

ТЕХНИКА РЫБОЛОВСТВА И ФЛОТ

Применение технологии цифрового двойника для моделирования и автоматизированного изготовления рыбопромысловых узловых соединений

DOI

Кандидат технических наук
В.А. Пелешенко – доцент
Департамента анализа данных
и машинного обучения
Финансового университета
при Правительстве Российской
Федерации

@ vitaliy.peleshenko@yandex.ru

APPLICATION OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY FOR MODELING AND AUTOMATED MANUFACTURING OF FISHING NODAL CONNECTIONS

Candidate of Technical Sciences **V.A. Peleshenko** – Associate Professor of the Department of Data Analysis and Machine Learning of the Financial University under the Government of the Russian Federation

The article is devoted to fishing nodes, in particular, to the problems of creating their three-dimensional models, as well as digital counterparts based on them, and automation tools that allow servicing and producing nodal connections.

Ключевые слова:

рыболовство, рыбопромысловые узлы, средства автоматизации

Keywords:

fishing, fishing nodes, automation tools

ВВЕДЕНИЕ

Узлы являются одной из основных составляющих сетей, и работа по созданию и ремонту орудий лова, в основном, связана с умением работы рыбопромысловиков с узлами. При этом, по мнению антропологов, человек научился плести узлы гораздо раньше, чем добывать огонь, но до сих пор средства автоматизации этих процессов довольно скудны. Науке известно огромное количество разновидностей узлов. Самые древние узлы, при помощи которых изготавливали орудия лова, датируются периодом неолита. Археологами были найдены многочисленные подтверждения применения орудий лова с узловыми соединениями в Древнем Египте, Греции и Риме. Множество новых типов узлов было разработано в период Промышленной революции и становлении промышленного рыболовства. Согласно книге, опубликованной Ашлем, в мире на начало 1944 г. насчитывалось порядка 700 видов различных узлов [1]. С развитием точных наук появилось целое научное направление «теории узлов», именуемое в России «наузистикой» от древнерусского слова «науз» – узел. Наука эта сравнительно новая и, несмотря на полувековую исследовательскую работу в области наузистики, в промышленном рыболовстве до сих пор нет точных трехмерных моделей узлов и их соответствующего математического описания. Даже в условиях современного программного обеспечения и компьютерной техники построение подобных геометрических трёхмерных объектов является сложной задачей. Данная статья посвящена построению средств автоматизации работы с сетными орудиями лова, на базе технологий искусственного интеллекта, в частности, рассмотрена методика

создания роботизированной системы, позволяющей работать с узловыми соединениями, и методика создания компьютерных трехмерных геометрически-математических моделей узловых соединений.

УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОМ РЫБОЛОВСТВЕ

На текущий момент самым распространённым типом узловых соединений в промышленном рыболовстве принято считать шкотовый узел, на основе которого осуществляется производство главного орудия рыболовства – траловых комплексов.

Шкотовый узел был разработан в эру парусного флота, и изначально использовался как соединительный морской узел внутри бегущего такелажа, предназначенного для управления парусами. Само название шкотовый узел включает в себя элемент парусной оснастки – «шкоты», от английского «sheet», представляющей собой специализированные верёвочные снасти, необходимые для удержания краёв парусов [2]. При этом шкотов существует великое множество и их обозначение включает дополнительную часть, относительно того, к какому парусу они относятся, так, к примеру, существуют фок-шкоты, бом-шкоты, горт-шкоты, стакель-шкоты и т.д. В подобных элементах оснастки требовалось обеспечение надёжного соединения между собой натянутых канатов, что и было решено при помощи создания специального узла – шкотового. На брам-шкотах с его помощью обеспечивали нижнее крепление паруса по брам-реи. Также они удерживали в натяжении форштейнстакели. На фок-шкотах и горт-шкотах помогали ставить нижние паруса. Мара-шкоты служили для постанов-

