствия [12-16].

В настоящей статье рассматривается частная задача удаленного присутствия — управление приводами антропоморфного манипулятора. Для управления приводами манипулятора при копирующем типе управления применяются два подхода.

Первый подход заключается в использовании следящих систем, в которых значение управляющего сигнала зависит от рассогласования

между целевым значением обобщенной координаты манипулятора и реальным значением, измеренным с помощью соответствующих датчиков [17]. Общие сведения о подобных системах приведены в работах [18-19]. Несмотря на простоту реализации и надежность подобных систем, при больших скоростях движения манипулятора вследствие негладкости его движения возникают различные механические вибрации, снижающие точность управления и увеличивающие износ деталей [20]. Поэтому для выполнения сложных работ в экстремальных условиях, когда необходимо выполнение целевых операций на максимальной скорости, становится актуальной проблема повышения точности копирования и снижения износа деталей манипулятора.

Второй подход заключается в предварительном планировании траектории движения манипулятора и расчете необходимых усилий в приводах манипулятора путем решения обратной задачи динамики на основе точной динамической модели манипулятора. Такой подход применяется в мощных манипуляторах, для которых возникновение механических вибраций вследствие негладкости движения может привести к выходу манипулятора из строя [20]. Различные методы решения обратной задачи динамики для этого случая предложены в [21-25]. В [24] рассматривается решение обратной задачи динамики для избыточных манипуляторов, к которым относятся и антропоморфные. Для ускорения решения обратной задачи динамики используют методы параллельных вычислений [25], требующие дополнительных ресурсов.

Второй подход применим, когда законы движения манипулятора по обобщенным координатам заранее известны. В случае же копирующего типа управления законы изменения обобщенных координат формируются в процессе движения в реальном масштабе времени. В условиях неопределенности траектории движения руки оператора может быть внесена искусственная задержка между движениями оператора и манипулятора, в течение которой происходит накопление измеренных значений обобщенных координат руки оператора. Затем на основе накопленных данных на некотором интервале времени система управления манипулятором может осуществить планирование движения и решение обратной задачи динамики для выполнения плавного и точного движения. При работе в экстремальных условиях на максимальных скоростях задержка, возникающая между движениями оператора и движениями манипулятора, может помешать качественному выполнению целевых операций. Таким образом, оба подхода к управлению приводами манипулятора при реализации удаленного присутствия имеют свои

преимущества и недостатки. В данной статье описывается развитие второго подхода путем использования прогнозной оценки траектории движения руки оператора.

2. Материалы и методы. Рассмотрим прогнозирование траектории движения руки оператора на основе обобщенных координат. Данные координаты могут быть непосредственно измерены с помощью задающего устройства в виде экзоскелета [12, 13] либо получены путем захвата движения узловых точек руки оператора с помощью оптических [27], инерционных [28] или магнитных [29] датчиков с последующим решением обратной задачи кинематики.

Пусть задающим устройством используется кинематическая модель руки оператора с m степенями подвижности. Пример такой модели с $m = 7$ степенями подвижности приведен на рисунке 1.

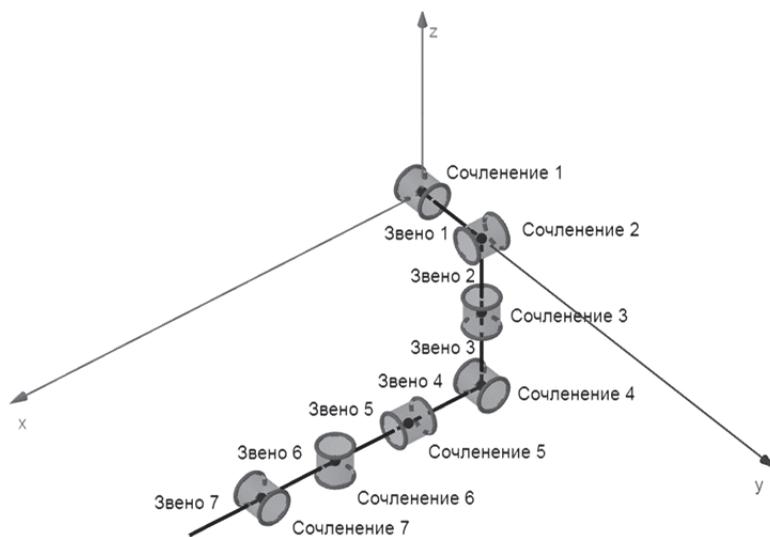


Рис. 1. Кинематическая модель руки оператора с семью степенями подвижности

Входными данными для прогнозирования являются m временных рядов измеренных значений обобщенных координат руки оператора. Для простоты изложения будем рассматривать произвольную обобщенную координату руки оператора. Приводимые рассуждения могут быть распространены на любое число обобщенных координат.

Суть предлагаемого подхода заключается в следующем. Пусть в момент времени t_0 наступает начало очередного цикла планирования

траектории движения руки оператора для решения обратной задачи динамики. Так как планирование траектории согласно предлагаемому подходу выполняется на основе прогнозных значений, длительность каждого подобного цикла планирования равна дальности прогнозирования τ_1 (рисунок 2).

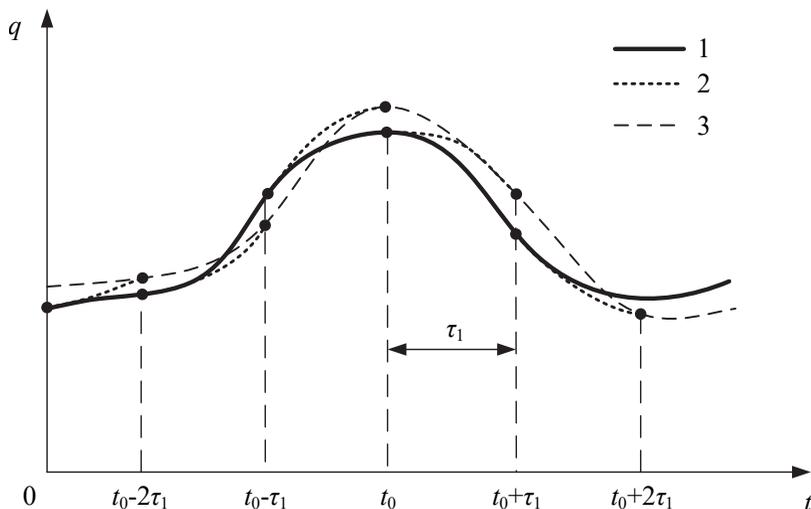


Рис. 2. Траектории движения: 1) руки оператора; 2) прогнозная оценка траектории движения руки оператора; 3) антропоморфного манипулятора

Входными данными является временной ряд $Q = \langle q_i \rangle$ измеренных значений обобщенной координаты q в моменты времени t_i до момента t_0 включительно. Вопросы влияния погрешности измерений на результаты прогнозирования выходят за рамки данной статьи, поэтому будем считать погрешность измерения несущественной. Также известны значения скорости и ускорения обобщенных координат манипулятора в момент t_0 , измеренные с помощью датчиков или найденные косвенным образом (например, с помощью численного дифференцирования / интегрирования). В общем случае текущие значения обобщенных координат манипулятора не совпадают с измеренными значениями обобщенных координат руки оператора, вследствие погрешности следования манипулятора по заданной траектории или ошибки прогнозирования на прошлой итерации для интервала $[t_0 - \tau_1, t_0]$.

