

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-10-129-138

**Соколов В.С.*

Научно-технологический университет «Сириус»

**E-mail: sok92@mail.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПО СКОРОСТИ

Аннотация. Внедрение робототехники во всё более разнообразные сферы промышленности ставит новые задачи перед исследователями и инженерами в данной области. Контактные операции являются одной из наиболее актуальных и сложных задач, так как любая полезная деятельность, производимая робототехнической системой связана с взаимодействием с окружающими объектами. Сложность данной задачи связана с разнообразием объектов и типов контактов, а также отсутствием универсальных математических методов для описания упругих тел.

Промышленные манипуляторы большинства известных производителей поставляются с контуром управления, принимающим угловые скорости сочленений как управляющие сигналы. Поэтому для инженеров, работающих с манипуляторами, становится актуальной задача разработки законов управления для манипуляторов, управляемых по скорости, тогда как большая часть теории управления написана для механических систем, управляемых по моменту силы в сочленениях.

В настоящей работе предлагается метод моделирования регулятора, выполняющего контроль за контактной операцией, на основе комбинации модели объекта управления – манипулятора, управляемого по скорости, а также модели двумерного непрерывного упругого тела на основе дискретной модели Кельвина-Фойгта. Данный подход может использоваться для быстрого прототипирования регуляторов, без необходимости частого повторения натурного эксперимента. Производится сравнение результатов моделирования и эксперимента, по которым можно утверждать адекватность предложенного метода моделирования для качественной оценки работы регулятора.

Ключевые слова: контактные операции, промышленная робототехника, управление по силе, датчик силы, силомоментное управление, модель контакта, теория управления

Введение. В настоящее время промышленные роботы задействованы в таких высокотехнологичных отраслях как электронная промышленность, автомобильная промышленность, станкостроение, электротехника, медицина и многих других [1, 2]. Одними из сложнейших задач робототехники до сих пор остаются контактные операции [3, 4], поэтому в число наименее охваченных роботизацией отраслей входят: атомная промышленность, судостроение, самолётостроение, добыча полезных ископаемых, сельское хозяйство. Это связано со сложностью автоматизации и роботизации процессов в данных областях из-за наличия контактных операций с неизвестной или постоянно изменяющейся окружающей средой [5, 6]. Например, технологии финишной полировки поверхностей [7], контактного нанесения покрытий на элементы судов и самолетов характеризуются взаимодействием робота со средой при неударивающем контакте. Для решения указанных выше контактных операций необходимо контролировать усилие, возникающее в пятне контакта. Наиболее распространенные подходы включают в себя: пассивный контроль усилия, активный контроль, включающий прямое управление по силе (direct force control) и не прямое управление по силе (indirect force con-

trol), а также построение модели объекта, с которым происходит контакт [8, 9]. Остановимся подробнее на каждом из этих подходов.

Пассивный контроль контактных операций подразумевает отсутствие какого-либо активного управления и обратной связи по силе. Как правило пассивный контроль достигается установкой демпфирующих механических приспособлений [10, 11] между фланцем робота и инструментом, например, шлифовальным кругом. Таким образом регулируя жёсткость демпфирующего элемента для конкретной операции – сверления, шлифовки и т.п., мы можем добиться желаемого качества операции.

Активный контроль контактных операций можно условно разделить на два подхода: прямое и не прямое управление по силе [12]. Прямое управление по силе подразумевает то, что имеется возможность непосредственно измерять усилие в пятне контакта с помощью какого-либо датчика силы, например, пьезоэлектрического. Данный подход довольно широко распространён и имеется огромное число работ [13] по построению регуляторов такого типа. Непрямое управление по силе предполагает отсутствие возможности измерения усилия в пятне контакта [14]. Основная идея такого подхода заключается в том, что усилие в контакте контролируется опосредованно, посредством контроля пространственного

движения инструмента на основе обратной связи по положению, как правило измеряемого энкодерами манипулятора. Все возможные вариации непрямого управления подразумевают имитацию некоторого упругого механического элемента, например, пружины и демпфера, посредством обратной связи и соответствующим управлением рабочим концом манипулятора. Для лучшего понимания принципа работы непрямого управления, рассмотрим в качестве примера задачу шлифовки плоскости. Перед выполнением операции в регуляторе задаётся некоторая уставка положения чуть глубже уровня плоскости, данная уставка будет служить аналогом точки положения равновесия пружины, отклонения от данного положения будут вызывать конкретное усилие со стороны инструмента на среду. В рабочем режиме шлифовки будет поддерживаться заданное усилие, которое определяется величиной вышеупомянутой уставки.

Моделирование среды, с которой входит в контакт инструмент, является ещё одним из подходов выполнения точных контактных операций [15, 16, 17]. При удачном математическом описании среды данный метод может быть очень эффективен, но при этом его недостатками являются нетривиальность построения моделей упругих сред, их вычислительная сложность, а также отсутствие универсальности, т.к. буквально каждая новая контактная операция будет требовать переработку математической модели упругого тела. Как правило, для реальных практических задач, аналитическое моделирование упругих свойств среды не представляется возможным, за исключением простых случаев малых деформаций и простых геометрических форм объектов, где может быть применена линейная теория упругости. В остальных случаях приходится прибегать к вычислительно сложным методам конечных элементов или объёмов. Тем не менее, известны успешные примеры использования такого подхода для планирования роботизированных хирургических операций [18], где для оперируемой области выполняется конечно-элементное моделирование и планируется движение инструмента на модели, перед выполнением этого движения на пациенте.

Для полного понимания проблематики в управлении манипуляторами, поставляемыми производителями на сегодняшний день, необходимо кратко упомянуть распространённые способы программирования манипуляторов: с использованием проприетарного языка программирования, с интерпретатором языка общего назначения и с внешним генератором траекторий.