ки марселей. Шкотовый узел, несмотря на простоту, позволял надёжно ввязывать снасти в огон-паруса и удерживал шкоты в кренгельсе. За долгие годы службы узел успешно зарекомендовал себя на флоте. Сильно стягивая тросы, он при этом не перетирал их и не портил, что обеспечивало им износостойкость



Рисунок 1. Шкотовый узел
Figure 1. Shkotovy node

и долговечность. По сути, эти же свойства являются основными для создания качественных сетных полотен. Поэтому рыбопромысловики их быстро заметили и начали изготавливать с их помощью орудия лова. Подобное соединение позволяет плести сети крайне быстро, при помощи пошагового соединения продольно расположенных тросов.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ УЗЛА

Рассмотрим технологию изготовления узлового соединения на примере описанного шкотового узла. Главной особенностью изготовления шкотового узла является то, что при его создании нет необходимости в контроле узлов ходовыми концами на коренных концах, что существенно упрощает связывание (рис. 1). Согласно классификации Ашли, по типу связывания разделяют четыре класса узлов: штыки (hitches), соединения (bends), узлы (knots), огоны (splices) [3]. Шкотовые узлы относятся к классу штыковых соединений, позволяющих осуществлять связывание только относительно опорного троса, и не может соединять концы веревок, создавать их утолщение или обеспечивать их сращивание.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Согласно наузистической классификации, родственными типами основного рыбопромыслового узла – шкотового узла, принято считать брам-шкотовый узел, гачный узел, обычный и бегущий булинь, бекетовый узел и двойной беседочный узел. При этом самым близким к основному считается брам-шкотовый узел. Тем не менее, в рамках текущей исследовательской работы, данное утверждение было подвергнуто сомнению. Действительно, частично они повторяют друг друга, но объём брам-шкотового узла, за счёт дополнительных петель значительно больше. Для анализа степени схожести, в работе был применён алгоритм соответствия на языке программирования python в среде Google Colab на облачных вычислительных мощностях Google. Алгоритм был основан

Статья посвящена рыбопромысловым узлам, в частности – проблемам создания их трехмерных моделей, а также цифровых двойников на их основе, и средств автоматизации, позволяющих обслуживать и производить узловые соединения.

на, находящейся в свободном доступе, библиотеке Imagehash. Расчётные данные датасетов, с изображениями шкотовых узлов и брам-шкотовых узлов, были собраны с использованием поисковых машин и датасетов Google, после чего сгруппированы и нормализованы для корректного сравнения. Библиотека Imagehash использовала алгоритм сравнения на базе хэш-функций на основе расстояний Хэмминга и rHash функции с дискретно-косинусоидальным преобразованием [5]. По итогам работы, программа выдала степень схожести брам-шкотового и шкотового узлов равной 79,94%. Данный результат можно интерпретировать как факт того, что даже самые близкие друг к другу родственные узлы на самом деле достаточно далеки с точки зрения своей геометрии. Ввиду трудоёмкости, для остальных родственных узлов сравнение не производилось, но даже обычного невооружённого взгляда хватает, чтобы понять, что их родство, относительно шкотового узла, пожалуй, только номинальное. Таким образом, дальнейшее исследование проводилось в рамках традиционного рыбопромыслового шкотового узлового соединения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТРЕХМЕРНОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Трёхмерное прототипирование узлового соединения ставило своей задачей создание компьютерной модели шкотового узла. В качестве конечного расчётного формата, определяющего геометрию шкотового узла, была выбрана STL модель. На текущий момент STL является общепризнанным стандартом для создания информационной трехмерной

