

# Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья  
УДК 004.92  
DOI: 10.14529/ctcr240402

## Х3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТЕЛ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ

**А.И. Телегин**<sup>1</sup>, [teleginai@susu.ru](mailto:teleginai@susu.ru)

**Е.В. Гусев**<sup>2</sup>, [gusevev@susu.ru](mailto:gusevev@susu.ru)

**В.Л. Кодкин**<sup>2</sup>, [kodkinvl@susu.ru](mailto:kodkinvl@susu.ru)

**В.И. Ширяев**<sup>2</sup>, [shiriaevvi@susu.ru](mailto:shiriaevvi@susu.ru)

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Целью является исследование возможностей и способов отдельного Х3D-моделирования структуры манипуляционных роботов и внешнего Х3D-прототипирования моделей их тел, не требующих для их практического использования знаний Х3D-программирования виртуальных миров. **Методы исследования** относятся к трехмерному моделированию, кинематике систем тел и робототехнике. Рассматриваются типовые ангулярные манипуляционные роботы, состоящие из поворотной платформы, плеча, предплечья и трехзвенной кисти, на конце которой установлен схват с двумя пальцами. **Результаты исследования** содержат описание разработанных способов разметки структуры и геометрии манипуляционных роботов и трех способов (простейшего, простого и типового) создания цифрового кода, на основе которого автоматически генерируется Х3D-модель тела. Для каждого из этих способов отмечаются достоинства, недостатки и ограничения, а также рекомендуются случаи их эффективного использования. Практически применять подробно описанные способы сможет любой пользователь, освоивший цифровое кодирование моделей тел. Это особенно актуально для тех, кто не владеет декларативным xml-программированием и в частности расширяемым языком разметки Х3D, для изучения которого книг и статей на русском языке очень мало. Для желающих углубить свои знания Х3D на практике здесь представлены и описаны разработанные Х3D- и JS-коды моделирования манипуляционных роботов и их тел. Приведены примеры Х3D-разметки структуры типовых манипуляционных роботов с шестью вращательными кинематическими параметрами, которые охватывают большинство ангулярных промышленных роботов. **Заключение.** Полученные результаты используются для внешнего Х3D-прототипирования манипуляционных роботов и их схватов в составе Х3D-моделей роботизированных технологических комплексов межоперационного транспортирования, покраски, сварки, сборки с целью симуляции выполнения соответствующих технологических процессов.

**Ключевые слова:** xml, Х3D, JS, внешнее Х3D-прототипирование, симуляция, манипуляционный робот, Х3D-модели тел, РТК

**Для цитирования:** Х3D-прототипирование моделей тел манипуляционных роботов / А.И. Телегин, Е.В. Гусев, В.Л. Кодкин, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 16–30. DOI: 10.14529/ctcr240402

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr240402

## X3D PROTOTYPING OF MANIPULATION ROBOT BODY MODELS

A.I. Telegin<sup>1</sup>, teleginai@susu.ru  
E.V. Gusev<sup>2</sup>, gusevev@susu.ru  
V.L. Kodkin<sup>2</sup>, kodkinvl@susu.ru  
V.I. Shiriaev<sup>2</sup>, shiriaevvi@susu.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Miass, Russia

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The aim is to investigate the possibilities and methods for separate X3D modeling of the structure of manipulation robots and external X3D prototyping of their body models, without requiring knowledge of X3D programming of virtual worlds for their practical use. The research methods are related to 3D modeling, body system kinematics and robotics. Typical angular manipulative robots consisting of a rotating platform, a shoulder, a forearm, and a three-linked hand with a two-fingered grip at the end are considered. **The results of the study** contain a description of the developed ways of marking up the structure and geometry of manipulation robots and three ways (simple, simple and typical) of creating a digital code, based on which an X3D model of the body is automatically generated. For each of these methods, advantages, disadvantages and limitations are noted, and cases of their effective use are recommended. Practical application of the methods described in detail will be possible for any user who has mastered digital coding of body models. This is especially important for those who do not know declarative xml-programming and in particular the extensible markup language X3D, for the study of which books and articles in Russian are very few. For those who wish to deepen their knowledge of X3D in practice here are presented and described developed X3D and JS-codes for modeling manipulation robots and their bodies. Examples of X3D layout of the structure of typical manipulation robots with six rotational kinematic pairs, which cover most angular industrial robots, are given. **Conclusion.** The obtained results are used for external X3D prototyping of manipulation robots and their grippers as part of X3D models of robotic technological complexes of inter-operational transportation, painting, welding, assembly in order to simulate the performance of the corresponding technological processes.

**Keywords:** xml, X3D, JS, external X3D prototyping, simulation, manipulation robot, X3D body models, RTC

**For citation:** Telegin A.I., Gusev E.V., Kodkin V.L., Shiriaev V.I. X3D prototyping of manipulation robot body models. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):16–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240402

### Введение

Исследования проведены в рамках разработки прототипа Программной Системы (ПС) для создания цифровых моделей Роботизированных Технологических Комплексов (РТК) с адаптивным управлением. Цифровые Модели (ЦМ) РТК предназначены для симуляции процессов проектирования (расчета и конструирования) РТК, в частности, создания и выполнения с заданным качеством различных технологических процессов, например, межоперационного транспортирования, покраски, сварки, сборки. ПС «СисТелРТК» разрабатывается на основе теоретической, прикладной и вычислительной механики Систем Тел [1]. Цель использования этой ПС – снизить затраты на разработку, изготовление опытного образца и его испытания, производство, обслуживание, настройку параметров и минимизировать отказы в работе опытного образца, сокращая количество тестирований программ управления физически реализованных РТК. Подобные ПС эксплуатируются на всем жизненном цикле РТК, т. е. от его проектирования до утилизации [2, 3].

Предшествующие версии ПС «СисТел» имели недостатки. Например, описанная в работах [4, 5] версия ПС имела примитивные графические возможности. Однако реализованные на Фортране программы решения задач механики и управления успешно использовались миасскими специалистами в разработках Манипуляционного Робота (МР) «Кобра» и РТК-600 [6, 7]. Продвинутое графические возможности появились в версии ПС, написанной на языке Паскаль

с использованием открытой графической системы OpenGL [8]. Упрощение процесса разработки ПС «СисТел» с реализацией возможностей ее аддитивного функционального наполнения появилось с переходом на XML-технологии [9, 10]. Единственный недостаток такого перехода связан с уменьшением быстродействия анимации. Однако быстродействие имеет практическое значение в основном для программ управления приводами МР. Поэтому разработка функций кодогенерации управляющих программ на языках низкого уровня, например, для систем команд конкретных электроприводов, снимает этот недостаток [11, 12].

Ближайший аналог предлагаемого способа моделирования МР применяется в робототехническом симуляторе Gazebo, в котором используется URDF (Unified Robot Description Format) – унифицированный формат описания робота [13]. Для того чтобы создать, изменить или дополнить модель робота в симуляторе Gazebo, используется xml-файл. Он содержит детальное описание робота, т. е. всех его элементов и связей между ними. Например, тег `<joint>` описывает сочленения, т. е. связи элементов (фиксированные, вращающиеся, призматические и т. д.). Тег `<gazebo>` содержит информацию, необходимую для описания сенсоров, параметров трения и взаимодействия элементов робота между собой.