Первый и самый распространённый подход программирования – использование проприетарного языка программирования для манипулятора конкретного производителя. После интерпретации кода, написанного оператором, контроллер манипулятора осуществляет планирование пути (рассчитывает физически возможный путь и проверяет на возможные столкновения), далее происходит генерация траектории (движение по спланированному пути параметризуется временем) и только затем происходит механическое движение манипулятора по заданной траектории со стабилизацией по обратной связи с энкодеров. Главным недостатком данного подхода является то, что оператор ограничен только стандартными траекториями, которые были включены производителем в планировщик траекторий. Как правило, это движения по прямым от точки к точке, а также по простейшим кривым в виде окружностей.

Второй подход к программированию манипуляторов заключается в возможности применения языков общего назначения, таких как Python и C++, что обеспечивает большую универсальность кода в случае наличия манипуляторов разных производителей на производстве. Для того, чтобы это было возможным, многие производители поставляют специальные интерпретаторы, которые переводят код с языка общего назначения на проприетарный язык. Дальнейшая схема работы выглядит также, как для первого подхода, описанного выше. Заметим, что второй подход просто позволяет программировать роботов на языке общего назначения и не даёт большей свободы в формировании траекторий, таким образом обладает теми же недостатками, что и первый.

Третий подход к программированию заключается в возможности написания своего планировщика пути и генератора траекторий на языке общего назначения. Данный подход представляет первоочередной интерес для настоящей статьи, так как именно в нём появляется возможность формировать управляющие сигналы на сочленения манипулятора в виде угловых скоростей, и таким образом генерировать более сложные траектории. Следует заметить, что довольно малое число производителей дают возможность применения данного подхода, отметим далее некоторых из них [19]. Манипуляторы KUKA имеют Robot Sensor Interface (RSI), компания ABB предоставляет пакет Externally Guided Motion (EGM), используемый в настоящей работе, роботы FANUC имеют Dynamic Path Modification (DPM).

В данной статье будет рассмотрено активное прямое управление по силе для манипуляторов, управляемых по скорости, т.е. программируемых по третьему подходу, упомянутого выше. Такая комбинация видится наиболее актуальной для сложных промышленных задач с контактом, ввиду наличия доступных робототехнических шестиосных датчиков силы и большой универсальности, из-за возможности написания своих планировщиков пути и генераторов траекторий. Надо отметить, что большинство предлагаемых регуляторов активного прямого управления в научной литературе предполагают возможность управлением манипулятором по крутящим моментам в сочленениях. Здесь возникает большой разрыв между наукой и промышленностью, т.к. большинство манипуляторов известных производителей позволяют управлять манипуляторами только по угловым скоростям сочленений. Для этого имеется множество технических причин, одной из которых является сложность моделирование двигателей и редукторов с большим передаточным числом, установленных в каждом сочленении, таким образом за невозможностью контролировать крутящий момент в сочленении, производители замыкают обратную связь на угол и угловую скорость сочленения используя показания энкодеров. В данном случае влияние динамики манипулятора становится не существенным и по своей сути происходит кинематическое управление. По вышеуказанным причинам в дан-

ной статье будет предложен метод моделирования именно для манипуляторов, управляемых по скорости, что отвечает актуальным запросам промышленности.

При разработке робототехнических систем для конкретных операций в условиях реального производства имеют большое значение экономические и временные факторы. Поэтому подходы быстрого инженерного прототипирования и отбраковки неработающих вариантов выходят на передний план. В настоящей работе предлагается подход для качественного моделирования регуляторов активного прямого управления для манипуляторов, управляемых по скорости, который может служить способом быстрого прототипирования регуляторов, без необходимости частого натурного эксперимента. Предлагаемый способ отличается малой вычислительной сложностью, ввиду использования сравнительно простых моделей для объекта управления (манипулятора) и упругого тела, при этом имеется хорошее качественное согласование результатов моделирования и эксперимента в поведение сил в контакте.

Модель объекта управления и регулятор по силе. Объектом управления в данной работе является манипулятор, принимающий в качестве управляющих сигналов декартовы скорости рабочего конца штампа, изображённого на рис. 1 (далее штампом будем называть некоторый инструмент, входящий в контакт с упругой поверхностью).

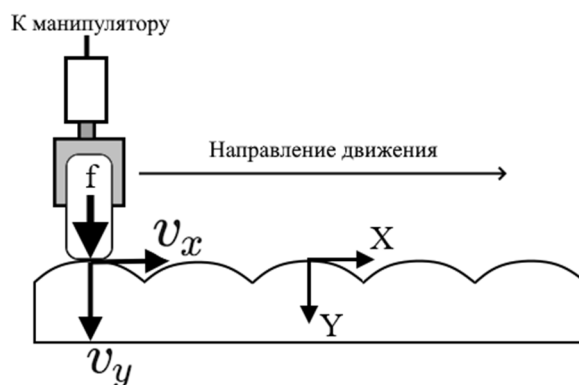


Рис. 1. Движение штампа в контакте с упругой поверхностью

Степени свободы манипулятора, управляемого по скорости, с инструментом, движущимся в одной плоскости в первом приближении, можно моделировать как интегрирующие звенья с запаздыванием (1). Постоянные времени интегрирующего звена позволяют моделировать инерционность, связанную с технической реализацией конкретного манипулятора и переходными процессами в нём, как динамической системы. Управляющие сигналы скоростей форми-

руются на основе обратной связи по силе, которая при натурном эксперименте подлежит измерению с помощью датчика силы.

$$\begin{cases} T_x \ddot{x} + \dot{x} = v_x(f) \\ T_y \ddot{y} + \dot{y} = v_y(f), \end{cases}$$

(1)

где T_x, T_y – постоянные времени;

x, y – координаты рабочего конца инструмента;

v_x, v_y – управляющие сигналы в виде скоростей;

f – обратная связь по силе в контакте (здесь предполагается сила действующая со стороны инструмента на поверхность, измеряемая датчиком силы).