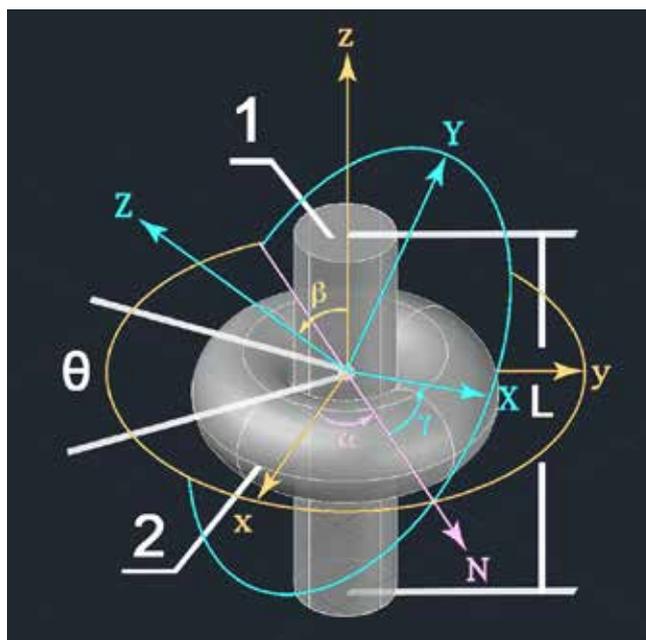


Рисунок 2. Трёхмерные образующие узла
Figure 2. Three-dimensional node generators

модели натуральных объемных объектов. Аббревиатура STL подразумевает под собой англоязычный термин «Stereolithography», что в переводе на русский означает «стереолитография», и является базовым сегментом аддитивных технологий. Выбор STL для описания геометрии шкотового узла обусловлен тем, что данный формат, за счёт объединения геометрических принципов ASCII, в котором модель разбивается на треугольники, образующие, так называемые, гигантские кластеры данных, и двоичного формата хранения данных о каждом отдельном треугольнике с описанием через числа с плавающей запятой, позволяет создать наиболее точный цифровой двойник натурального объекта. Целью произведённых научных изысканий было достичь 3D STL модель шкотового узла, являющуюся абсолютной трёхмерной копией натурального шкотового узла. Наличие такой модели крайне критично, как для проведения твердотельного солид моделирования и качественного расчёта прочности отдельных сетных элементов и целостных траловых комплексов методом конечных элементов, так и для расчётов гидродинамических свойств сетных полотен и траловых комплексов методом CFD. На текущий момент ни одному исследователю не удалось создать подобную модель, ввиду её геометрической сложности, обусловленной многочисленными изгибами с многомерными изменениями траектории и формоизменяемостью сечений веревочных элементов при их нагружении. 3D STL модель шкотового узла по сути является основой для цифрового двойника – шкотового узла, который, помимо геометрических свойств, также будет обладать всеми физическими свойствами шкотового узла, что в итоге позволит создать цифровые двойники орудий лова, где он применяется.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Первый этап разработки трёхмерного прототипирования узлового соединения базировался на математическом моделировании узлового соединения. В рамках первого приближения было введено допущение, что сечение каната представляет собой идеальную окружность, не меняющую свою форму по всей длине узлового соединения. В качестве базовых составляющих узлового соединения были взяты два трехмерных примитива: 1 – цилиндр диаметра D ; 2 – тороид, получаемый вращением окружности D вокруг цилиндра диаметра D , как показано на рисунке 2. В качестве характеристики цилиндра была взята его длина, обозначенная через L , а характеристики тороида – величина его сегмента, выраженного углом тетта θ . Это позволило создавать прямолинейные участки длиной L с помощью цилиндров и сгибать их на угол θ с помощью сегмента тороида.

Пространственное положение объектов задавалось при помощи углов Эйлера: угла прецессии α , угла нутации β и угла собственного вращения γ , как показано на рисунке 2. При этом, образующие узла представляют собой две связанные цепные линии, каждый последующий элемент которых меняет свое положение относительно предыдущего, посредством вращения относительно крайней точки конечного элемента. Была введена запись отдельного элемента цепной линии, как совокупность, представляющую