Согласно предлагаемому подходу для каждой обобщенной координаты выполняется прогнозирование значений на основе известных элементов временного ряда на дальность прогнозирования τ_1 . Для движения манипулятора выполняется планирование траектории и решение обратной задачи динамики, исходя из условий гладкого перехода из текущей траектории в прогнозную траекторию движения (рисунок 2). Далее осуществляется движение манипулятора на основе решения обратной задачи динамики в течение спрогнозированного интервала времени τ_1 . Затем цикл прогнозирования повторяется.

Временной ряд $Q = \langle q_i \rangle$ является дискретизацией непрерывной функции изменения обобщенной координаты $q(t)$ руки оператора. Поэтому прогнозирование значений обобщенных координат может быть выполнено с использованием трендовых моделей, представляющих собой построение линейной или нелинейной регрессии методом наименьших квадратов.

В статье рассматривается наиболее простой случай — прогнозирование на основе линейной регрессии. При рассмотрении на достаточно малой дальности прогнозирования τ_1 движение руки оператора по обобщенным координатам является практически линейным. В то же время построение линейной регрессии имеет относительно малую временную вычислительную сложность. Поэтому в статье приводится анализ возможности использования линейной регрессии, а также границ ее применимости. Актуальность использования нелинейной регрессии и перечень необходимых для этого дополнительных данных приводятся в разделе «Обсуждение». Для нахождения границ применимости линейной регрессии в качестве способа для прогнозирования в данном разделе проводится теоретическая оценка верхней границы ошибки прогнозирования и далее выполняется проверка полученных выкладок с помощью программной симуляции.

Условимся понимать под ошибкой прогнозирования абсолютную величину разности между прогнозным и реальным значениями обобщенной координаты. Найдем зависимость верхней оценки ошибки прогнозирования Δq_1 от дальности прогнозирования τ_1 . Функция линейной регрессии значений обобщенной координаты руки оператора $q(t)$ может быть найдена с помощью метода наименьших квадратов на основе k последних известных элементов временного ряда Q :

$$\hat{q}(t) = et + f;$$

$$e = \frac{k \sum_{i=1}^k t_i q_i - \sum_{i=1}^k t_i \sum_{i=1}^k q_i}{k \sum_{i=1}^k t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k t_i \right)^2};$$

$$f = \frac{\sum_{i=1}^k q_i - e \sum_{i=1}^k t_i}{k},$$
(1)

где $\hat{q}(t)$ — прогнозные значения рассматриваемой обобщённой координаты; e и f — коэффициенты линейной регрессии.

Очевидно, что значения коэффициентов линейной регрессии e и f зависят от закона изменения обобщённой координаты руки оператора $q(t)$ и периода дискретизации измерений Δt .

Рассмотрим граничный случай, когда $\Delta t \rightarrow 0$, а $k = 2$, то есть когда линия линейной регрессии является касательной к графику зависимости $q(t)$ обобщённых координат руки оператора от времени t .

Чтобы манипулятор мог двигаться синхронно с рукой оператора, значения скорости и ускорения обобщённых координат не должны превышать максимально допустимых значений, которые могут развивать приводы манипулятора. Таким образом, прогнозирование может быть использовано для устранения задержки только в тех случаях, когда при движении руки оператора выполняются следующие условия:

$$q_{\min} \leq q(t) \leq q_{\max};$$
(2)

$$|\dot{q}(t)| \leq v_{\max};$$
(3)

$$|\ddot{q}(t)| \leq a_{\max},$$
(4)

где q_{\min} и q_{\max} — конструктивные ограничения, накладываемые на минимальное и максимальное значение обобщённой координаты, соответственно; v_{\max} — максимальное допустимое значение скорости изменения обобщённой координаты; a_{\max} — максимальное допустимое значение ускорения изменения обобщённой координаты.

Уравнение линейной регрессии, составленное для обобщённой координаты, описывает равномерное движение. Максимальное отклонение прогнозных значений от реальных будет

наблюдаться при движении руки оператора с максимальным ускорением. Для нахождения верхней оценки ошибки прогнозирования в качестве закона изменения рассматриваемой обобщенной координаты может быть выбрано движение с максимальным по абсолютному значению, а значит постоянным ускорением. Такое движение описывается уравнением:

$$q(t) = at^2 + bt + c, \quad (5)$$

где a , b и c — коэффициенты квадратного трехчлена, моделирующего равноускоренное движение.

Для определенности примем, что движение осуществляется с максимальным по абсолютному значению и положительным ускорением. Тогда в момент времени t_0 выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} q(t_0) &= at_0^2 + bt_0 + c = \hat{q}(t_0) = e(t_0)t_0 + f(t_0), \\ \dot{q}(t_0) &= 2at_0 + b = \dot{\hat{q}}(t_0) = e(t_0). \end{aligned} \quad (6)$$

Первое уравнение в (6) следует из условия непрерывности движения руки оператора, второе — из геометрического смысла касательной, которая совпадает с линией регрессии.

В силу того, что ускорение движения руки оператора положительно, график движения является выпуклым вниз и величина ошибки прогнозирования может быть найдена как разность между измеренным значением обобщенной координаты руки оператора и ее прогнозным значением в момент $t_0 + \tau_1$:

$$\begin{aligned} \Delta q_1(t_0, \tau_1) &= q(t_0 + \tau_1) - \hat{q}(t_0 + \tau_1) = \\ &= a(t_0 + \tau_1)^2 + b(t_0 + \tau_1) + c - e(t_0)(t_0 + \tau_1) - f(t_0) = a\tau_1^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Delta q_1(t_0, \tau_1)$ — зависимость величины ошибки прогнозирования от момента выполнения прогнозирования t_0 и дальности прогнозирования τ_1 .

Коэффициент a в уравнении (5) может быть найден из условия движения с максимальным ускорением:

$$\begin{aligned} \ddot{q}(t) &= 2a = a_{max}, \\ a &= \frac{a_{max}}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, независимо от конкретной формы графика закона движения руки оператора по рассматриваемой обобщенной координате, величина ошибки прогнозирования для дальности прогнозирования τ_1 будет лежать в диапазоне:

$$\Delta q_1(\tau_1) \in \left[-\frac{a_{\max} \tau_1^2}{2}; \frac{a_{\max} \tau_1^2}{2} \right]. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет теоретически оценить применимость линейной регрессии исходя из величины максимально допустимого ускорения и необходимой дальности прогнозирования для условий конкретной задачи.