В отличие от универсальных робототехнических симуляторов [13–15], например, RoboDK (ПС для моделирования промышленных роботов и создания программ управления роботизированными системами), Gazebo, V-REP (симуляторы манипуляционных, плавающих, ползающих, ходящих, летающих роботов и их совокупностей), предлагаемый здесь подход является предметно-ориентированным с возможностями расширения. ПС «СисТелРТК» ориентирована на разработку симуляторов РТК. Она создается путем расширения ПС «СисТелМР» и, в свою очередь, может быть расширена до ПС «СисТелПКС», предназначенной для создания ЦМ гибкой производственной системы с целью ее симуляции. Из ПС «СисТелМР» путем расширения можно создать ПС «СисТелША» (для построения ЦМ двуногих шагающих аппаратов для их симуляции), из которых создать ПС «СисТелШМ» (для построения ЦМ 4-, 6- и многоногих шагающих машин с целью их симуляции). Перечисленные здесь типы систем тел имеют определенные особенности в их математических моделях, в постановках и решениях задач механики и управления. Более того, процессы симуляции их функционирования имеют существенные различия. Поэтому «валить все в одну кучу» неразумно и противоречит методологии XML.

**Постановка задачи:** разработать способы независимого ХЗD-моделирования структуры МР и моделей его тел, не требующих для их практического использования знаний декларативного языка разметки трехмерных миров, и продемонстрировать их на примерах моделирования типовых МР с шестью степенями подвижности и двухпальцевым схватом; обосновать эффективность предлагаемых способов описания входной информации для идентификации параметров моделей тел МР.

### 1. Правила описания МР

Для формального описания МР в первую очередь необходимо по кинематической схеме и/или внешнему виду (фотографии, картинке, мысленному воображению) МР занумеровать тела числами  $0, 1, 2, 3, \dots, N$ . Здесь приняты следующие обозначения:  $0$  – номер неподвижного тела (стойки, станины, основания);  $1$  – первое по порядку тело, образующее с неподвижным телом Кинематическую Пару (КП), т. е. подвижное сочленение (шарнир или связь, допускающую движение этого тела относительно неподвижного тела);  $2$  – второе тело, образующее КП с первым телом и т. д.;  $\dots$ ;  $N$  – номер последнего по порядку тела (не считая пальцы схвата), образующего КП с предшествующим  $(N-1)$ -м телом. В ангулярных МР с шестью степенями свободы подвижные тела имеют, как правило, следующие названия (имена):  $1$  – поворотная платформа;  $2$  – плечо;  $3$  – локоть (предплечье);  $4, 5, 6$  – тела кисти. В таких МР первые три тела переносят точку подвеса схвата в целевое положение, а тела кисти обеспечивают целевую ориентацию схвата. В ПС «СисТел» для идентификации тел МР используется обобщенное имя – "тело\_i", где  $i$  – порядковый номер тела. Например, тела кисти имеют имена "тело\_4", "тело\_5", "тело\_6".

В дальнейшем номер или обозначение  $(i, j, k)$  номера в скобках после аббревиатуры указывает на номер тела МР. Например, КП $(i)$  – КП, связывающая  $i$ -е тело с его базой, т. е. с предшествующим по порядку телом. ВКП $(i)$  – Вращательная КП $(i)$ , в которой  $i$ -е тело может вращаться вокруг оси, жестко связанной с предшествующим телом. ПКП $(i)$  – Поступательная КП $(i)$ , в которой  $i$ -е тело может двигаться поступательно вдоль оси, жестко связанной с предшествующим телом.

После нумерации тел и их КП необходимо в каждом теле выбрать полюс, т. е. с  $i$ -м телом ( $i = 0, 1, 2, \dots, N$ ) жестко связать точку  $O_i$ , соблюдая следующее правило. Для ВКП( $i$ ) точка  $O_i$  должна лежать на оси относительного вращения  $i$ -го тела. На этой оси выбрать орт  $\bar{q}_i$  (вектор единичной длины), определяющий положительное направление вращения по правилу. Если смотреть навстречу орту  $\bar{q}_i$ , то поворот на угол  $q_i$  против хода стрелки часов считается положительным. По умолчанию в ПС «СисТел» углы поворота измеряются в радианах.

Для формального (математического) описания МР необходимо выбрать исходное (начальное) положение тел МР, в котором для ВКП( $i$ ) считать, что  $q_i = 0$ . В этом положении с  $i$ -м телом необходимо мысленно связать правую Систему Координат Тела (СКТ) по правилу. Ось  $O_i X_i$  направить горизонтально вправо, ось  $O_i Y_i$  – вертикально вверх. Это правило позволяет не изображать СКТ на Кинематических Схемат (КС) МР, что уменьшает их громоздкость. Важно отметить, что выбранный способ введения СКТ обеспечивает (в исходном положении тел ВКП) параллельность их осей соответствующим осям ( $O X$ ,  $O Y$ ,  $O Z$ ) правой Системы Координат (СК) ХЗД-сцены с началом в центре экрана монитора, где ось  $O X$  направлена горизонтально вправо, ось  $O Y$  – вертикально вверх.

В исходном положении всех тел МР, т. е. когда  $q_i = 0$  для всех  $i$ , необходимо определять Относительные Координаты Полюса (ОКП)  $O_i$  в СК базы  $i$ -го тела, т. е. в СКТ( $i-1$ ).

С целью упрощения формального описания МР и его математических моделей (уравнений кинематики, статики и динамики) желательно совмещать полюса тел. Например, если оси вращения соседних тел пересекаются, то полюса этих тел желательно совместить. Как правило, оси вращения трех последних тел типового МР (тела кисти) пересекаются. Поэтому можно положить  $O_4 = O_5 = O_6$ . В случае ПКП( $i-1$ ) и ВКП( $i$ ) можно положить  $O_{i-1} = O_i$ , так как полюс поступательного тела можно выбирать в любом месте этого тела. Для ВКП(1) полюса неподвижного и первого тела условимся совмещать, т. е.  $O_0 = O_1$ .

Для упрощения процесса геометрической и кинематической параметризации МР рекомендуется на КС МР изображать полюса тел и орты  $\bar{q}_i$  или положительные направления обобщенных координат  $q_i$ , описывающих относительные положения тел. Многочисленные примеры построения КС МР приведены в учебном пособии [1]. В ПС «СисТелМР» для автоматической svg-генерации КС типовых МР используется JS-функция "генераторКСтиповыхМР.js".

Остальные правила и рекомендации формального описания МР относятся к параметризации структурных, массо-инерционных, динамических и физических свойств, которые выходят за пределы заявленной темы статьи.

## 2. Кинематические схемы типовых ангулярных МР

Большинство ангулярных МР имеют КС, изображенную на рис. 1, или являются ее частным случаем, соответствующим нулевым значениям геометрических параметров  $L_1$  и/или  $L_3$  [1]. Например, КС в случае  $L_1 = L_3 = 0$  имеют следующие МР: Motoman SIA20F (Fanuc, Япония); PUMA; Кобра (г. Миасс, Россия). Случаю  $L_3 = 0$  соответствуют КС, например, следующих МР: Kawasaki RS03N (Япония); Staubli RX170L (Швейцария); Reis RV10-6 (Германия). Случаю  $L_1 = 0$  соответствуют КС, например, следующих МР: Россия – TUR 15, Япония – Toshiba TV 800, Германия – Kuka KR 210-2. КС, в которой  $L_1 > 0$ ,  $L_3 > 0$ , назовем типовой. В следующих строках перечислены примеры МР с типовыми КС и приведены числовые значения (в мм) их геометрических параметров  $L_i$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots, 5$ .