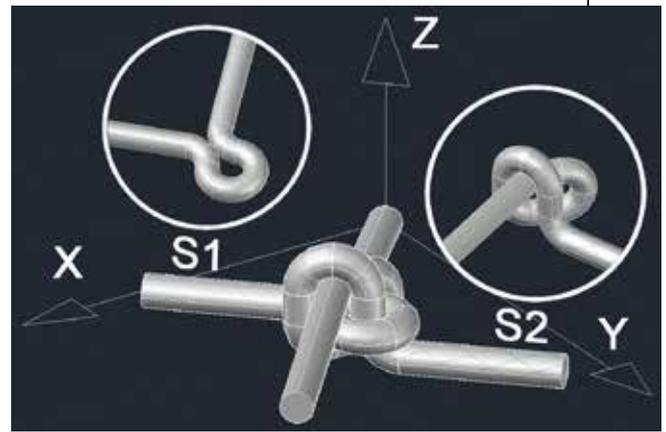


Рисунок 3. Модель узла на основе трёхмерных примитивов

Figure 3. Node model based on three-dimensional primitives

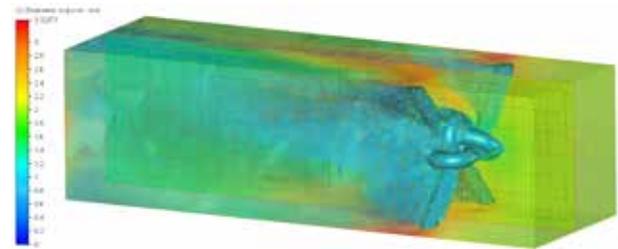


Рисунок 4. Обтекание узлового соединения

Figure 4. Flow around the nodal connection

собой ряд, включающий его пространственное положение $[\alpha, \beta, \gamma]$ и обозначение трёхмерного примитива L – цилиндр и T – тороид, соответственно прямолинейная траектория выражалась величиной относительно диаметра, а изгиб включал угол начала и окончания тороида.

Образованный при помощи выбранных трёхмерных примитивов, узел представлен на рисунке 3, где $S1$ и $S2$ – это независимые цепные линии.

Формула узла, согласно принятой записи, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 S1 &= [45^\circ, 90^\circ, 0]L5D + [0, 0, 0]T(225^\circ \sim 311^\circ) + \\
 &+ [0, 0, 0]T(229^\circ \sim 491^\circ) + [0, 0, 0]T(49^\circ \sim 131^\circ) + \\
 &+ [0, 0, 0]L5D \\
 S2 &= [225^\circ, 90^\circ, 0]L5D + [0, 90^\circ, 0]T(270^\circ \sim 180^\circ) + \\
 &+ [0, 0, 0]T(229^\circ \sim 491^\circ) + [0, 90^\circ, 0]T(49^\circ \sim 131^\circ) + \\
 &+ [0, 0, 0]L1D + [0, 90^\circ, 0]T(0^\circ \sim 180^\circ) + [0, 0, 0] + \\
 &+ L1D + [225^\circ, 90^\circ, 0]T(180^\circ \sim 270^\circ) + [0^\circ, 0^\circ, 90^\circ] + \\
 &+ L1D + [0, 90^\circ, 0]T(270^\circ \sim 360^\circ) + [11^\circ, 90^\circ, 0] + \\
 &+ T(360^\circ \sim 450^\circ) + [11^\circ, 90^\circ, 0]L0,7D + [0, 0, 0] + \\
 &+ T(11^\circ \sim 49^\circ) + [45^\circ, 90^\circ, 0]L5D \quad (1)
 \end{aligned}$$

Таким образом была получена модель узлового соединения, в котором $S1$ и $S2$ имеет 4 линии соприкосновения и минимальную длину траектории.