Предлагаемый подход позволяет моделировать любой регулятор с управляющими сигналами в виде скоростей, в демонстрационных целях, выберем регулятор (2) со следующей целью управления [20] – обеспечить неразрывность контакта с поддержанием усилия в пятне контакта в окрестности F_{ref} , при этом двигаясь вдоль поверхности с заданной скоростью V_{x_ref} .

$$\begin{aligned} v_x(f) &= V_{x_ref} (1 - |e(f)|) \\ v_y(f) &= V_{y_max} e(f), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } e(f) = \begin{cases} \frac{F_{ref} - f}{F_{ref}}, & 0 \leq f < 2F_{ref} \\ -1, & f \geq 2F_{ref} \end{cases} \quad \text{— от-}$$

носительная ошибка от уставки по силе F_{ref} ;

V_{y_max} – максимальные скорость движения вдоль оси ординат (насыщение);

V_{x_ref} – уставка по скорости вдоль оси абсцисс.

Модель вязко-упругого тела Кельвина-Фойгта с пропорциональным регулятором. Перед построением модели упругого тела для моделирования движения некоторого штампа вдоль поверхности, рассмотрим её базовый составляющий элемент – дискретную модель Кельвина-Фойгта [21] и её отклик на пропорциональный регулятор, который стремится деформировать пружину на заданную величину (рис. 2).

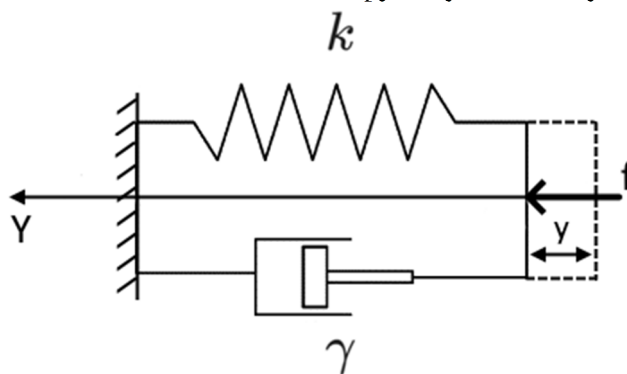


Рис. 2. Модель Кельвина-Фойгта

Уравнение (3) описывает возникающее усилие в параллельном включении пружины и демпфера в модели Кельвина-Фойгта:

$$f = ky + \gamma \dot{y}, \quad (3)$$

где k , γ – коэффициенты жёсткости и затухания соответственно.

Для моделирования деформации пружины будем использовать только степень свободы нормальную к поверхности – y -компоненты уравнений (1) и (2). Результаты моделирования со следующими параметрами $k = 10$, $\gamma = 3$, $T_y = 0.8$, $F_{ref} = 0.1$ представлены на рис. 3.

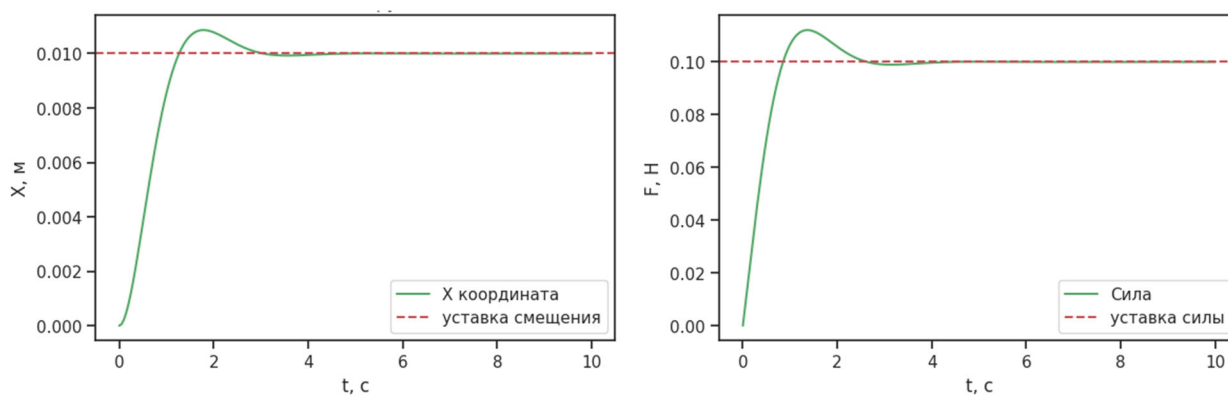


Рис. 3. Переходной процесс деформации и силы в модели Кельвина-Фойгта

Модель упругого тела. Предлагаемая модель непрерывного двумерного упругого тела строится из базовых элементов – дискретных моделей Кельвина-Фойгта (рис. 4).

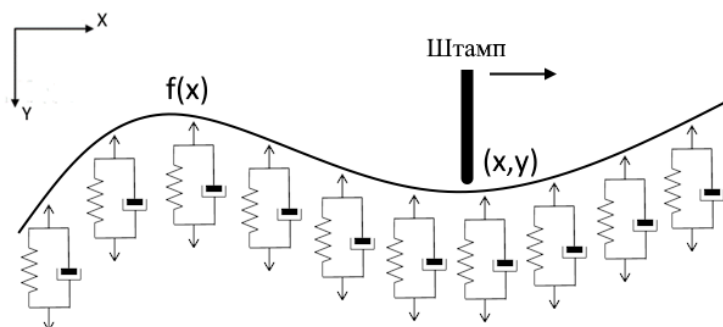


Рис. 4. Модель двумерного упругого тела

Основными предположениями модели являются следующие допущения: граница поверхности ограничена некоторой гладкой кривой $f(x)$, пружины расположены вертикально вдоль оси ординат, контакт штампа с поверхностью в процессе моделирования никогда не разрывается, т.е. всегда $y - f(x) \geq 0$, а также делается допущение, что при движении штампа вдоль оси абсцисс пружина деформируется мгновенно. Моделью двумерного упругого тела будем называть формулу для силы (4) действующей со стороны штампа на поверхность, которая противоположна реакции упругого тела. Данное выражение является прямым обобщением дискретной модели Кельвина-Фойгта (3).

$$f = k(y - f(x)) + \gamma(v_y - f'(x)v_x), \quad (4)$$

где k, γ – коэффициенты жёсткости и затухания;

$f(x)$ – кривая определяющая форму поверхности;

x, y – координаты конца штампа;

v_x, v_y – скорости конца штампа.