Полученная величина погрешности найдена для идеальной касательной, проведенной к графику закона движения в момент выполнения прогнозирования. При работе в реальных условиях данная касательная не может быть найдена точно вследствие погрешностей и дискретности измерений. Найдем верхнюю оценку величины ошибки прогнозирования с учетом того, что линия регрессии, построенная на реальных значениях, не совпадает с касательной, проведенной к закону движения в момент времени t_0 .

Для реализации непрерывности движения наложим на линию регрессии условие ее прохождения через последнюю известную точку временного ряда Q . Аналогично предыдущему идеализированному случаю наибольшая разность между реальным и прогнозным значениями обобщенной координаты будет наблюдаться при движении с максимальным ускорением, описываемым уравнением (5). В таком случае линия регрессии будет лежать между идеализированной касательной, рассмотренной выше, и секущей, проведенной через первую и последнюю точки подмножества элементов временного ряда, участвующих в формировании уравнения регрессии (рисунок 3). Для нахождения верхней оценки ошибки прогнозирования в качестве линии регрессии будем рассматривать ее граничное положение, соответствующее секущей, приведенной на рисунке 3. Данный случай соответствует количеству элементов $k=2$ в выборке для построения регрессии и ненулевому периоду дискретизации измерений $\Delta t \neq 0$.

Уравнение касательной, проведенной к графику закона движения руки оператора в точке t_0 , имеет вид:

$$\begin{aligned}\hat{q}(t_0, t) &= e(t_0)t + f(t_0); \\ e(t_0) &= 2at_0 + b; \\ f(t_0) &= -at_0^2 + c,\end{aligned}\quad (10)$$

где $\hat{q}(t_0, t)$ — линия прогнозных значений, соответствующая касательной, проведенной к графику закона движения в момент времени t_0 ; $e(t_0)$ и $f(t_0)$ — коэффициенты касательной; a , b и c — коэффициенты закона движения в уравнении (5).

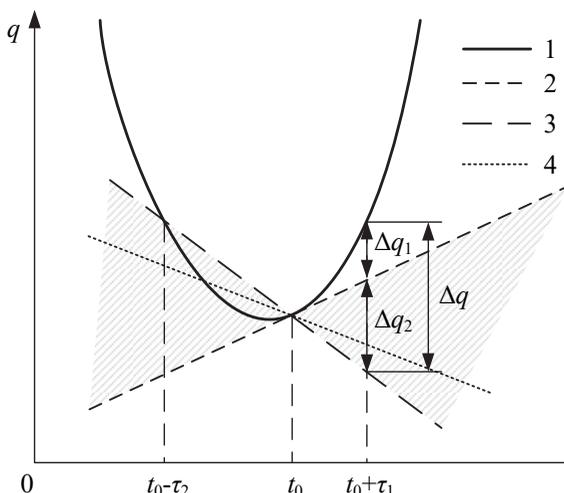


Рис. 3. Область возможного расположения линии регрессии: 1) закон движения руки оператора; 2) касательная к закону движения, проведенная в момент t_0 ; 3) секущая, проведенная через первую и последнюю точку выборки, участвующей в формировании линии регрессии; 4) линия регрессии

Уравнение секущей может быть найдено следующим образом:

$$\begin{aligned}q_s(t_0, \tau_2, t) &= p(t_0, \tau_2)t + l(t_0, \tau_2); \\ p(t_0, \tau_2) &= \frac{q(t_0) - q(t_0 - \tau_2)}{\tau_2} = \frac{2at_0\tau_2 - a\tau_2^2 + b\tau_2}{\tau_2} = 2at_0 - a\tau_2 + b; \\ l(t_0, \tau_2) &= q(t_0) - p(t_0, \tau_2)t_0 = -at_0^2 + a\tau_2 t_0 + c,\end{aligned}\quad (11)$$

где $q_s(t_0, \tau_2, t)$ — уравнение секущей; $p(t_0, \tau_2)$ и $l(t_0, \tau_2)$ — коэффициенты уравнения секущей; τ_2 — длительность интервала

времени между первым и последним измерениями в выборке для построения регрессии (рисунок 3).

Величина разности между прогнозными значениями при прогнозировании с помощью касательной и секущей линий для дальности прогнозирования τ_1 составит:

$$\begin{aligned} \Delta q_2(t_0, \tau_1, \tau_2) = & e(t_0)(t_0 + \tau_1) + f(t_0) - \\ & - p(t_0, \tau_2)(t_0 + \tau_1) + l(t_0, \tau_2) = a\tau_1\tau_2, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\Delta q_2(t_0, \tau_1, \tau_2)$ — зависимость величины ошибки прогнозирования от момента выполнения прогнозирования t_0 , дальности прогнозирования τ_1 и длительности интервала времени между первым и последним измерениями в выборке для построения регрессии τ_2 .

Верхняя оценка полного значения ошибки прогнозирования может быть вычислена как сумма ошибок прогнозирования, найденных с помощью формул (7) и (12):

$$\begin{aligned} \Delta q(t_0, \tau_1, \tau_2) = & \Delta q_1(t_0, \tau_1) + \Delta q_2(t_0, \tau_1, \tau_2) = \\ & = a\tau_1^2 + a\tau_1\tau_2 = a(\tau_1^2 + \tau_1\tau_2). \end{aligned} \quad (13)$$

Путем выбора значений параметров a , τ_1 и τ_2 можно добиться компромисса между требуемым ускорением движения и допустимой ошибкой прогнозирования. В разделе «Результаты» показано, что данная оценка завышена и при применении линейной регрессии к реальному движению величина ошибки прогнозирования в разы меньше.

3. Результаты. Для оценки эффективности предложенного подхода к решению обратной задачи динамики с использованием прогнозной оценки траектории движения руки оператора была разработана имитационная модель в среде Matlab/Simulink с применением библиотеки Simscape Multibody. Имитационная модель включает в себя антропоморфный манипулятор с $m = 7$ степенями подвижности и сферический целевой предмет, расположенный за прямоугольным препятствием на краю стола. Манипулятор является моделью руки оператора, необходимой для получения тестовых законов движения по обобщенным координатам. Полученные законы движения используются в качестве входных данных для программной симуляции работы предложенного подхода. Задачей движения является взятие целевого предмета в обход препятствия. Раскадровка движения модели руки оператора приведена на рисунке 4.

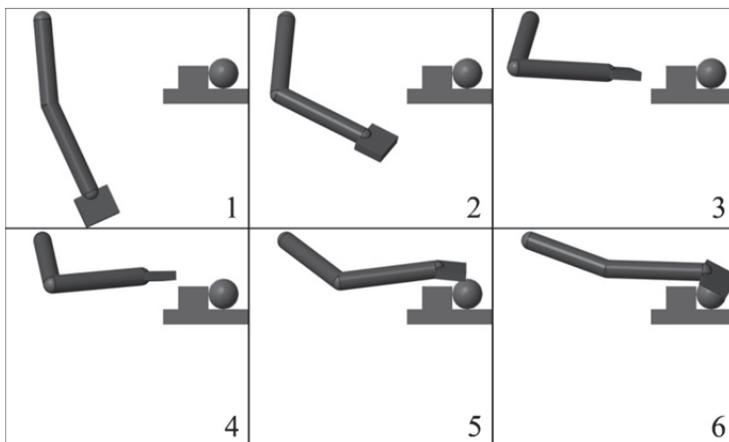


Рис. 4. Раскадровка движения модели руки оператора при выполнении целевой операции

Для получения законов движения руки оператора найдены промежуточные положения, через которые должна пройти рука оператора при выполнении целевой операции. Затем с помощью интерполяции кубическими сплайнами получены законы движения по всем степеням подвижности, представленные на рисунке 5.