Объём построенного узлового соединения составил $16D^3$. При вписывании узла в сферу, её диаметр составляет $4,7D$, а объём – $54D^3$. Таким образом,

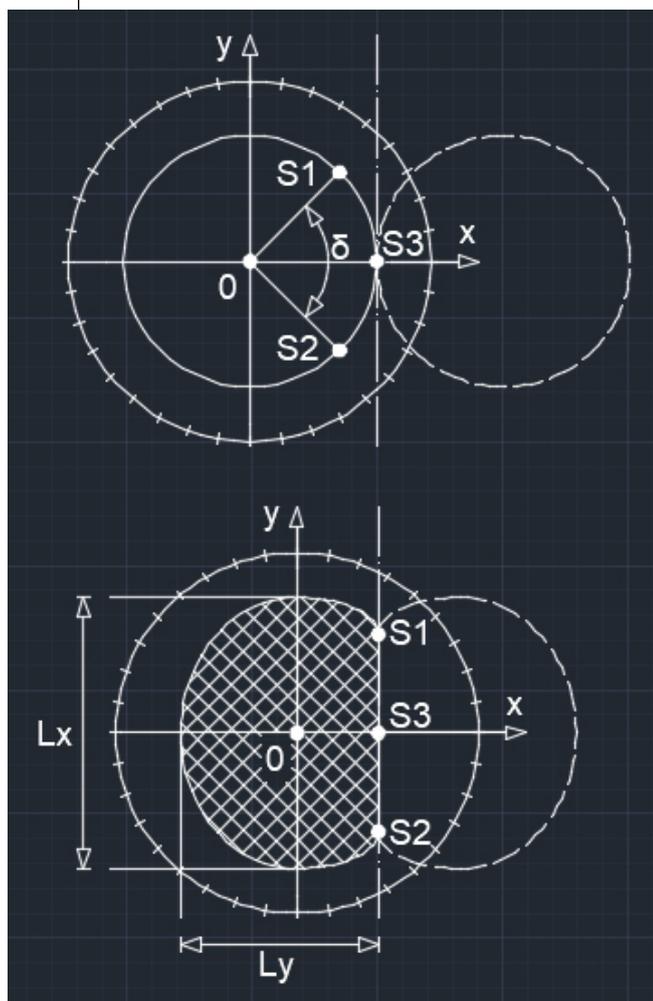


Рисунок 5. Модель обжатия
Figure 5. Compression model

сложная форма делает узел плохо обтекаемым телом, с большим количеством присоединённых масс жидкости, при движении. Если ввести допущение, что присоединенные массы представляют собой разность между объемом описанной сферы и объемом самого узла, то они будут равны $38 D^3$. Дальнейшие CFD расчёты показали, что фактически присоединённые объемы жидкости на режимах турбулентного обтекания способны принимать значения даже выше $38D^3$. На рисунке 4 представлен расчёт обтекания узлового соединения.

На втором этапе исследовательской работы было проведено уточнение параметров модели. Дело в том, что на практике, для уменьшения размеров узловых соединений, применяется их обжатие, при котором, под действием нагрузки, происходит поперечная деформация профиля составляющих цепных линий. В последующем моделировании была разработана методика, позволяющая моделировать обжатие на линиях соприкосновения элементов узла, как показано на рисунке 5.

При соприкосновении двух канатов под нагрузкой, в точке S3 происходит деформация участка δ и превращение дуги S1S2 в прямой отрезок с соответствующим изменением линейных размеров Lx и Ly. Были получены формулы, позволяющие описать вышеприведённые геометрические параметры через значение δ в относительной форме по параметру D:

$$\begin{cases} Lx = 0,0009 \cdot D \cdot \delta + 1 \\ Ly = -0,0025 \cdot D \cdot \delta + 1 \\ S1S2 = 0,0087 \cdot D \cdot \delta \end{cases} \quad (2)$$

Введение, в ранее разработанную 3D модель, функции обжатия видоизменило сечения и траекторию составляющих его цепных линий. Далее, на языке программирования python, в модуле CadQuery на базе автоматизированных сценариев, включающих разработанные функции на основе формул 1 и 2, была создана параметрическая модель узлового соединения, позволяющая автоматически генерировать 3D STL файлы узла. На рисунке 6 представлен результат работы написанной программы, представляющий собой 3D STL модель узлового соединения с учетом обжатия:

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

В заключение проведённых изысканий была рассмотрена возможность практического использования результатов исследования. Созданная 3D STL модель узлового соединения позволяет заложить в промышленное рыболовство ранее недоступный базис для автоматизации процессов по обслуживанию и созданию орудий лова. В частности, современные технологии компьютерного зрения, обладая 3D STL данными узловых соединений, могут производить диагностику реальных узловых соединений внутри сетей с помощью трехмерного сканирования и сверки их с эталоном, загруженным в память устройства. Также, зная 3D STL геометрию узловых соединений, можно создавать программно-аппаратные комплек-

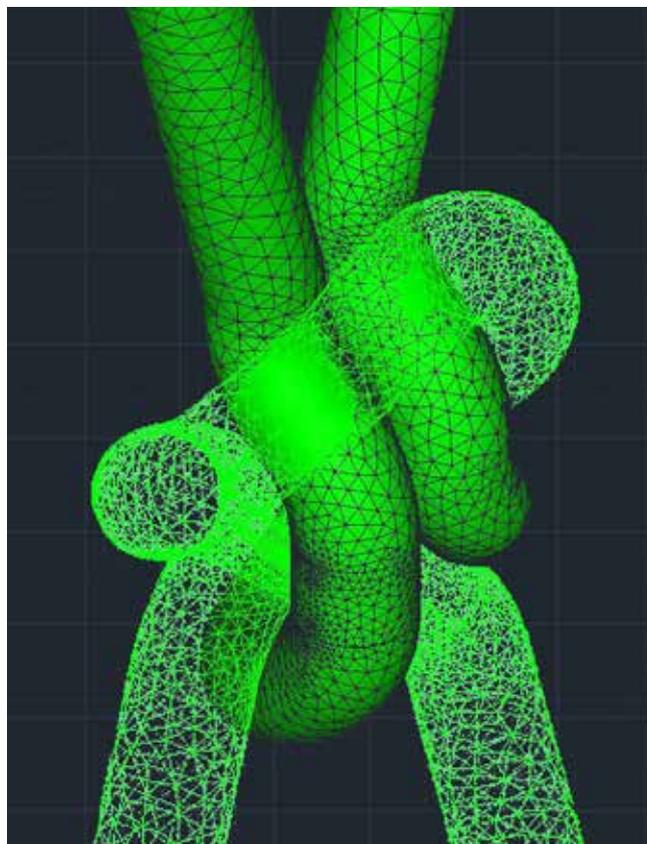


Рисунок 6. 3D Модель обжатого узла
Figure 6. 3D model of the compressed node

сы для автоматического производства узловых соединений при помощи промышленных манипуляторов. Было проведено проектирование подобного роботизированного манипулятора, представленного на рисунке 7. Разработанный роботизированный манипулятор имеет вес 154 кг и высоту 1,4 метров. Конструкция включает: ходовую часть – 1, стабилизированное основание – 2, подвижный каркас – 3 и систему из 4 высокоточных шести-осевых манипуляторов, оснащённых контрольными датчиками – 4.

Процесс автоматизированного создания узлового соединения представлен на рисунке 8 и включает:

- захват каната K1 в двух точках манипулятором M1 и M2;
- перегиб и сведение двух концов каната K1 манипулятором M1 и M2;
- захват и удержание сведённых концов манипулятором M3;
- размыкание манипуляторов M1 и M2;
- захват второго каната K2 манипулятором M1 и подводка его к канату K1;
- перехват каната K2 вокруг сомкнутых концов K1 при помощи манипулятора M2 и захват конца каната с противоположной стороны манипулятором M3;
- размыкание манипулятора M2;
- захват конца каната K2 манипулятором M4 сквозь петлю K1 и протаскивание K2;
- перераспределение манипуляторов M1, M2, M3 и M4 по концам канатов K1 и K2;
- контролируемый обжим узла при помощи одновременной разводки в противоположные стороны относительно друг друга манипуляторов M1, M2, M3 и M4.