Motoman MA1440:	$L_0 = 450, L_1 = 155, L_2 = 614, L_3 = 200, L_4 = 640, L_5 = 100.$
ROBOTOX_P6A-750-6:	$L_0 = 327, L_1 = 150, L_2 = 300, L_3 = 146, L_4 = 370, L_5 = 110.$
CR-35iA:	$L_0 = 1180, L_1 = 150, L_2 = 790, L_3 = 150, L_4 = 860, L_5 = 100.$
HIWIN RA605:	$L_0 = 434, L_1 = 30, L_2 = 281, L_3 = 40, L_4 = 338, L_5 = 86.$

В рекламных проспектах МР их схемы содержат, как правило, не только перечисленные геометрические размеры, но и диапазоны изменения углов поворота тел. В ПС «СисТелМР» для типовых ангулярных МР эти диапазоны привязываются к исходному положению на рис. 1, в котором считается, что  $q_i = 0$  для всех  $i$ . Методика учета кинематических параметров и их ограниче-

ний рассматривается в кинематическом прототипировании МР, что выходит за рамки заявленной темы статьи.

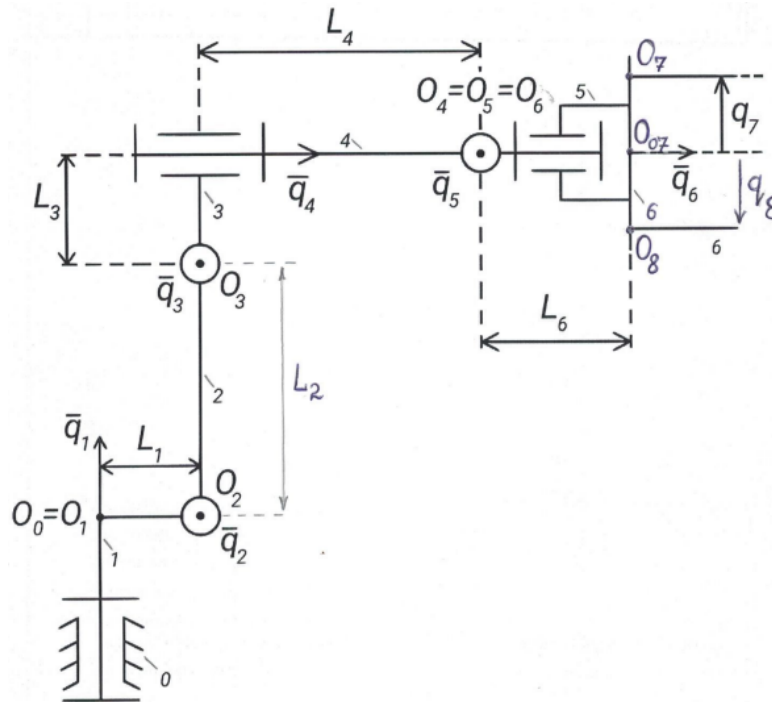


Рис. 1. КС типовых ангуляных МР  
Fig. 1. Kinematic diagrams (KD) of typical angular manipulation robots (MR)

Учитывая, что математические модели ангуляных МР в виде аналитических формул с явно выраженными параметрами имеют минимальное число арифметических операций для КС, в которых  $L_1 = L_3 = 0$ , назовем такие МР простыми [1]. Очевидно, что с геометрической точки зрения простые МР отличаются друг от друга только длинами плеча и предплечья (локтя). Их КС с двухпальцевым схватом изображена на рис. 2.

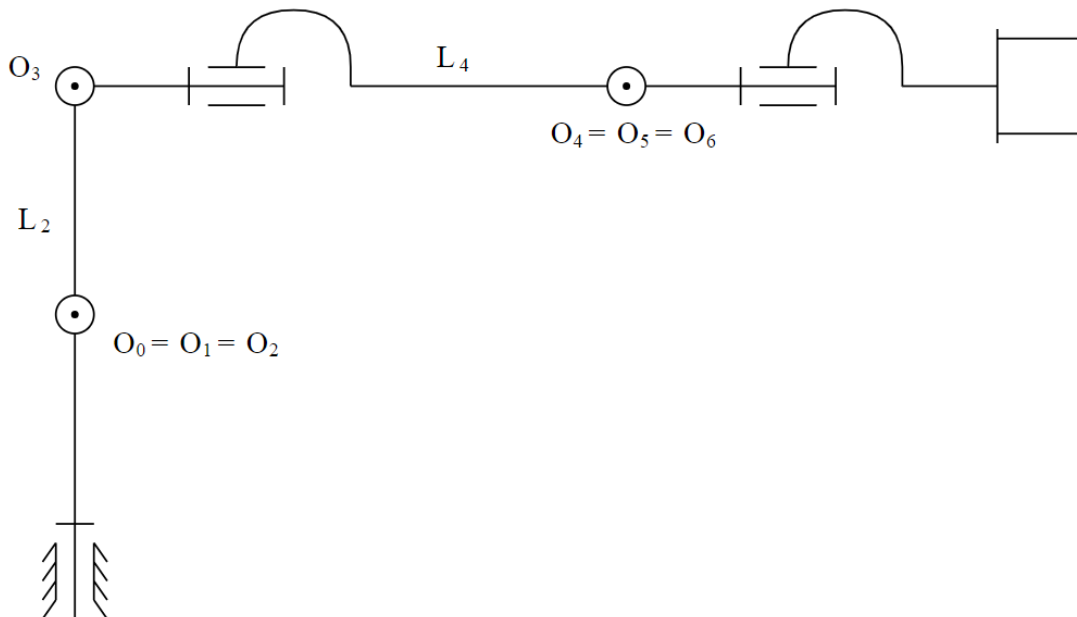


Рис. 2. КС простых ангуляных МР  
Fig. 2. KD of simple angular MR

В текущей версии ПС «СисТелРТК» и ее предка «СисТелМР» тела моделируются Графическими Объектами (ГО) бокс (прямоугольный параллелепипед), цилиндр, конус и шар, а также их всевозможными деформациями. Это обеспечивает близкие к реалистичным изображения тел типовых МР и тел других механических подсистем РТК. Для целей построения программных движений тел МР с заданной точностью и их анимации существующих возможностей текущей версии ПС твердотельного 3D-моделирования достаточно. Следует заметить, что более реалистичные изображения тел МР замедляют процесс их рендеринга, не влияя на точность построения программных движений тел. Для максимально реалистичных видов МР в статике, которые используются, как правило, в презентационных и рекламных целях, рекомендуется использовать возможности Inline-подключения фотографических изображений тел, которые натянуты на их формы (узлы <Shape>).

### 3. Моделирование структуры и геометрии МР

В листинге 1 представлена Х3D-разметка структуры простого ангулярного МР, КС которого изображена на рис. 2. Здесь ОКП размечены в полях translation узлов <Transform> и используются Inline-подключения моделей тел, которые хранятся в файлах "тело\_i.x3d", где i – порядковый номер тела. Процесс формирования содержимого этих файлов рассматривается в следующих разделах.

Если модель тела представляется одним боксом, то, открыв Х3D-плеером файл "простойМРсПростейшимиМТ.js", увидим на экране монитора Х3D-модель, представленную на рис. 3.