Описание экспериментальной установки.

Для демонстрации предлагаемого подхода к моделированию были выбраны две конфигурации эксперимента. Первый эксперимент (левое изображение рис. 5) был проведён с мягким упругим телом волнистой формы, симулирующий контактные операции, возникающие, например, в таких задачах, как автоматическая ультразвуковая диагностика мягких тканей человека. Второй эксперимент (правое изображение рис. 5) проводился с жёстким контактом между инструментом и поверхностью с препятствием, отражающий закономерности, возникающие, например, в задачах шлифовки.

Для проведения эксперимента использовалась следующая установка: промышленный манипулятор IRB1600 фирмы ABB с шестиосным датчиком силы, манипулятор оснащён интерфейсом EGM (Externally Guided Motion), позволяющим задавать декартовы скорости фланца как управляющие сигналы, т.е. данный манипулятор является управляемым по скоростям. Рассмотрим далее результаты моделирования и эксперимента для упомянутых выше конфигураций эксперимента.

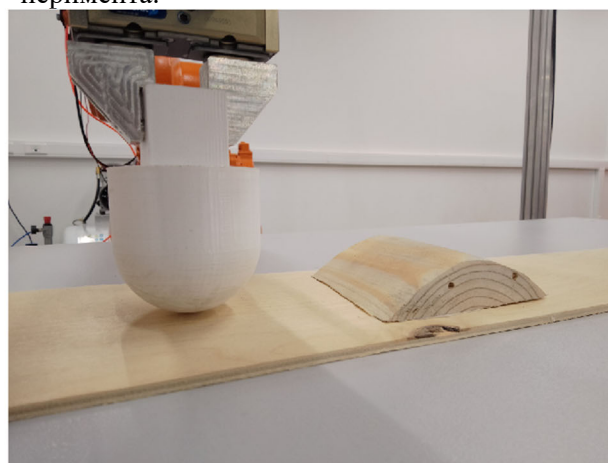
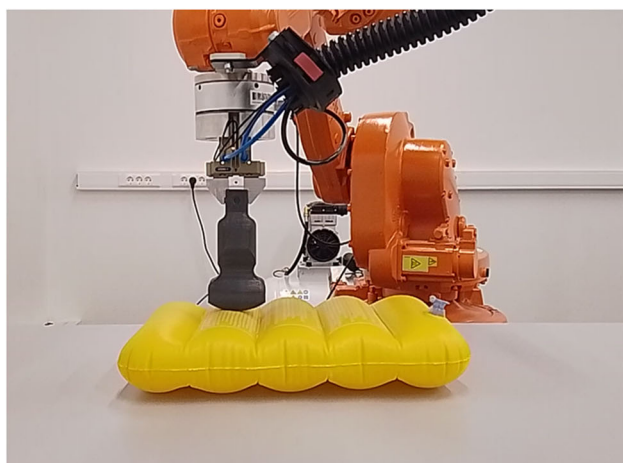


Рис. 5. Экспериментальная установка

Контакт с мягким волнистым телом. Рассмотрим подробнее последовательность проведения эксперимента (левое изображение рис. 5):

1. В ручном режиме производилось снятие координат точек геометрического контакта

(рис. 6) объёмного штампа и упругого тела с визуальным контролем на просвет, координаты точек измерялись на основе встроенных энкодеров манипулятора. Полученная кривая представлена сплошной кривой на левом графике рис. 7.

2. В автоматическом режиме манипулятор управлялся по скоростям с использованием регулятора (2). Продавливание поверхности замерялось посредством встроенных энкодеров, и данная кривая представлена пунктирной кривой на левом графике рис. 7. Усилия, возникающие в контакте, снимались с датчика силы и представлены на левом графике рис. 8.

Для проведения моделирования необходимо задаться формой поверхности, описываемой функцией $f(x)$ (рис. 4). Так как в моделировании штамп рассматривается точечным, то делается предположение, что в качестве $f(x)$ можно выбрать кривую описывающую геометрический контакт штампа и поверхности из эксперимента (сплошная линия на левом графике рис. 7) при условии достаточной малости деформаций. Целью моделирования является выявление качественных зависимостей поведения сил и деформаций в контакте, поэтому достаточно выбрать $f(x)$ с поведением похожим (сплошная линия с

правого графика рис. 7) на линию геометрического контакта, таким образом положим:

$$f(x) = A \sin(\omega x + \pi/2)^2, \quad (5)$$

где $A = 0.1$, $\omega = 80$ – параметры моделирования.

Результаты моделирования регулятора (2) с параметрами $F_{\text{ref}} = 0.4$, $V_{x_{\text{ref}}} = 0.01$, $V_{y_{\text{max}}} = 0.08$ для манипулятора, управляемого по скорости, описываемого интегрирующими звеньями с запаздыванием (1) с постоянными времени $T_x = 0.3$, $T_y = 0.8$, в контакте с упругим телом, описываемым моделью (4) с $k = 10$, $\gamma = 3$ представлены на правых графиках рис. 7 и рис. 8 для деформации и силы соответственно. Ввиду того, что нас интересует качественное совпадение поведения кривых, а не количественные показатели – числовые значения вдоль оси ординат опущены, а вдоль оси абсцисс проставлены числовые значения безразмерного расстояния, полученного в моделировании.