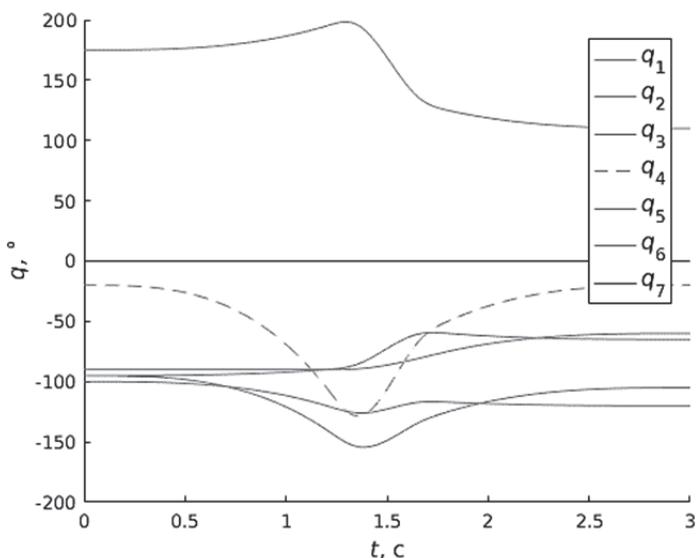


Рис. 5. Законы движения руки оператора по обобщенным координатам

Скорости и ускорения изменения обобщенных координат приведены на рисунках 6 и 7 соответственно.

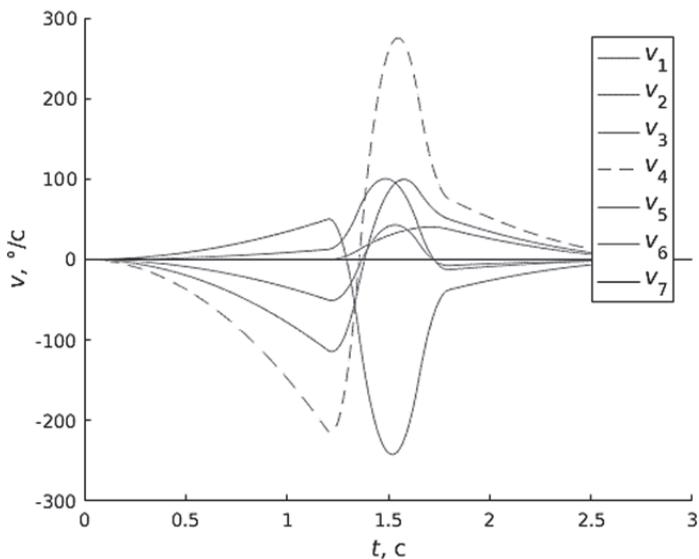


Рис. 6. Скорости изменения обобщенных координат

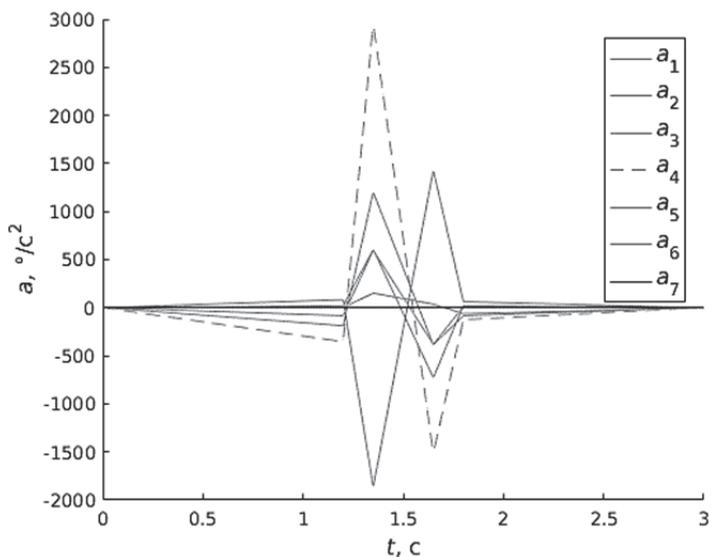


Рис. 7. Ускорения изменения обобщенных координат

В качестве объекта для прогнозирования рассмотрим закон движения по четвертой обобщенной координате (q_4 на рисунке 5) вследствие его наибольшей нелинейности. Как следует из рисунка 7, значение мгновенного ускорения изменения данной координаты максимально.

Исследуем зависимость величины ошибки прогнозирования Δq_1 от дальности прогнозирования τ_1 при использовании идеализированной линейной регрессии, построенной в момент осуществления прогнозирования и являющейся касательной к графику закона движения.

В ходе эксперимента траектория движения была разбита на 1000 промежуточных положений, для каждого из которых выполнено прогнозирование на различную дальность прогнозирования τ_1 . Для каждой дальности прогнозирования было найдено наибольшее значение ошибки прогнозирования. Результаты симуляции и верхняя оценка ошибки прогнозирования, найденная по формуле (7), представлены на рисунке 8. В качестве максимально допустимого ускорения принято максимальное ускорение в течение всего движения $a_{max} = 3,0 \cdot 10^3 \text{ }^\circ / \text{c}^2$. Как видно из рисунка 8, экспериментальное значение погрешности не превышает значения оценки, рассчитанного по формуле (7).

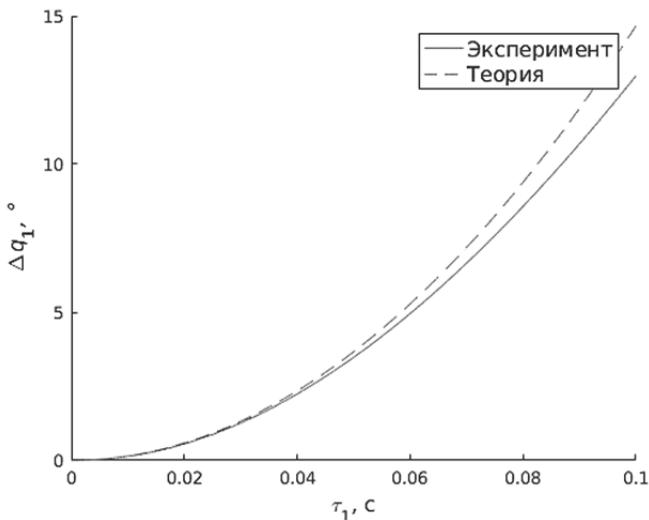


Рис. 8. Зависимость ошибки прогнозирования Δq_1 от дальности прогнозирования τ_1

Для нахождения зависимости величины ошибки Δq_1 от максимального ускорения a_{max} в течение движения выполним масштабирование закона движения по оси времени. При этом увеличатся максимальные значения скорости и ускорения, что приведет к увеличению ошибки прогнозирования. Результаты соответствующей симуляции для дальности прогнозирования $\tau_1 = 0,1c$ приведены на рисунке 9. Как следует из графиков, величина фактической ошибки не превышает величину теоретической оценки.