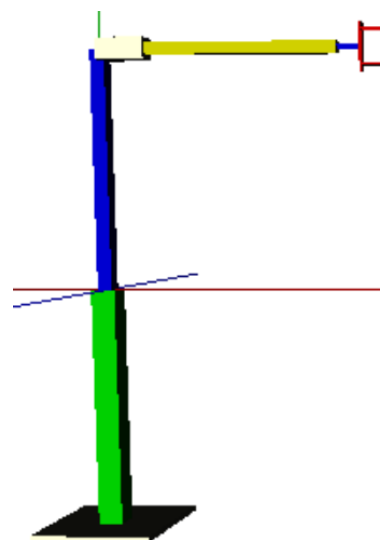


Рис. 3. Х3D-модель простого МР с простейшими МТ  
Fig. 3. Х3D model of a simple MR with simple body models (BM)

**Листинг 1.** Х3D-разметка простого ангулярного МР (хранится в файле "простойМРсПростейшимиМТ.js").

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- простойМРсПростейшимиМТ.x3d -->
<X3D version="3.2"> <Scene> <Background skyColor="1 1 1"/> <Viewpoint position="0 0 5" />

<Transform translation = "-2, 0, 0" showProxyGeometry = "true"> <Inline url = "тело_0.x3d"/>
  <Transform> <Inline url = "тело_1.x3d"/>
    <Transform> <Inline url = "тело_2.x3d"/>
      <Transform translation = "0, 1, 0"> <Inline url = "тело_3.x3d"/>
        <Transform translation = "1, 0, 0"> <Inline url = "тело_4.x3d"/>
          <Transform> <Inline url = "тело_5.x3d"/>
            <Transform> <Inline url = "тело_6.x3d"/>
              <Transform translation = "0.1, 0.07, 0"> <Inline url = "тело_7.x3d"/> </Transform>
              <Transform translation = "0.1, -0.07, 0"> <Inline url = "тело_7.x3d"/> </Transform>
            </Transform>
          </Transform>
        </Transform>
      </Transform>
    </Transform>
  </Transform>
</Transform> </Transform> </Transform> </Transform> </Transform> </Transform>

</Scene></X3D>
```

В этом и следующем примерах показано, как структура МР размечается Узлами <Transform> (УТ), и ОКП описываются в полях translation, т. е. в Полях Перемещения (ПП).

Из Х3D-кода в листинге 1 видно, что структура вложенности УТ друг в друга соответствует структуре МР – это система тел с одной открытой ветвью [1]. Исключение составляет схват, в котором базой пальцев является "тело\_6". Поэтому два последних УТ вложены в УТ шестого тела. Видно, что текущее расстояние между пальцами равно  $2 \cdot 0.07 = 0.14$  м, так как в ПП пальцев указаны ОКП, в которых модули ординат равны 0.07 м. Координаты полюсов пальцев на оси абсцисс СКТ(6) совпадают и равны длине кисти. Координату на оси  $O_6Y_6$  верхнего пальца ("тело\_7") обозначим через  $q_7$ . Видно, что  $q_7 = 0.07$ . Координату на оси  $O_6Y_6$  нижнего пальца обозначим через  $q_8$ . Здесь считается, что  $q_8 = -q_7$ , т. е. при анимации движений подвижных тел МР пальцы

будут синхронно сходиться (сжиматься) для захвата и удержания груза и расходиться (разжиматься) для его освобождения. Разметка каждого пальца одинакова. Поэтому вместо файла "тело\_8.x3d" используется файл "тело\_7.x3d".

Из X3D-кода в листинге 1 видно, что "тело\_0" сдвинуто на два метра влево от центра экрана монитора и показана СКТ. Если showProxyGeometry = "false", то оси X, Y, Z в виде тонких красной, зеленой и синей линий изображаться не будут.

В ПП фактически описывается геометрия МР, т. е. расстояния между полюсами тел и их длины. Из этих параметров следует вылет руки МР, т. е. расстояние от полюса первого тела до центра схвата. Из X3D-кода в листинге 1 видно, что длины плеча, предплечья и кисти равны соответственно 1, 1 и 0.1 м, т. е. вылет руки – 2.1 м.

В процессе прототипирования МР ПП переносятся в интерфейсную часть прототипа.

В качестве второго примера в листинге 2 представлена X3D-разметка структуры и геометрии типового ангулярного МР, КС которого изображена на рис. 1.

**Листинг 2.** X3D-разметка типового ангулярного МР  
(хранится в файле "типовойМРсПростымиМТ. x3d").

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- типовойМРсПростымиМТ. x3d -->
<X3D version="3.2"> <Scene> <Background skyColor="1 1 1"/> <Viewpoint position="0 0 3" />

<Transform translation="-2, 0, 0" showProxyGeometry = "true"> <Inline url = "тело_0.x3d"/>
<Transform> <Inline url = "тело_1.x3d"/>
  <Transform translation = "0.155, 0, 0"> <Inline url = "тело_2.x3d"/>
    <Transform translation = "0, 0.614, 0"> <Inline url = "тело_3.x3d"/>
      <Transform translation = "0.64, 0.2, 0"> <Inline url = "тело_4.x3d"/>
        <Transform> <Inline url = "тело_5.x3d"/>
          <Transform> <Inline url = "тело_6.x3d"/>
            <Transform translation = "0.1, 0.07, 0"> <Inline url = "тело_7.x3d"/> </Transform>
            <Transform translation = "0.1, -0.07, 0"> <Inline url = "тело_7.x3d"/> </Transform>
          </Transform> </Transform> </Transform> </Transform> </Transform> </Transform>
        </Transform>
      </Transform>
    </Transform>
  </Transform>
</Transform>

</Scene></X3D>
```

Здесь в отличие от листинга 1 точка наблюдения за сценой находится на расстоянии 3 м от ее центра. Структура МР осталась прежней. Геометрия изменилась. ОКП(2) в СКТ(1) имеют значение  $(L_1, 0, 0)$ , где горизонтальный сдвиг (вылет) оси качания плеча (тело\_2) относительно оси вращения поворотной платформы (тело\_1)  $L_1 = 0.155$  м. ОКП(3) в СКТ(2) имеют значение  $(0, L_2, 0)$ , где длина плеча  $L_2 = 0.614$  м ОКП(4) в СКТ(3) имеют значение  $(L_4, L_3, 0)$ , где  $L_3 = 0.2$  м,  $L_4 = 0.64$  м ОКП(7) в СКТ(6) имеют значение  $(L_5, 0.07, 0)$ , где  $L_5 = 0.1$  м. Приведенные расстояния соответствуют МР Motoman MA1440.

Следует отметить, что разметка структуры всех универсальных МР (с шестью степенями свободы) одинакова. Поэтому в процессе прототипирования универсальных МР в интерфейсную часть относят только ПП.

Перед представлением внешнего вида X3D-модели типового ангулярного МР с разметкой в листинге 2 рассмотрим способы моделирования тел.

#### 4. Простейшие модели тел

Опыт моделирования типовых МР показывает, что для эффективного (простого, быстрого и достаточно точного) моделирования тел МР достаточно использовать боксы и цилиндры. Здесь предлагается обобщенный способ моделирования тел, основанный на внешнем X3D-прототипировании, в котором в качестве интерфейса выступает список вещественных чисел, кодирующих геометрические свойства тел (внешний вид, размеры, положение и ориентацию, цвет). В частности, подробно описываются три возможных способа (простейшего, простого и типового) цифрового кодирования входной информации для построения X3D-моделей тел. Любой пользо-

ватель, владеющий основами Х3D и JS-программирования, сможет разработать и программно реализовать свой (собственный, уникальный, корпоративный) способ моделирования тел.

Простейшая Модель Тела (МТ) состоит из одного бокса. Его размеры и положение в СКТ описываются (кодируются) шестью числами. Первые три положительных числа являются размерами (в метрах) бокса вдоль осей (X, Y, Z) СКТ. Три следующих числа являются декартовыми координатами геометрического центра бокса в СКТ. Последние три числа описывают цвет бокса в RGB-коде.