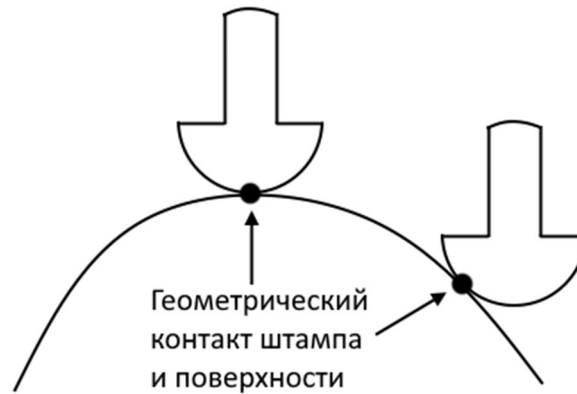


Рис. 6. Геометрический контакт штампа и упругой поверхности

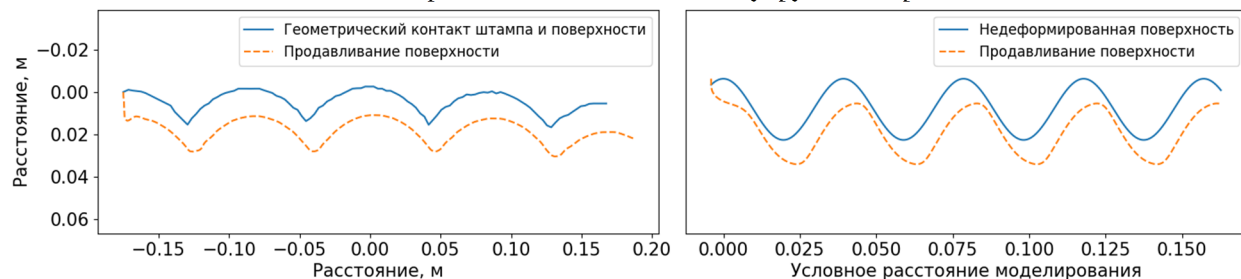


Рис. 7. Продавливание упругой волнистой поверхности в моделировании и эксперименте

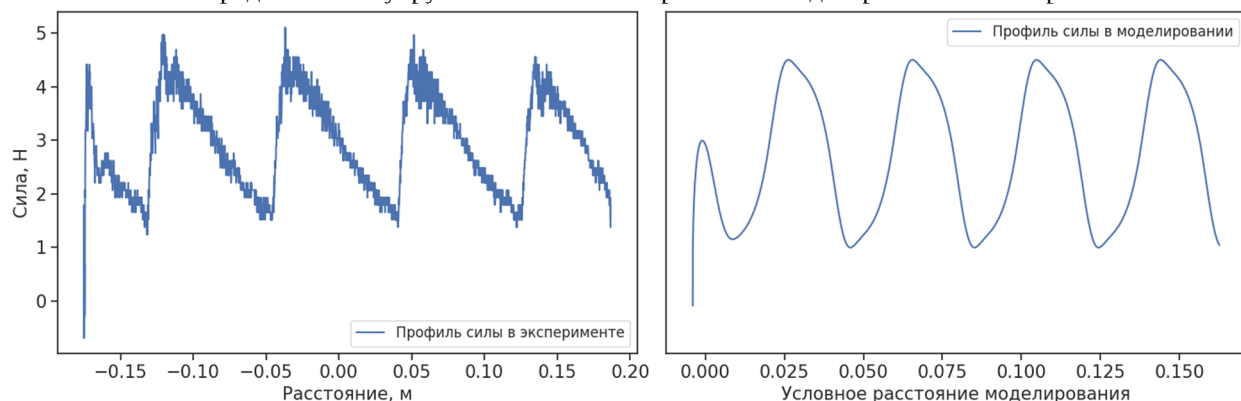


Рис. 8. Профили сил в контакте с упругой волнистой поверхностью в моделировании и эксперименте

Контакт с твёрдой поверхностью с препятствием. Последовательность проведения эксперимента (правое изображение с рис. 5) в данном случае совпадает с экспериментом для мягкого волнистого тела, за исключением снятия величины деформаций тела, т.к. для жёсткого контакта они чрезвычайно малы, чтобы их можно было зафиксировать энкодерами манипулятора. По этой причине в данном эксперименте снимались только значения силы (левый график рис. 9), возникающей в контакте при движении вдоль плоскости и обходе препятствия, а продавливание построено только по результатам моделирования.

В качестве функции $f(x)$ (рис. 4) для моделирования препятствия выберем базисную функцию В-сплайна, что позволит осуществить непрерывную сшивку производной при переходе к горизонтальной прямой (синяя кривая с рис. 10), непрерывность производной необходима ввиду выбранной модели упругого тела (4).