По аналогии с двумя предыдущими симуляциями исследуем зависимость величины ошибки прогнозирования Δq_2 от длительности временного интервала τ_2 при $a_{max} = 3,0 \cdot 10^3 \text{ } ^\circ / c^2$, и величины максимального ускорения a_{max} при $\tau_1 = 0,1c$ и $\tau_2 = 0,1c$. Результаты соответствующих симуляций приведены на рисунках 10 и 11.

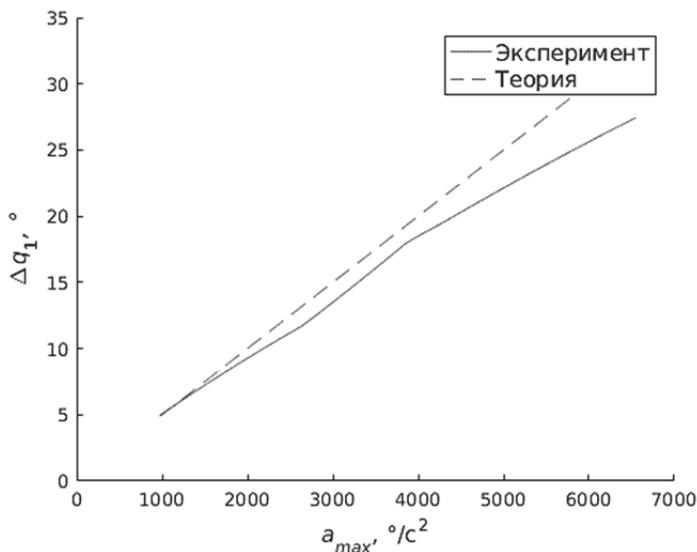


Рис. 9. Зависимость ошибки прогнозирования Δq_1 от величины максимального ускорения a_{max}

По аналогии с двумя предыдущими симуляциями исследуем зависимость величины ошибки прогнозирования Δq_2 от длительности временного интервала τ_2 при $a_{max} = 3,0 \cdot 10^3 \text{ } ^\circ / c^2$, и величины

максимального ускорения a_{max} при $\tau_1 = 0,1c$ и $\tau_2 = 0,1c$. Результаты соответствующих симуляций приведены на рисунках 10 и 11.

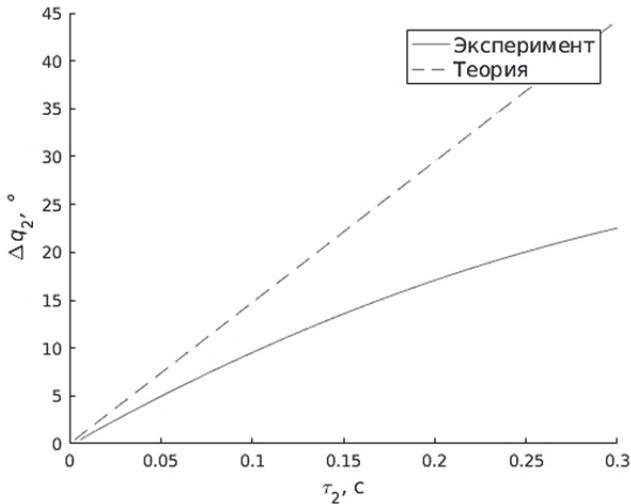


Рис. 10. Зависимость величины ошибки прогнозирования Δq_2 от длительности интервала τ_2

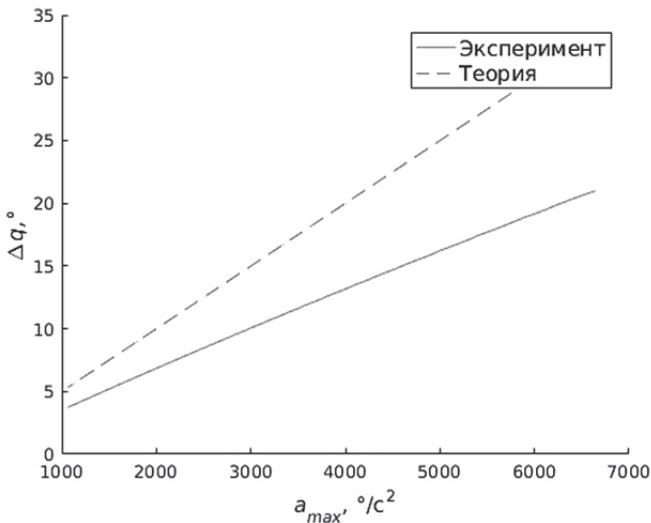


Рис. 11. Зависимость величины ошибки прогнозирования Δq_2 от максимального ускорения a_{max}

Из графиков на рисунках 10 и 11 видно, что реальное значение величины ошибки не превышает теоретической оценки. График изменения величины полной ошибки прогнозирования Δq в течение тестового движения при $a_{max} = 3,0 \cdot 10^3 \text{ }^\circ / \text{c}^2$, $\tau_1 = 0,05 \text{ c}$ и $\tau_2 = 0,1 \text{ c}$ приведен на рисунке 12.

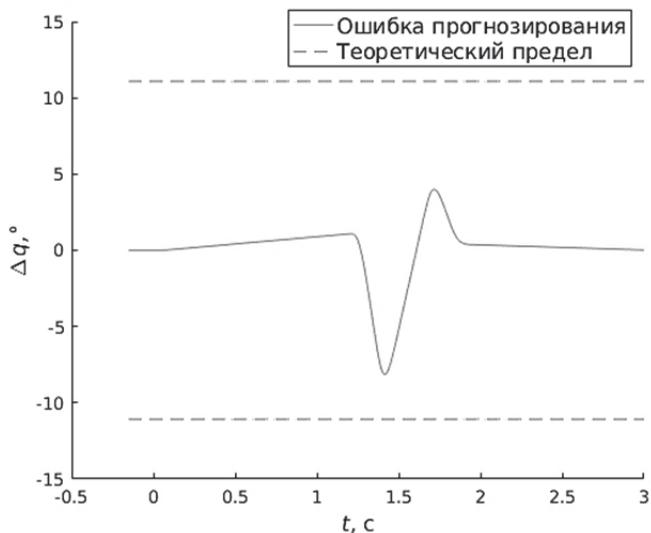


Рис. 12. Изменение величины полной ошибки прогнозирования Δq в течение тестового движения

Как следует из графика на рисунке 12, ошибка прогнозирования максимальна на среднем участке движения и практически отсутствует на начальном и конечном. Таким образом, предложенный подход позволяет получить относительно точную прогнозную оценку на крайних участках движения, то есть при выполнении непосредственно целевых операций. Менее точная оценка получается на среднем участке движения. Требования по точности прогнозирования на данном участке движения могут быть снижены, так как на нем не выполняются целевые операции, а осуществляется только перемещение между областями пространства, в которых выполняются целевые операции.