Для записи разметки экземпляра бокса введем следующие обозначения перечисленных девяти параметров.  $p_0, p_1, p_2$  – размеры бокса.  $p_3, p_4, p_5$  – координаты бокса в СКТ.  $p_6, p_7, p_8$  – код цвета бокса. Тогда для разметки экземпляра бокса с заданным положением в СКТ необходимо форму (узел <Shape>) бокса (узел <Box>) поместить в УТ, т. е. разметка экземпляра бокса может иметь вид:

```
<Transform scale = ' p0/2, p1/2, p2/2 ' translation = ' p3, p4, p5 ' >  
  <Shape> <Box/>  
  <Appearance> <Material diffuseColor = ' p6, p7, p8 ' /> </Appearance>  
</Shape>  
</Transform>
```

где вместо обозначений  $p_i$  должны стоять конкретные числа. Согласно Х3D-спецификации в классической разметке бокса поле scale не используется и вместо записи <Box/> с размерами бокса по умолчанию (с длинами сторон по два метра) используется запись <Box size = ' p<sub>0</sub>, p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub> ' />. Здесь используется поле scale по двум причинам. Во-первых, это поле имеет произвольный тип доступа, что позволит в следующих версиях ПС учитывать деформации тел. Во-вторых, уже в текущей версии ПС при использовании в МТ цилиндров, конусов и шаров поле scale позволяет расширить виды ГО до произвольных эллипсоидов, а также цилиндрических и конических поверхностей с эллиптическим основанием.

В листинге 3 приведен JS-код функции initialize(), генерирующей приведенную разметку бокса, если этой функции доступен список параметров конкретного бокса.

*Листинг 3.* JS-код функции, генерирующей Х3D-разметку простейших МТ (хранится в файле "генераторПростейшейМТ.js").

```
function initialize() { if ( параметры[0] > 0 ) { var ГО, сцена = Browser.currentScene;  
  СКТ = сцена.createNode("Transform"); ГО = сцена.createNode("Box");  
  СКТ.scale = new SFVec3f(параметры[0]/2, параметры[1]/2, параметры[2]/2);  
  СКТ.translation = new SFVec3f(параметры[3], параметры[4], параметры[5]);  
  if ( параметры.length > 6 ) { var форма = сцена.createNode("Shape"),  
    вид = сцена.createNode("Appearance"), материал = сцена.createNode("Material");  
    материал.diffuseColor = new SFCOLOR(параметры[6], параметры[7], параметры[8]);  
    вид.addChild(материал); форма.addChild(ГО, вид); СКТ.addChild(форма);  
    сцена.getNamedNode("тело").addChild(СКТ); }  
  else { СКТ.addChild(ГО); сцена.getNamedNode("тело").addChild(СКТ); }; }  
}
```

Из этого JS-кода видно, что если единственное число в списке параметров МТ равно нулю, то рассматриваемое тело не имеет изображения. Такая ситуация характерна для простейших моделей 4-го и 5-го тел МР, т. е. двух первых тел кисти. Если параметры  $p_6, p_7, p_8$  в описании МТ отсутствуют, то используется цвет бокса по умолчанию, т. е. серый цвет.

В генераторах МТ используются следующие функции (методы объектов), реализованные в Х3D3.0:

createNode(String nodetype) – создает и возвращает новый узел данного типа узла. Тип возвращаемого значения SFNode;

getNamedNode(String nodeName) – возвращает именованный узел, идентифицированный заданным именем. Тип возвращаемого значения SFNode;

addChild(SFNode node) – добавляет указанный узел или узлы (SFNode или MFNode) к вызывающему узлу.



Теперь достаточно сконструировать разметку протодекларации прототипа тела, в которой в качестве интерфейса выступает список параметров МТ. Такая разметка представлена в листинге 4.

*Листинг 4.* Разметка внешней протодекларации прототипа произвольной МТ, параметры которой передаются через список вещественных чисел. Разметка хранится в файле "прототипТела.x3d".

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- прототипТела.x3d -->
<X3D version = "3.2"> <Scene>
<ProtoDeclare name = "прототипТела">
  <ProtoInterface>
    <field name = "код" type = "MFFloat" accessType = "initializeOnly"
      appinfo = " Параметрами Модели Тела (МТ) является список вещественных числе,
      интерпритация которых зависит от выбранного способа кодирования МТ и определяет
      JS-код генератора МТ. Подробности изложены в файле 'способыКодированияМТ.txt' "/>
  </ProtoInterface>
  <ProtoBody>
    <Transform DEF = "тело" showProxyGeometry = "true"/>
    <Script url = " генераторПростейшихМТ.js">
      <field name = 'параметры' type = 'MFFloat' accessType = 'initializeOnly'/>
      <IS> <connect nodeField = "параметры" protoField = "код"/> </IS>
    </Script>
  </ProtoBody>
</ProtoDeclare> </Scene> </X3D>
```

Важно отметить, что эта протодекларация позволяет использовать любой способ кодирования МТ в форме списка вещественных чисел. Для каждого способа необходимо разработать свой JS-генератор экземпляров МТ. JS-генератор для простейшей МТ представлен в листинге 3. В следующем листинге представлена разметка экземпляра простейшей МТ, которая хранится в файле "тело\_1.x3d", т. е. это модель первого по порядку тела МР.

*Листинг 5.* Экземпляр простейшей МТ (хранится в файле "тело\_1.x3d").

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- тело_1.x3d -->
<X3D version="3.2"> <Scene> <Background skyColor="1 1 1"/> <Viewpoint position="0 0 5" />
<ExternProtoDeclare name = "прототипТела" url = "прототипТела.x3d"/>
<ProtoInstance name = "прототипТела"> <fieldValue name = "код" value = "
0.1, 1, 0.1, 0, -0.5, 0, 0, 1, 0
"/> </ProtoInstance> </Scene> </X3D>
```

Этот X3D-код специально оформлен (отформатирован) так, чтобы выделить отдельной строкой его уникальную часть, т. е. Цифровой Код (ЦК), на основе которого генерируется простейшая МТ. Для этого использованы пробельные символы (один или несколько пробелов, один или несколько символов табуляции, один или несколько символов возврата каретки и т. д.). Если открыть файл "тело\_1.x3d", например, плеером InstantReality Player, то в центре экрана монитора ПЭВМ появится СКТ в виде трех тонких взаимно перпендикулярных линий, под которыми расположен (вертикально вниз) бокс зеленого цвета высотой 1 м с квадратным поперечным сечением (0.1×0.1 м).

С целью сокращения записей условимся типовые строки в X3D-разметке экземпляра МТ не приводить в текстах листингов, т. е. вместо полных текстов листингов для экземпляров МТ ограничимся только их ЦК, которые будем построчно записывать после обобщенных имен тел (тело\_0, тело\_1, тело\_2, ...) и двоеточия. Например, в следующих строках представлены имена тел и следующие за ними (после двоеточия) ЦК простейших МТ простого МР, КС которого изображена на рис. 2, а X3D-модель представлена на рис. 3:

тело_0:	0.5,	0.02,	0.5,	0,	-1,	0										
тело_1:	0.1,	1,	0.1,	0,	-0.5,	0	0,	1,	0							
тело_2:	0.06,	1,	0.06,	0,	0.5,	0	0,	0,	1							
тело_3:	0.2,	0.09,	0.09,	0.1,	0,	0										
тело_4:	0.8,	0.5,	0.5,	-0.4,	0,	0	1,	1,	0							
тело_5:	0.1,	0.02,	0.02,	0.05,	0,	0	0,	0,	1							
тело_6:	0.01,	0.2,	0.04,	0.1,	0,	0	1,	0,	0							
тело_7:	0.1,	0.01,	0.04,	0.05,	0,	0	1,	0,	0							

Из этих строк ЦК видно, что неподвижное тело и третье тело имеют цвет по умолчанию и боксы имеют квадратные сечения, кроме двух последних.