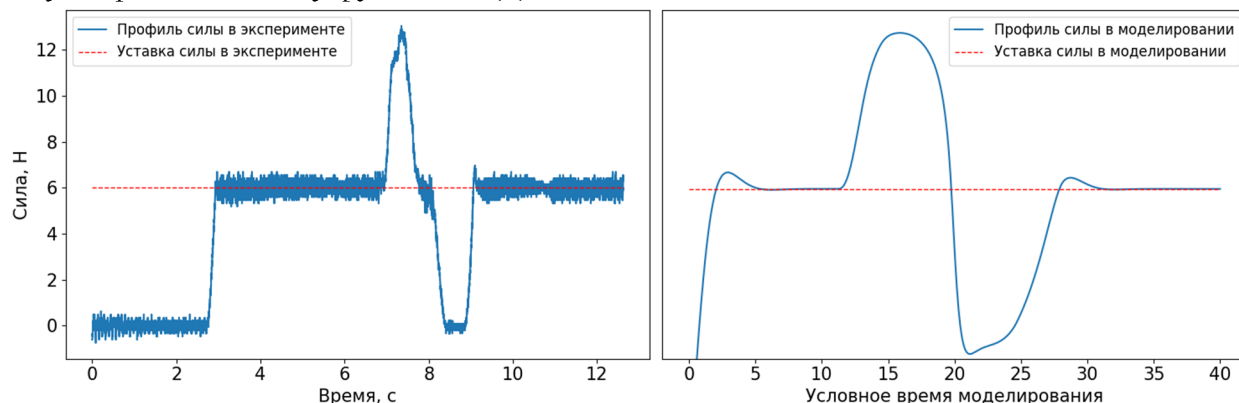


Рис. 9. Профили сил при прохождении через препятствие в контакте с твёрдой поверхностью в моделировании и эксперименте

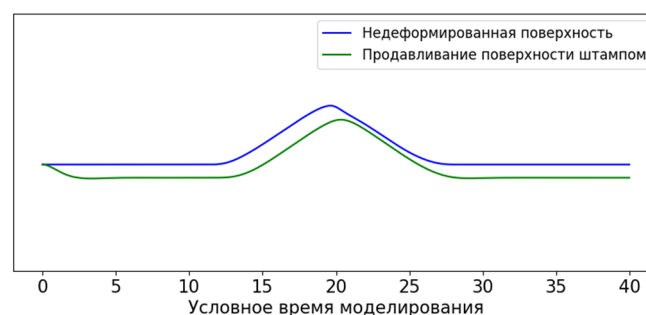


Рис. 10. Продавливание поверхности при прохождении через препятствие в контакте с твёрдой поверхностью в моделировании

Обсуждение результатов. В настоящей работе был представлен подход качественного моделирования контактных операций для манипуляторов, управляемых по скорости, на примере протаскивания штампа вдоль упругой и твёрдой поверхности. Данный подход отличается малой вычислительной сложностью, что может быть полезно при быстром прототипировании регуляторов и отсеивании неудачных вариантов.

$$f(x) = N_{02}(x) \equiv \begin{cases} 0.5x^2, & x \in [0, 1) \\ 0.5(-3 + 6x - 2x^2), & x \in [1, 2) \\ 0.5(3 - x^2), & x \in [2, 3) \end{cases} \quad (6)$$

где, $N_{02}(x)$ – базисная функция В-сплайна.

Результаты моделирования регулятора (2) с параметрами $F_{\text{ref}} = 0.4$, $V_{x,\text{ref}} = 0.01$, $V_{y,\text{max}} = 0.08$ для манипулятора, управляемого по скорости, описываемого интегрирующими звеньями с запаздыванием (1) с постоянными времени $T_x = 0.3$, $T_y = 0.8$, в контакте с твёрдой поверхностью с препятствием, описываемой моделью (4) с $k = 20$, $\gamma = 3$, представлены на правом графике рис. 9 и рис. 10 для силы и деформации соответственно. Как и ранее, нас интересует качественное совпадение поведения кривых, поэтому числовые значения вдоль оси ординат опущены, а вдоль оси абсцисс проставлены числовые значения безразмерного времени, полученного в моделировании.

Для моделирования манипуляторов, управляемых по скорости, использовались интегрирующие звенья с запаздыванием, а модель непрерывного двумерного упругого тела построена на основе дискретной модели Кельвина-Фойгта.

Для валидации предложенного метода было проведено два эксперимента: контакт с мягким волнистым телом и контакт с твёрдой поверхностью с препятствием (рис. 5). Сравнительный анализ результатов моделирования для данных

экспериментов представлен на рис. 7, рис. 8. и рис. 9. Из графиков видно, что профили деформаций и сил в моделировании качественно согласуются с экспериментом.

Таким образом предлагаемый подход качественного моделирования может позволить подобрать подходящую функциональную форму регулятора по силе с минимальными вычислительными затратами, перед переходом к разработке более основательной математической модели упругого тела, например, на основе идентификации упругих свойств инструмента и поверхности контакта в статике и динамике.