4. Заключение. Для устранения задержки, возникающей при управлении приводами антропоморфного манипулятора на основе решения обратной задачи динамики при копирующем типе управления в масштабе реального времени, предложено использование прогнозной

оценки обобщенных координат руки оператора вместо их измеренных значений. Законы изменения обобщенных координат являются непрерывными функциями времени, поэтому для выполнения прогнозирования предложено использовать трендовые модели.

Наименьшую вычислительную сложность имеет линейная регрессия, возможность применения которой рассмотрена в данной статье. В ходе выполнения исследования была найдена теоретическая зависимость оценки верхней границы величины ошибки прогнозирования от различных параметров используемого метода прогнозирования и ограничений, накладываемых на движение оператора.

Для подтверждения полученных результатов была выполнена программная симуляция движения руки оператора. Полученные с ее помощью результаты свидетельствуют об эффективности предложенного подхода к решению обратной задачи динамики на основе прогнозной оценки траектории движения руки оператора и адекватности найденной теоретической оценки значения верхнего предела ошибки прогнозирования.

Полученные в ходе симуляции реальные значения ошибки прогнозирования траектории (максимальное значение $4,0^\circ$) для тестового движения руки оператора не превышают максимального теоретического значения $\Delta q = 11,1^\circ$, определяемого формулой (13), что подтверждает ее адекватность. Квадратичный рост теоретической оценки величины ошибки прогнозирования с увеличением дальности прогнозирования позволяет использовать метод линейной регрессии только для краткосрочного прогнозирования.

Исследование величины реальной ошибки прогнозирования с помощью симуляции показало, что при применении линейной регрессии ее значение относительно невелико в начале и в конце тестового движения, и значительно больше в его середине. Так как взаимодействие с объектами окружающего мира выполняется на начальном и конечном участках движения, предложенный подход имеет предпосылки для проверки его применимости на практике.

В данной работе для прогнозирования использована линейная регрессия вследствие ее относительно низкой временной вычислительной сложности, что необходимо для систем реального времени. Особенностью линейной регрессии является ее нечувствительность к природе происхождения входных данных. Анализируемые в статье законы движения руки оператора получены с помощью интерполяции кубическими сплайнами. Таким образом, при прогнозировании с помощью нелинейной регрессии в виде кубического полинома могла быть получена нулевая ошибка прогнозирования, что

было бы несправедливо для работы в реальных условиях. Полученная теоретическая оценка пределов ошибки прогнозирования справедлива для любого движения при условии ограничения максимальных ускорений изменения обобщенных координат.

Для дальнейшего развития предложенного метода решения обратной задачи динамики на основе прогнозных значений необходимо проведение исследований эффективности различных методов прогнозирования на наборе входных данных, полученных с помощью реальных задающих устройств для среднесрочного прогнозирования (дальность которого имеет величину, сравнимую с длительностью отдельного движения оператора).

Литература

1. *Kiyani M.N., Khan M.U.M.* A prototype of search and rescue robot // Proceedings of 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI). 2016. pp. 208–213.
2. *de Greeff J. et al.* Persistent Robot-Assisted Disaster Response // Companion of ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. 2018. pp. 99–100.
3. *Сохин И.Г. и др.* Эргономическое исследование дистанционного взаимодействия космонавтов с антропоморфными роботами-помощниками // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3(12). С. 18–22.
4. *Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Сычков В.Б.* Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе // Пилотируемые полеты в космос. 2012. № 1(3). С. 78–84.
5. *Diffler M.A., Ambrose R.O.* Robonaut: A Robotic Astronaut Assistant // Proceeding of the 6-th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS. 2001. 8 p.
6. Фёдор (робот). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%91%D0%B4%D0%BE%D1%80_\(%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%91%D0%B4%D0%BE%D1%80_(%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82)). (дата обращения: 27.07.2018).
7. *Richert A., Müller S., Schröder S., Jeschke S.* Anthropomorphism in social robotics: empirical results on human-robot interaction in hybrid production workplaces // AI and Society. 2018. vol 33. no. 3. pp. 413–424.
8. *Garcia S. et al.* An Architecture for Decentralized, Collaborative, and Autonomous Robots // Proceedings of IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA). 2018. pp. 75–84.
9. *Страшинов Е.В., Торгашев М.А.* Супервизорное управление антропоморфными роботами с применением инверсной кинематики // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн. Материалы международной научно-практической конференции. 2017. С. 186–190.
10. *Макарычев В.П., Юревич Е.И.* Супервизорное управление космическими манипуляторами // СПб.: Астерион. 2005. 106 с.
11. *Антонов В.О., Гурчинский М.М., Петренко В.И., Тебеева Ф.Б.* Метод планирования оптимальной траектории движения трехзвennого манипулятора в объемном пространстве с препятствием // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. № 45(1). С. 98–112.
12. Андроидная Техника, НПО. URL: <http://www.robogeek.ru/companies/androidnaya-tehnika> (дата обращения: 27.07.2018).

13. *Chen C.W., Hong R.M., Wang H.Y.* Design of a Controlled Robotic Arm // Proceedings of 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD). 2016. pp. 22–23.
14. *Ibhar N., Flores W., Leon R.* Design of a low-cost teleoperated robotic arm: Assembly and performance testing // Proceedings of IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN). 2017. pp. 1–5.
15. *Petrenko V.I. et al.* Calculating rotation angles of the operator's arms based on generalized coordinates of the master device with following anthropomorphic manipulator in real time // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. vol. 9(1). pp. 447–461.
16. *Tan K.K., Putra A.S.* Control System in Servo Drives // Advances in industrial control. 2011. 197 p.
17. *Kazantsev V.P., Dadenkov D.A.* Position-servo drives with finite control // Proceedings of Russian Electrical Engineering. 2015. vol. 86. no. 6. pp. 344–349.
18. *Botan C., Ostafi F.* Optimal control of a servo drive system with variable torque // Proceedings of 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). 2017. pp. 500–505.
19. *Gasparetto A., Boscariol P., Lanzutti A., Vidoni R.* Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview // Motion and operation planning of robotic systems. 2015. pp. 3–27.
20. *Muller A.* Recursive second-order inverse dynamics for serial manipulators // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. pp. 2483–2489.
21. *Bajodah A.* Asymptotic robot manipulator generalized inverse dynamics // Nonlinear Dynamics and Systems Theory. 2013. vol. 13. no. 1. pp. 25–46.
22. *Liu T., Gao F., Zhao X., Qi C.* Inverse Dynamics of a 6-DOF Decoupling Manipulator // Proceedings of ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2014. 9 p.
23. *De La Cruz J.S., Kulic D., Owen W.* Learning inverse dynamics for redundant manipulator control // Proceedings of Autonomous and Intelligent Systems (AIS). 2010. pp. 1–6.
24. *Fijany A., Bejczy A.K.* Parallel computation of manipulator inverse dynamics // Journal of Robotic Systems. 1991. vol. 8. no. 5. pp. 599–635.
25. *Lee C.S.G.* Parallel algorithms and architectures for inverse dynamics computation // Parallel Computation Systems for Robotics. 1992.
26. *Megalingam R.K., Vivek G.V., Bandyopadhyay S., Rahi M.J.* Robotic arm design, development and control for agriculture applications // Proceedings of 2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). 2017. pp. 1–7.
27. *Fang B., Sun F., Liu H., Yao G.* Robotic teleoperation systems using a wearable multimodal fusion device // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. vol. 14. no. 4. pp. 1–11.
28. *Bluethmann W., Ambrose R., Diffler M., Askew S.* Robonaut: A robot designed to work with humans in space // Autonomous Robots. 2003. vol. 14. no. 2-3. pp. 179–197.