### 5. Простые модели тел

В МТ типовых ангулярных МР достаточно использовать один цилиндр (для моделирования ВКП) и боксы. Будем считать, что цвет всех ГО в разметке одного тела одинаков. Тогда эффективным (коротким и простым в интерпритации) будет следующий способ цифрового кодирования МТ, который назовем простым. Если ЦК начинается с числа ноль, то цилиндр в модели МР не используется и следующие за нулем три числа кодируют цвет боксов, параметры которых следуют за кодом их цвета. Если первое число в ЦК не нулевое, то оно равно радиусу цилиндра, за которым записывается его высота и код оси цилиндра, т. е. 1 – для оси X, 2 – для оси Y, 3 – для оси Z. Следующие шесть чисел описывают положение цилиндра в СКТ и цвет всех ГО в МТ. Таким образом, если первое число в ЦК не нулевое, то первые девять чисел описывают размеры, ориентацию и положение геометрического центра цилиндра в СКТ, а также цвет всех ГО. Остальные числа (по шесть чисел на бокс) описывают размеры и положения боксов в СКТ. Если такие числа отсутствуют, то в МТ используется только цилиндр.

На рис. 4 приведен пример простой Х3D-модели типового ангулярного МР, КС которого приведена на рис. 1. Согласно принятому соглашению уникальные части в разметках экземпляров МТ МР на рис. 4 имеют следующие ЦК:

тело_0:	0	1	0	0,	0.5,	0.02,	0.5,	0,	-0.45,	0											
тело_1:	0.1,	0.2,	2,	0,	-0.35,	0,	1,	0,	0,	0.02,	0.3,	0.02,	0,	-0.15,	0,	0.155,	0.02,	0.02,	0.077,	0,	0
тело_2:	0.05,	0.1,	3,	0,	0,	0,	0,	1,	0,	0.02,	0.614,	0.02,	0,	0.307,	0						
тело_3:	0.05,	0.1,	3,	0,	0,	0,	0,	0,	1,	0.02,	0.2,	0.02,	0,	0.1,	0						
тело_4:	0.05,	0.1,	1,	-0.64,	0,	0,	1,	1,	0,	0.64,	0.02,	0.02,	-0.32,	0,	0						
тело_5:	0.05,	0.1,	3,	0,	0,	0,	1,	0,	1												
тело_6:	0.05,	0.1,	1,	0.05,	0,	0,	0,	1,	1,	0.004,	0.2,	0.04,	0.1,	0,	0						
тело_7:	0	1,	0,	0	0.1,	0.01,	0.04,	0.05,	0,	0											

Из этих ЦК видно, что в моделях основания и пальцев схвата цилиндры не используются. Цилиндр в модели первого тела имеет радиус 0.1 м, высоту 0.2 м и его ось вертикальна. Цилиндры в моделях остальных тел одинаковы ( $r = 0.05$  м,  $h = 0.1$  м) и их оси ориентированы горизонтально. Оси тел с номерами 2, 3, 5 параллельны оси OZ. Оси тел с номерами 4, 6 – параллельны оси OX. Боксы в моделях всех тел кроме пальцев схвата имеют квадратные сечения.

JS-код генератора экземпляров простых МТ представлен в листинге 6.

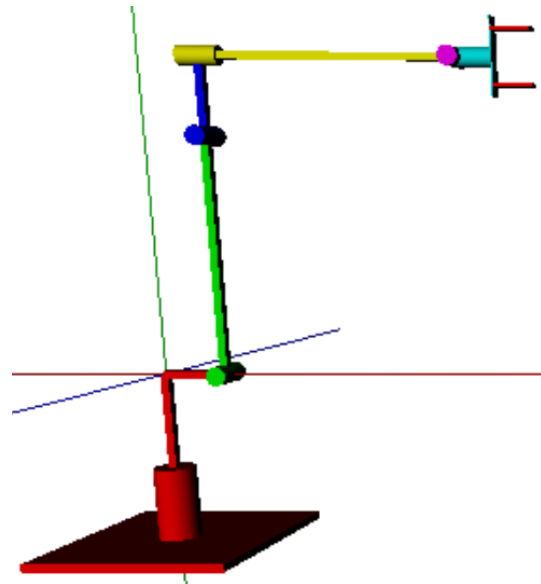


Рис.4. Х3D-модель типового МР с простыми МТ  
Fig. 4. X3D model of a typical MR with simple BM

**Листинг 6.** JS-код функции, генерирующей X3D-разметку простой МТ (хранится в файле "генераторПростойМТ.js").

```
function initialize() { var ГО, СКТ, сцена = Browser.currentScene, N=параметры.length; //
if ( параметры[0] > 0 ) { i=6;
  СКТ = сцена.createNode("Transform"); ГО = сцена.createNode("Cylinder");
  СКТ.scale = new SFVec3f(параметры[0]/2, параметры[1]/2, параметры[0]/2);
  if (параметры[2]==1) СКТ.rotation = new SFRotation(0, 0, 1, Math.PI/2);
  if (параметры[2]==3) СКТ.rotation = new SFRotation(1, 0, 0, Math.PI/2);
  СКТ.translation = new SFVec3f(параметры[3], параметры[4], параметры[5]); }
else { i=1; СКТ = сцена.createNode("Transform"); ГО = сцена.createNode("Box");
  СКТ.scale = new SFVec3f(параметры[i+3]/2, параметры[i+4]/2, параметры[i+5]/2);
  СКТ.translation = new SFVec3f(параметры[i+6], параметры[i+7], параметры[i+8]); };
var форма = сцена.createNode("Shape"),
вид = сцена.createNode("Appearance"), материал = сцена.createNode("Material");
материал.diffuseColor = new SFColor(параметры[i], параметры[i+1], параметры[i+2]);
вид.addChild(материал); форма.addChild(ГО, вид); СКТ.addChild(форма);
сцена.getNamedNode("тело").addChild(СКТ);

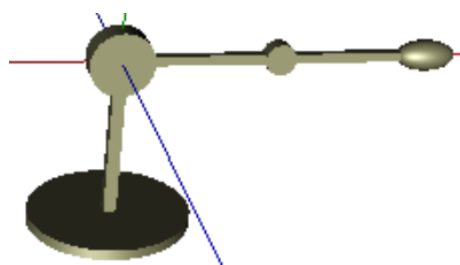
if ( N > 10 ) { j = 8; for ( var i=0; i<N; i++) {
  СКТ = сцена.createNode("Transform"); ГО = сцена.createNode("Box");
  СКТ.scale = new SFVec3f(параметры[j+1]/2, параметры[j+2]/2, параметры[j+3]/2);
  СКТ.translation = new SFVec3f(параметры[j+4], параметры[j+5], параметры[j+6]);
  var форма = сцена.createNode("Shape"),
  вид = сцена.createNode("Appearance"), материал = сцена.createNode("Material");
  материал.diffuseColor = new SFColor(параметры[6], параметры[7], параметры[8]);
  вид.addChild(материал); форма.addChild(ГО, вид); СКТ.addChild(форма);
  сцена.getNamedNode("тело").addChild(СКТ); j+=6; } }
```

## 6. Типовые модели тел и их цифровое кодирование в одном x3d-файле

Рассмотрим еще один способ кодирования входной информации для МТ, который назовем типовым. В нем для моделирования тела используются боксы, цилиндры, конусы, шары, а также их всевозможные деформации. В ЦК типовой МТ перечисленные ГО могут следовать в любом порядке. Для кодирования каждого из перечисленных ГО используются следующие 14 чисел:

кодГО,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_z$ ,  $q$ ,  $R$ ,  $G$ ,  $B$ ,

где кодГО – число от 0 до 3 (0 – бокс, 1 – цилиндр, 2 – конус, 3 – шар);  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – деформируемые размеры ГО по осям СКТ;  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – декартовы координаты геометрического центра ГО в СКТ;  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_z$ ,  $q$  – параметры Эйлера поворота ГО ( $c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_z$  – направляющие косинусы оси поворота в СКТ,  $q$  – угол поворота);  $R$ ,  $G$ ,  $B$  – код цвета ГО. Если в ЦК 11 чисел, то используется цвет тел по умолчанию.