Источник финансирования. Грант Российского научного фонда № 24-11-20009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Licardo J.T., Domjan M., & Orehoваčki T. Intelligent Robotics – A Systematic Review of Emerging Technologies and Trends // *Electronics*. 2024. Том 13. № 3. Pp. 542–561. DOI: 10.3390/electronics13030542.
2. Sotnik S., Lyashenko V. Modern Industrial Robotics Industry // *International Journal of Academic Engineering Research (IJAER)*. 2022. Том 6. № 1. Pp. 37–46.
3. Suomalainen M., Karayiannidis Y., Kyrki V. A survey of robot manipulation in contact // *Robotics and Autonomous Systems*. 2022. Том 156. Pp. 1042–1053. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104224.
4. Billard A., Kragic D. Trends and challenges in robot manipulation // *Science*. 2019. Том 364. № 6446. Pp. 168–179. DOI: 10.1126/science.aat8414.
5. Yin Z., Ye C., An H., Lin W., Wang Z. Robot Manipulation Skills Transfer for Sim-to-Real in Unstructured Environments // *Electronics*. 2023. Том 12. № 2. Pp. 411–424. DOI: 10.3390/electronics12020411.
6. Sayed M.E., Roberts J.O., Donaldson K., Mahon S.T., Iqbal F., Li B., Franco Aixela S., Mastorakis G., Jonasson E.T., Nemitz M.P., Bernardini S. and Stokes A.A. Modular Robots for Enabling Operations in Unstructured Extreme Environments // *Adv. Intell. Syst.* 2022. № 4. Pp. 2042–2053. DOI: 10.1002/aisy.202000227.
7. Li J., Guan Y., Chen H., Wang B. and Zhang T. Robotic Polishing of Unknown-Model Workpieces With Constant Normal Contact Force Control // *Transactions on Mechatronics*. 2023. Том 28. № 2. Pp. 1093–1103. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3216314.
8. Zhu J., Cherubini A., Dune C., Navarro-Alarcon D., Alambeigi F., Berenson D., Ficuciello F., Harada K., Kober J., Li X. Challenges and Outlook in Robotic Manipulation of Deformable Objects // *Robotics & Automation Magazine*. 2022. Том 29. № 3. Pp. 67–77. DOI: 10.1109/MRA.2022.3147415.
9. Sanchez J., Corrales J-A, Bouzgarrou B-C, Mezouar Y. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey // *The International Journal of Robotics Research*. 2018. Том 37. № 7. Pp. 688–716. DOI: 10.1177/0278364918779698.
10. Tian-Soon S., Marcelo H., Kah-Bin L. A compliant end-effector coupling for vertical assembly: design and evaluation // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 1997. Том 13. № 1. Pp. 21–30. DOI: 10.1016/S0736-5845(96)00032-4.
11. Qin Y., Wu H., Li Z., Sun N., Sun L. Design and Analysis of a Compliant End-Effector for Robotic Polishing Using Flexible Beams // *Actuators*. 2022. Том 11. № 10. Pp. 284–293. DOI: 10.3390/act11100284.
12. Siciliano B., Villani L. *Robot Force Control*. Springer, 2000. 159 с.
13. Xiao D., Ghosh B.K., Xi N., Tarn T.J. Sensor-based hybrid position/force control of a robot manipulator in an uncalibrated environment // *Transactions on Control Systems Technology*. 2000. Том 8. № 37. Pp. 635–645. DOI: 10.1109/87.852909.
14. Song P., Yu Y., Zhang X. Impedance Control of Robots: An Overview // *2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, Chengdu, China. 2017. Pp. 51–55. DOI: 10.1109/CRC.2017.20.
15. Lidec Q., Jallet W., Montaut L., Laptev I., Schmid C., Carpentier J. Contact Models in Robotics: A Comparative Analysis // *Transactions on Robotics*. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1109/TRO.2024.3434208.
16. Arriola-Rios V.E., Guler P., Ficuciello F., Kragic D., Siciliano B. and Wyatt J.L. Modeling of Deformable Objects for Robotic Manipulation: A Tutorial and Review // *Front. Robot.* 2022. Том 82. № 7. Pp. 82–92. DOI: 10.3389/frobt.2020.00082.
17. Sanchez J., Corrales J.A., Bouzgarrou B.C., Mezouar Y. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey // *The International Journal of Robotics Research*. 2018. Том 37. № 7. Pp. 688–716. DOI: 10.1177/0278364918779698.
18. Pratt P., Bello F., Edwards E., Rueckert D. Interactive finite element simulation of the beating heart for image-guided robotic cardiac surgery // *Stud Health Technol Inform.* 2008. Том 132. Pp. 378–383.
19. Bilancia P., Schmidt J., Raffaelli R., Peruzzini M., Pellicciari M. An Overview of Industrial Robots Control and Programming Approaches // *Applied Sciences*. 2023. Том 13. № 4. Pp. 2582–2596. DOI: 10.3390/app13042582.
20. Соколов В.С., Кульминский Д.Д. Робототехническая система для трехмерной ультразвуковой реконструкции на основе силомоментного

управления // Информационно-управляющие системы. 2025. № 1. С. 51–59. DOI: 10.31799/1684-8853-2025-1-51-59.

21. Bulíček M., Málek J., Rajagopal K.R. On Kelvin-Voigt model and its generalizations // Evolution Equations and Control Theory. 2012. Том 1. № 1. Pp. 17–42. DOI: 10.3934/eect.2012.1.17.

Информация об авторах

Соколов Виктор Сергеевич, аспирант, младший научный сотрудник научного центра информационных технологий и искусственного интеллекта, направления «Математическая робототехника». E-mail. АНО ВО «Университет «Сириус». Россия, 354340, Краснодарский край, п.г.т. Сириус, Олимпийский проспект, 1, федеральная территория «Сириус».

Поступила 27.02.2025 г.

© Соколов В.С., 2025

***Sokolov V.S.**

Sirius University

*E-mail: sok92@mail.ru

MODELING OF CONTACT OPERATIONS FOR VELOCITY-CONTROLLED MANIPULATORS

Abstract. The increasing use of robotics in various industrial sectors presents new challenges for researchers and engineers in this field. Contact operations represent one of the most urgent and complex challenges, as any useful activity performed by a robotic system involves interaction with surrounding objects. The complexity of this challenge stems from the diversity of objects and types of contacts, as well as the lack of universal mathematical methods for describing elastic bodies.

Industrial manipulators from most manufacturers are supplied with a control contour accepting joint angular velocities as control signals. Therefore, for engineers working with manipulators, the task of developing control laws for velocity-controlled manipulators becomes relevant, while most of the control methods are intended for mechanical systems controlled by torque in the joints.

This paper proposes a method for modeling a regulator, which performs control of the contact operation based on the combination of the plant model- a velocity-controlled manipulator, as well as two-dimensional continuous elastic body model based on the discrete Kelvin-Voigt model. This approach can be used for rapid prototyping of regulators without the need for frequent repetition of full-scale experiments. A comparison of simulation and experiment is performed, which confirms the adequacy of the proposed modeling method for evaluating regulator performance.