Петренко Вячеслав Иванович — к-т техн. наук, доцент, заведующий кафедрой организации и технологии защиты информации института информационных технологий и телекоммуникаций, Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: системы защиты информации, позиционно-траекторные задачи управления антропоморфными манипуляторами, арифметические операции в конечных полях, синтез дискретных последовательностей, системы связи. Число научных публикаций — 241. vip.petrenko@gmail.com, <http://www.ncfu.ru/spisok-sotrudnikov/1041-petrenko-vyacheslav-ivanovich.html>; пр-т Кулакова, 2, Ставрополь, 355029; р.т.: +7(8652)94-42-36.

Тебуева Фариза Биляловна — д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и компьютерной безопасности, института информационных технологий и телекоммуникаций, Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: моделирование неопределенностей, анализ и прогнозирование временных рядов, многокритериальные задачи на графах, позиционно-траекторные задачи управления антропоморфными манипуляторами. Число научных публикаций — 102. fariza.teb@gmail.com, <http://www.ncfu.ru/spisok-sotrudnikov/1424-tebueva-fariza-bilyalovna.html>; пр-т Кулакова, 2, Ставрополь, 355029; р.т.: +7(8652)94-41-90.

Гурчинский Михаил Михайлович — аспирант кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности института информационных технологий и телекоммуникаций, Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: позиционно-траекторные задачи управления антропоморфными манипуляторами. Число научных публикаций — 5. gurmikhail@yandex.ru; пр-т Кулакова, 2, Ставрополь, 355029; р.т.: +7(8652)94-41-90.

Антонов Владимир Олегович — старший преподаватель аспирант кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, института информационных технологий и телекоммуникаций, Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: позиционно-траекторные задачи управления антропоморфными манипуляторами. Число научных публикаций — 26. ant.vl.02@gmail.com; пр-т Кулакова, 2, Ставрополь, 355029; р.т.: +7(8652)94-41-90.

Павлов Андрей Сергеевич — аспирант кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности института информационных технологий и телекоммуникаций, Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: позиционно-траекторные задачи управления антропоморфными манипуляторами. Число научных публикаций — 6. andrew.pavlov.2015@yandex.ru; пр-т Кулакова, 2, Ставрополь, 355029; р.т.: +7(8652)94-41-90.

Поддержка исследований. Исследование выполнено в рамках реализации научного проекта по теме «Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики» в рамках ФЦПР 2014-2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

V.I. PETRENKO, F.B. TEBUEVA, M.M. GURCHINSKIY, V.O. ANTONOV,
A.S. PAVLOV

PREDICTIVE ASSESSMENT OF OPERATOR'S HAND TRAJECTORY WITH THE COPYING TYPE OF CONTROL FOR SOLUTION OF THE INVERSE DYNAMIC PROBLEM

Petrenko V.I., Tebueva F.B., Gurchinskiy M.M., Antonov V.O., Pavlov A.S. **Predictive Assessment of Operator's Hand Trajectory with the Copying Type of Control for Solution of the Inverse Dynamic Problem.**

Abstract. The most important task of modern robotics is the development of robots to perform the work in potentially dangerous fields which can cause the risk to human health. Currently robotic systems can not become a full replacement for man for solving complex problems in a dynamic environment despite an active development of artificial intelligence technologies.

The robots that implement the copying type of control or the so-called virtual presence of the operator are the most advanced for use in the nearest future. The principle of copying control is based on the motion capture of the remote operator and the formation of control signals for the robot's drives. A tracking system or systems based on movement planning can be used to control the drives. The tracking systems are simpler, but systems based on motion planning allow to achieve more smooth motion and less wear on the parts of the control object. An artificial delay between the movements of the operator and the control object for necessary data collection is used to implement the control-based motion planning.

The aim of research is a reduction of delay, which appears when controlling the anthropomorphic manipulator drives based on the solution of the inverse dynamic problem, when real time copying type of control is used. For motion path planning it is proposed to use forecast values of the generalized coordinates for manipulator. Based on the measured values of the generalized coordinates of the operator's hand, time series are formed and their prediction is performed. Predictive values of generalized coordinates are used in planning the anthropomorphic manipulator trajectory and solving the inverse dynamic problem. Prediction is based on linear regression with relatively low computational complexity, which is an important criterion for the system operation in the real time operation mode. The developed mathematical apparatus, based on prediction parameters and maximum permissible accelerations of the manipulator drives, allows to find a theoretical estimate of error values limits for planning the operator's hand trajectory using the proposed approach for specific tasks. The adequacy of the maximum theoretical value of the prediction error, as well as the prospects of the proposed approach for testing in practice is confirmed by the software simulation in Matlab environment.

Keywords: Prediction, Inverse Dynamic Problem, Motion Capture, Anthropomorphic Manipulator, Copying Type of Control, The Operator's Hand Trajectory, Virtual Presence.

Petrenko Vyacheslav Ivanovich — Ph.D., Associate Professor, Head of the Organization and Technology of Information Security Department of Institute of Information Technologies and Telecommunications, North-Caucasus Federal University. Research interests: Information Security Systems, Position-Trajectory Control of Anthropomorphic Manipulators, Arithmetic Operations in Finite Fields, Synthesis of Discrete Sequences, Communication Systems. The number of publications — 241. vip.petrenko@gmail.com, <http://www.ncfu.ru/spisok-sotrudnikov/1041-petrenko-vyacheslav-ivanovich.html>; 2, pr. Kulakova, Stavropol, 355029, Russia; office phone: +7(8652)94-42-36.

Tebueva Fariza Bilyalovna — Ph.D., Dr. Sci., Associate Professor, Head of the Applied Mathematics and Computer Security Department of Institute of Information Technologies and Telecommunications, North-Caucasus Federal University. Research interests: Modeling of Uncertainties, Analysis and Forecasting of Time Series, Multicriteria Problems on Graphs, Position-Trajectory Control of Anthropomorphic Manipulators. The number of publications — 102. fariza.teb@gmail.com, <http://www.ncfu.ru/spisok-sotrudnikov/1424-tebueva-fariza-bilyalovna.html>; 2, pr. Kulakova, Stavropol, 355029, Russia; office phone: +7(8652)94-41-90.