**Рис. 5.** X3D-модель трехзвенного МР с типовыми МТ

**Fig. 5.** X3D model of a three-link MR with typical BM

До сих пор ЦК каждой МТ хранился в отдельном x3d-файле. Недостаток такого подхода начинает проявляться, когда необходимо разработать несколько десятков МТ, например, в процессе X3D-моделирования РТК. Для таких случаев рекомендуется использовать второй способ X3D-моделирования структуры и геометрии МР, который представлен в листинге 7, на примере модели трехзвенного МР, в котором используются типовые МТ и схват с грузом моделируется эллипсоидом. Единственный x3d-файл, содержащий ЦК типовых МТ, представлен в листинге 8 и в листинге 9 представлен JS-код генератора X3D-разметки типовых МТ. Пользователю рассматриваемого подхода в моделировании МР достаточно менять только ЦК МТ и ПП в УТ структурной разметки. Внешний вид рассматриваемой модели МР изображен на рис. 5. Важно отметить, что в X3D-коде внешнего

моделирования МР достаточно менять только ЦК МТ и ПП в УТ структурной разметки. Внешний вид рассматриваемой модели МР изображен на рис. 5. Важно отметить, что в X3D-коде внешнего

прототипирования МТ (см. листинг 10) по сравнению с листингом 3 изменен только тип доступа к ЦК МТ. В дальнейшем это позволит динамически (на лету) менять геометрию МТ.

**Листинг 7.** Х3D-код структуры и геометрии трехзвенного МР, для которого ЦК МТ хранится в файле "данные.js".

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- храниться в файле "MP111.x3d" -->
<X3D version="3.2"> <Scene> <Background skyColor="1 1 1"/> <Viewpoint position="1 1 6" />
<ExternProtoDeclare name="прототипТела" url="прототипТела.x3d"/>

<Transform showProxyGeometry = "true">
  <ProtoInstance DEF="тело_0" name="прототипТела">
    <fieldValue name="код"/>
  </ProtoInstance>
</Transform>
<Transform>
  <ProtoInstance DEF="тело_1" name="прототипТела">
    <fieldValue name="код"/>
  </ProtoInstance>
</Transform>
<Transform>
  <ProtoInstance DEF="тело_2" name="прототипТела">
    <fieldValue name="код"/>
  </ProtoInstance>
</Transform>
<Transform translation="1, 0, 0">
  <ProtoInstance DEF="тело_3" name="прототипТела">
    <fieldValue name="код"/>
  </ProtoInstance>
</Transform> </Transform> </Transform> </Transform>

<Script url="данные.js"/>
</Scene> </X3D>
```

**Листинг 8.** JS-код, в котором ЦК типовых МТ хранятся в одном файле "данные.js"

```
function initialize() { сцена = Browser.currentScene;
сцена.getNamedNode('тело_0').код = new MFFloat(0, 0.04, 0.5, 0.04, 0, -0.5, 0, 0, 0, 1, 0,
1, 0.5, 0.03, 0.5, 0, -1, 0, 0, 0, 1, 0);

сцена.getNamedNode('тело_1').код = new MFFloat(1, 0.2, 0.08, 0.2, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1.57);

сцена.getNamedNode('тело_2').код = new MFFloat(0, 0.5, 0.03, 0.03, 0.5, 0, 0, 0, 0, 1, 0);

сцена.getNamedNode('тело_3').код = new MFFloat(1, 0.1, 0.05, 0.1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1.57,
0, 0.5, 0.03, 0.03, 0.5, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 3, 0.2, 0.1, 0.1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
}
```

**Листинг 9.** JS-код генератора типовых МТ (хранится в файле "генераторТиповойМТ.js")

```
var N, j = 0, ГО, видыФорм=[], поляФорм=[], translation=[], rotation=[],
сцена = Browser.currentScene;
function Параметры(параметры) { N = параметры.length/11;
for(var i=0; i<N; i++) { видыФорм[i] = параметры[j];
поляФорм[i] = new SFVec3f(параметры[j+1],параметры[j+2],параметры[j+3]);
translation[j] = new SFVec3f(параметры[j+4], параметр[ы][j+5], параметр[ы][j+6]);
rotation[i]=new SFRotation(параметры[j+7],параметры[j+8],параметры[j+9],параметры[j+10]);
j+=11;
};
for (var i=0; i<N; i++) { var трасформатор = сцена.createNode("Transform");
трасформатор.translation = translation[i]; трасформатор.rotation = rotation[i];
трасформатор.scale= new SFVec3f(поляФорм[i][0], поляФорм[i][1], поляФорм[i][2]);
```

```
var форма = сцена.createNode("Shape");
switch(видыФорм[i]) {
  case 0: ГО=сцена.createNode("Box"); break; case 1: ГО=сцена.createNode("Cylinder"); break;
  case 2: ГО=сцена.createNode("Cone"); break; case 3: ГО=сцена.createNode("Sphere"); break;
};
трасформатор.addChild(ГО); сцена.getNamedNode("тело").addChild(трасформатор); } }
```

*Листинг 10.* X3D-код внешнего прототипирования МТ.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- прототипТела.x3d -->
<X3D version="3.2"> <Scene>
<ProtoDeclare name="прототипТела">
  <ProtoInterface>
    <field name="код" type="MFFloat" accessType="inputOutput"/>
  </ProtoInterface>
  <ProtoBody>
    <Transform DEF="тело" showProxyGeometry = "false"/>
    <Script url="генераторТиповойМТ.js">
      <field name='Параметры' type='MFFloat' accessType='inputOutput'/>
      <IS> <connect nodeField="Параметры" protoField="код"/> </IS>
    </Script>
  </ProtoBody>
</ProtoDeclare> </Scene> </X3D>
```

### Заключение

Методика раздельного моделирования структуры МР и внешнего вида X3D-моделей тел с использованием подключения МТ в файл структуры обеспечивает следующие преимущества. Во-первых, внешний вид МР можно последовательно (итерационно) доводить до совершенства независимо от решения других задач моделирования МР. Во-вторых, разные версии внешнего вида МР эффективно использовать в различных задачах X3D-моделирования МР и РТК. Например, для обеспечения максимально быстрой анимации МР в составе функционирующей РТК рекомендуется использовать простейшие МТ. Для анализа возможных столкновений тел МР с телами внешней среды желательно моделировать тела МР боксами, которые охватывают все выступающие части реальных конструкций тел МР. Для целей подробного изображения геометрии тел, шарниров, орт осей вращения тел рекомендуется использовать типовые МТ, где конусы указывают положительные направления осей вращения управляемых тел и т. д.

Кроме предложенных трех способов моделирования тел МР, для использования которых не обязательно знать язык разметки трехмерных миров, остается возможность создавать файлы "тело\_i.x3d" путем X3D-программирования.