Keywords: contact operations, industrial robotics, force control, force sensor, force-torque control, contact model, control theory

REFERENCES

1. Licardo J.T., Domjan M., Orehoваčki T. Intelligent Robotics – A Systematic Review of Emerging Technologies and Trends. Electronics. 2024. Vol. 13. No. 3. Pp. 542–561. DOI: 10.3390/electronics13030542.
2. Sotnik S., Lyashenko V. Modern Industrial Robotics Industry. International Journal of Academic Engineering Research (IJAER). 2022. Vol. 6. No. 1. Pp. 37–46.
3. Suomalainen M., Karayiannidis Y., Kyrki V. A survey of robot manipulation in contact. Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 156. Pp. 1042–1053. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104224.
4. Billard A., Kragic D. Trends and challenges in robot manipulation. Science. 2019. Vol. 364. Pp. 168–179. DOI: 10.1126/science.aat8414.
5. Yin Z., Ye C., An H., Lin W., Wang Z. Robot Manipulation Skills Transfer for Sim-to-Real in Unstructured Environments. Electronics. 2023. Vol. 12. No. 2. Pp. 411–424. DOI: 10.3390/electronics12020411.
6. Sayed M.E., Roberts J.O., Donaldson K., Mahon S.T., Iqbal F., Li B., Franco Aixela S., Mastroakis G., Jonasson E.T., Nemitz M.P., Bernardini S. and Stokes A.A. Modular Robots for Enabling Operations in Unstructured Extreme Environments. Adv. Intell. Syst. 2022. No. 4. Pp. 2042–2053. DOI: 10.1002/aisy.202000227.
7. Li J., Guan Y., Chen H., Wang B. and Zhang T. Robotic Polishing of Unknown-Model Workpieces With Constant Normal Contact Force Control. Transactions on Mechatronics. 2023. Vol. 28. No. 2. Pp. 1093–1103. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3216314.
8. Zhu J., Cherubini A., Dune C., Navarro-Alarcon D., Alambeigi F., Berenson D., Ficuciello F.,

Harada K., Kober J., Li X. Challenges and Outlook in Robotic Manipulation of Deformable Objects. *Robotics & Automation Magazine*. 2022. Vol. 29. No. 3. Pp. 67–77. DOI: 10.1109/MRA.2022.3147415.

9. Sanchez J., Corrales J-A, Bouzgarrou B-C, Mezouar Y. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey. *The International Journal of Robotics Research*. 2018. Vol. 37. No. 7. Pp. 688–716. DOI: 10.1177/0278364918779698.

10. Tian-Soon S., Marcelo H., Kah-Bin L. A compliant end-effector coupling for vertical assembly: design and evaluation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 1997. Vol. 13. No. 1. Pp. 21–30. DOI: 10.1016/S0736-5845(96)00032-4.

11. Qin Y., Wu H., Li Z., Sun N., Sun L. Design and Analysis of a Compliant End-Effector for Robotic Polishing Using Flexible Beams Actuators. 2022. Vol. 11. No. 10. Pp. 284–293. DOI: 10.3390/act11100284.

12. Siciliano B., Villani L. *Robot Force Control*. Springer, 2000. 159 p.

13. Xiao D., Ghosh B.K., Xi N., Tarn T.J. Sensor-based hybrid position/force control of a robot manipulator in an uncalibrated environment. *Transactions on Control Systems Technology*. 2000. Vol. 8. No. 37. Pp. 635–645. DOI: 10.1109/87.852909.

14. Song P., Yu Y., Zhang X. Impedance Control of Robots: An Overview. 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC), Chengdu, China. 2017. Pp. 51–55. DOI: 10.1109/CRC.2017.20.

15. Lidec Q., Jallet W., Montaut L., Laptev I., Schmid C., Carpentier J. Contact Models in Robotics: A Comparative Analysis. *Transactions on Robotics*. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1109/TRO.2024.3434208.

16. Arriola-Rios V.E., Guler P., Ficuciello F., Kragic D., Siciliano B. and Wyatt J.L. Modeling of Deformable Objects for Robotic Manipulation: A Tutorial and Review. *Front. Robot.* 2022. Vol. 82. No. 7. Pp. 82–92. DOI: 10.3389/frobt.2020.00082.

17. Sanchez J., Corrales J.A., Bouzgarrou B.C., Mezouar Y. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey. *The International Journal of Robotics Research*. 2018. Vol. 37. No. 7. Pp. 688–716. DOI: 10.1177/0278364918779698.

18. Pratt P., Bello F., Edwards E., Rueckert D. Interactive finite element simulation of the beating heart for image-guided robotic cardiac surgery. *Stud Health Technol Inform*. 2008. Vol. 132. Pp. 378–383.

19. Bilancia P., Schmidt J., Raffaelli R., Peruzzini M., Pellicciari M. An Overview of Industrial Robots Control and Programming Approaches. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 4. Pp. 2582–2596. DOI: 10.3390/app13042582.

20. Sokolov V.S., Kulminskiy D.D. Robotic system for three-dimensional ultrasound reconstruction based on force-torque control. *Information and Control Systems*. 2025. Vol. 1, no. 1. Pp. 51–59. (rus)

21. Bulíček M., Málek J., Rajagopal. K.R. On Kelvin-Voigt model and its generalizations. *Evolution Equations and Control Theory*. 2012. Vol. 1. No. 1. Pp. 17–42. DOI: 10.3934/eect.2012.1.17.

Information about the authors

Sokolov, Victor S. PhD-student, Junior Researcher. E-mail: sok92@mail.ru. Scientific Center for Information Technologies and Artificial Intelligence, direction «Mathematical Robotics». Sirius University. Russian Federation, 354340, Krasnodar region, p.g.t. Sirius, Olimpiyskiy Av. 1, federal territory «Sirius».

Received 27.02.2025

Для цитирования:

Соколов В.С. Моделирование контактных операций для манипуляторов, управляемых по скорости // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 10. С. 129–138. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-129-138

For citation:

Sokolov V.S. Modeling of contact operations for velocity-controlled manipulators. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 10. Pp. 129–138. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-10-129-138