Gurchinsky Mikhail Mikhailovich — Ph.D. student of Applied Mathematics and Computer Security Department of Institute of Information Technologies and Telecommunications, North-Caucasus Federal University. Research interests: Position-Trajectory Control of Anthropomorphic Manipulators. The number of publications — 5. gurcmikhail@yandex.ru; 2, pr. Kulakova, Stavropol, 355029, Russia; office phone: +7(8652)94-41-90.

Antonov Vladimir Olegovich — Senior Lecturer of the Applied Mathematics and Computer Security Department of Institute of Information Technologies and Telecommunications, North-Caucasus Federal University. Research interests: Position-Trajectory Control of Anthropomorphic Manipulators. The number of publications — 26. ant.vl.02@gmail.com; 2, pr. Kulakova, Stavropol, 355029, Russia; office phone: +7(8652)94-41-90.

Pavlov Andrey Sergeevich — Ph.D. student of Applied Mathematics and Computer Security Department of Institute of Information Technologies and Telecommunications, North-Caucasus Federal University. Research interests: Position-Trajectory Control of Anthropomorphic Manipulators. The number of publications — 6. andrew.pavlov.2015@yandex.ru; 2, pr. Kulakova, Stavropol, 355029, Russia; office phone: +7(8652)94-41-90.

Acknowledgements. This research is supported by the scientific project «Development of the software and hardware system of the control system based on the solution of the inverse problem of dynamics and kinematics» in the Federal Target Program 2014-2020 (unique identifier RFMEFI57517X0166) with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

References

1. Kiyani M.N., Khan M.U.M. A prototype of search and rescue robot. Proceedings of 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI). 2016. pp. 208–213.
2. de Greeff J. et al. Persistent Robot-Assisted Disaster Response. Companion of ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. 2018. pp. 99–100.
3. Sohin I.G. et al. [Ergonomic study of remote interaction of astronauts with anthropomorphic helper robots]. *Robototekhnika i tehniceskaja kibernetika – Robotics and technical cybernetics*. 2016. vol. 3(12). pp. 18–22. (In Russ.).
4. Bogdanov A.A., Kutlubaev I.M., Sychkov V.B. [Prospects for the creation of anthropomorphic robotic systems for work in space] *Pilotiruemye poley v kosmos – Manned space flight*. 2012. vol. 1 (3). pp. 78–84. (In Russ.).
5. Diffler M.A., Ambrose R.O. Robonaut: A Robotic Astronaut Assistant. Proceeding of the 6-th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS. 2001. 8 p.
6. Fedor (robot) [Fedor (robot)]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%91%D0%B4%D0%BE%D1%80_\(%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%91%D0%B4%D0%BE%D1%80_(%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82)). (accessed: 27.07.2018). (In Russ.).

7. Richert A., Müller S., Schröder S., Jeschke S. Anthropomorphism in social robotics: empirical results on human-robot interaction in hybrid production workplaces. *AI and Society*. 2018. vol 33. no. 3. pp. 413–424.
8. Garcia S. et al. An Architecture for Decentralized, Collaborative, and Autonomous Robots. Proceedings of IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA). 2018. pp. 75–84.
9. Strashnov E.V., Torgashev M.A. [Supervision control of anthropomorphic robots using inverse kinematics]. *Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj dizajn: Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Virtual modeling, prototyping and industrial design: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference]. 2017. pp. 186–190. (In Russ.).
10. Makarychev V.P., Yurevich E.I. *Supervizornoe upravlenie kosmicheskimi manipulatorami* [Supervisory control of space manipulators]. SPb.: Asterion. 2005. 106 p. (In Russ.).
11. Antonov V.O., Gurchinskij M.M., Petrenko V.I., Tebueva F.B. [The method of planning the optimal trajectory of the three-link manipulator in the volumetric space with an obstacle]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tehničeskije nauki – Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2018. vol. 45(1). pp. 98–112. (In Russ.).
12. Androidnaja Tehnika, NPO [Android Technology, NGO]. Available at: <http://www.robo geek.ru/companies/androidnaya-tehnika> (accessed 27.07.2018). (In Russ.).
13. Chen C.W., Hong R.M., Wang H.Y. Design of a Controlled Robotic Arm. Proceedings of 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD). 2016. pp. 22–23.
14. Ibar N., Flores W., Leon R. Design of a low-cost teleoperated robotic arm: Assembly and performance testing. Proceedings of IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN). 2017. pp. 1–5.
15. Petrenko V.I. et al. Calculating rotation angles of the operator's arms based on generalized coordinates of the master device with following anthropomorphic manipulator in real time. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. vol. 9(1). pp. 447–461.
16. Tan K.K., Putra A.S. Control System in Servo Drives. *Advances in industrial control*. 2011. 197 p.
17. Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Position-servo drives with finite control. *Proceedings of Russian Electrical Engineering*. 2015. vol. 86. no. 6. pp. 344–349.
18. Botan C., Ostafi F. Optimal control of a servo drive system with variable torque. Proceedings of 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). 2017. pp. 500–505.
19. Gasparetto A., Boscariol P., Lanzutti A., Vidoni R. Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview. Motion and operation planning of robotic systems. 2015. pp. 3–27.
20. Muller A. Recursive second-order inverse dynamics for serial manipulators. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. pp. 2483–2489.
21. Bajodah A. Asymptotic robot manipulator generalized inverse dynamics. *Nonlinear Dynamics and Systems Theory*. 2013. vol. 13. no. 1. pp. 25–46.
22. Liu T., Gao F., Zhao X., Qi C. Inverse Dynamics of a 6-DOF Decoupling Manipulator. Proceedings of ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2014. 9 p.

23. De La Cruz J.S., Kulic D., Owen W. Learning inverse dynamics for redundant manipulator control. *Proceedings of Autonomous and Intelligent Systems (AIS)*. 2010. pp. 1–6.
24. Fijany A., Bejczy A.K. Parallel computation of manipulator inverse dynamics. *Journal of Robotic Systems*. 1991. vol. 8. no. 5. pp. 599–635.
25. Lee C.S.G. Parallel algorithms and architectures for inverse dynamics computation. *Parallel Computation Systems for Robotics*. 1992.
26. Megalingam R.K., Vivek G.V., Bandyopadhyay S., Rahi M.J. Robotic arm design, development and control for agriculture applications. *Proceedings of 2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*. 2017. pp. 1–7.
27. Fang B., Sun F., Liu H., Yao G. Robotic teleoperation systems using a wearable multimodal fusion device. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017. vol. 14. no. 4. pp 1–11.
28. Bluethmann W., Ambrose R., Diftler M., Askew S. Robonaut: A robot designed to work with humans in space. *Autonomous Robots*. 2003. vol. 14. no. 2-3. pp. 179–197.