### Список литературы

1. Телегин А.И. Основы теоретической механики систем тел. С приложениями в робототехнике: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023. 252 с. ISBN 978-5-507-45089-3.
2. ГОСТ Р 60.0.7.3–2020. Роботы и робототехнические устройства. Метод математического моделирования показателей надёжности и виртуализации испытаний на надёжность базовых элементов робототехнических комплексов при проектировании. М.: Стандартинформ, 2021.
3. ГОСТ Р 60.0.7.2–2020. Роботы и робототехнические устройства. Технология математического моделирования и виртуализации испытаний базовых элементов робототехнических комплексов на внешние воздействующие факторы на всех этапах жизненного цикла. М.: Стандартинформ, 2021.
4. Мелентьев Ю.И., Телегин А.И. Динамика манипуляционных систем роботов. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1984. 360 с.
5. Бутырин С.А. Разработка алгоритмов управления манипулятором с компенсацией взаимовлияния движений и программного обеспечения численных экспериментов с моделями роботов на ЭВМ: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1982. 144 с.

6. Войнов И.В. Транспортные и манипуляционные системы мобильных робототехнических комплексов для экстремальных условий: дис. ... д-ра. техн. наук. Челябинск, 1998. 301 с.
7. Войнов И.В. Синтез алгоритма быстрой адаптации ПИД-регулятора программного движения четырехзвенного манипулятора // Информационные технологии искусственного интеллекта: сб. М.: ИФТП РАН, 1994. С. 93–100.
8. Телегин А.И. Уравнения математических моделей механических систем. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. 182 с.
9. Телегина А.И., Тимофеев Д.Н., Читалов Д.И. Х3D-моделирование механических систем: опыт использования Х3D в моделировании механических систем. Южно-Уральский государственный университет, 2014. 66 с. URL: <http://elibraru.ru/item.asp?id=22585700>.
10. Пудовкина С.Г., Тимофеев Д.Н., Читалов Д.И. Моделирование и анимация роботизированных технологических комплексов // Наука ЮУрГУ: материалы 70-й научной конференции. Секции технических наук. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2018. С. 776–784.
11. Web Application for Х3D-Model Creation of the Robotic Technological Complex / I.V. Voynov, S.G. Pudovkina, A.I. Telegin, D.N. Timofeev // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18, № 2. С. 5–18. DOI: 10.14529/ctcr180201
12. Роботизация торговли / А.И. Телегин, Д.Н. Тимофеев, С.Г. Пудовкина, В.А. Телегин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 4. С. 84–98. DOI: 10.14529/ctcr190408
13. Feature and Performance Comparison of the V-REP, Gazebo and ARG0s Robot Simulators / L. Pitonakova, M. Giuliani, A. Pipe, A. Winfield // Proceedings of the 19th Towards Autonomous Robotic Systems Conference (TAROS 2018). 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-967228-8\_30
14. Development of a Khepera IV Library for the V-REP Simulator / E. Peralta, E. Fabregas, G. Farias et al. // IFAC-PapersOnLine – 11th IFAC Symposium on Advances in Control Education. 2016. P. 81–86. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.157
15. On 3D simulators for multi-robot systems in ROS: MORSE or Gazebo? / F.M. Noori, D. Portugal, R. Rocha, M. Couceiro // 2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR). 2017. P. 19–24. DOI: 10.1109/SSRR.2017.8088134

### References

1. Telegin A.I. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki sistem tel. S prilozheniyami v robototekhnike: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fundamentals of theoretical mechanics of body systems. With applications in robotics: textbook for universities]. St. Petersburg: Lan; 2023. 252 p. (In Russ.) ISBN 978-5-507-45089-3.
2. *GOST R 60.0.7.3–2020*. [Robots and robotic devices. Method of mathematical modeling of reliability indices and virtualization of reliability tests of basic elements of robotic complexes during design]. Moscow: Standartinform; 2021. (In Russ.)
3. *GOST R 60.0.7.2.2–2020*. [Robots and robotechnical devices. The technology of mathematical modeling and virtualization of tests of basic elements of robotic complexes on external influencing factors at all stages of the life cycle]. Moscow: Standartinform; 2021. (In Russ.)
4. Melent'ev Yu.I., Telegin A.I. *Dinamika manipulyatsionnykh sistem robotov* [Dynamics of manipulation systems of robots]. Irkutsk: Irkutsk University Publ.; 1984. 360 p. (In Russ.)
5. Butyrin S.A. [Development of the manipulator control algorithms with the motion mutual influence compensation and the software for the numerical experiments with the robot models on the computer. Cand. sci. diss.]. Tomsk; 1982. 144 p. (In Russ.)
6. Voynov I.V. [Transport and manipulation systems of the mobile robotic complexes for the extreme conditions. Doct. sci. diss.]. Chelyabinsk; 1998. 301 p. (In Russ.)
7. Voynov I.V. [Synthesis of the algorithm for the fast adaptation of the PID-regulator of the program motion of the four-link manipulator]. In: *Information Technologies of Artificial Intelligence: Collection*. Moscow: Institute of Physical and Technical Problems RAS; 1994. P. 93–100. (In Russ.)
8. Telegin A.I. *Uravneniya matematicheskikh modeley mekhanicheskikh sistem* [Equations of mathematical models of mechanical systems]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 1999. 182 p. (In Russ.)
9. Telegin A.I., Timofeev D.N., Chitalov D.I. *Х3D-modeling of mechanical systems: experience in using Х3D modeling of mechanical systems*. South Ural State University; 2014. 66 p. (In Russ.) Available at: <http://elibraru.ru/item.asp?id=22585700>.

10. Pudovkina C.G., Timofeev D.N., Chitalov D.I. [Modeling and animation of robotic technological complexes]. In: *Science of SUSU: proceedings of the 70th scientific conference. Sections of technical sciences*. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2018. P. 776–784. (In Russ.)
11. Voynov I.V., Pudovkina S.G., Telegin A.I., Timofeev D.N. Web Application for X3D-Model Creation of the Robotic Technological Complex. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2018;18(2):5–18. DOI: 10.14529/ctcr180201
12. Telegin A.I., Timofeev D.N., Pudovkina S.G., Telegin V.A. The Trade Robotization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2019;19(4):84–98. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190408
13. Pitonakova L., Giuliani M., Pipe A., Winfield A. Feature and Performance Comparison of the V-REP, Gazebo and ARG0s Robot Simulators. In: *Proceedings of the 19th Towards Autonomous Robotic Systems Conference (TAROS 2018)*. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-967228-8\_30
14. Peralta E., Fabregas E., Farias G. et al. Development of a Khepera IV Library for the V-REP Simulator. In: *IFAC-PapersOnLine – 11th IFAC Symposium on Advances in Control Education*. 2016. P. 81–86. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.157
15. Noori F.M., Portugal D., Rocha R., Couceiro M. On 3D simulators for multi-robot systems in ROS: MORSE or Gazebo? In: *2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*. 2017. P. 19–24. DOI: 10.1109/SSRR.2017.8088134

#### **Информация об авторах**

**Телегин Александр Иванович**, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры автоматизации, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; teleginai@susu.ru.

**Гусев Евгений Васильевич**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gusevev@susu.ru.

**Кодкин Владимир Львович**, д-р техн. наук, проф. кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kodkinvl@susu.ru.

**Ширяев Владимир Иванович**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой систем автоматического управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shiriaevvi@susu.ru.

#### **Information about the authors**

**Aleksandr I. Telegin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Prof. of the Department of Automation, South Ural State University, Miass, Russia; teleginai@susu.ru.

**Evgeny V. Gusev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Digital Economics and Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gusevev@susu.ru.

**Vladimir L. Kodkin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kodkinvl@susu.ru.

**Vladimir I. Shiryaev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shiriaevvi@susu.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 27.05.2024**

**The article was submitted 27.05.2024**