Таким образом, при помощи разработанного роботизированного манипулятора получаем идеально сформированный узел с контролируемой геометрией и степенью обжатия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на свою кажущуюся простоту и самообытность, узловые соединения являются одним из самых сложных объектов промышленного рыболовства. Именно узловые соединения позволили создать эффективные орудия лова и привели к промышленному рыболовству, которое мы имеем сейчас. Однако век индустриализации сменился веком информационных технологий, когда реальные объекты обретают своих цифровых двойников в виртуальном мире, позволяя внедрить глубокую автоматизацию в обыденные процессы. Проведённое научное исследование позволило создать такого цифрового двойника для узлового соединения, что в дальнейшем приведёт к глубокой автоматизации в промышленном рыболовстве и, тем самым, снизит долю тяжёлого ручного труда рыбопромысловиков.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ / REFERENCES AND SOURCES

1. Ashley, Clifford W. The Ashley Book of Knots / Ashley, Clifford W. — Великобритания: Doubleday. 1944. - 620с ISBN 0-385-04025-3
1. Ashley, Clifford W. The Ashley Book of Knots / Ashley, Clifford W. — United Kingdom: Doubleday. 1944. – 620 p. – ISBN 0-385-04025-3
2. Марквардт К.Х. Рангоут, такелаж и паруса судов XVIII века / Карл

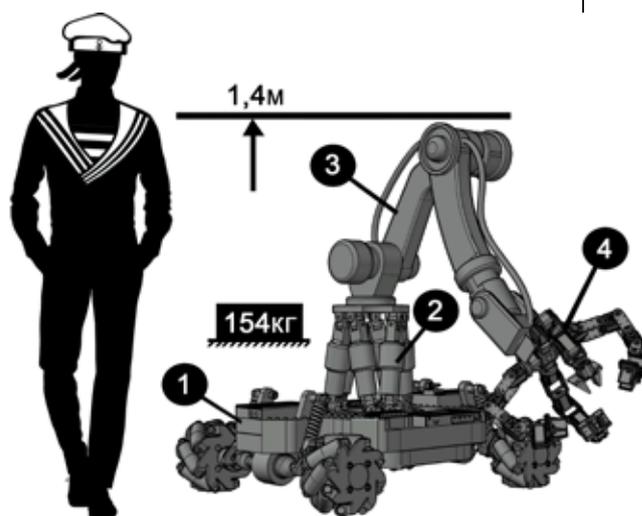


Рисунок 7. Роботизированный манипулятор

Figure 7. Robotic arm

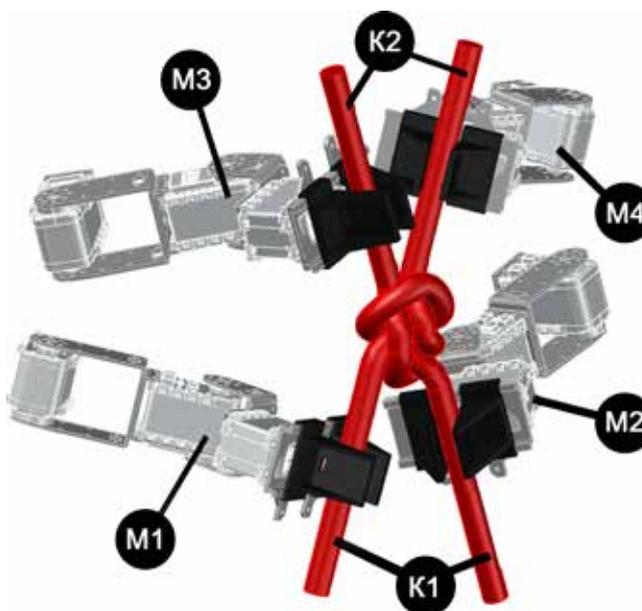


Рисунок 8. Автоматизированное создание узлового соединения

Figure 8. Automated creation of a node connection

Хейнц Марквардт; Пер. с нем. А. А. Чебана. – Ленинград: Судостроение, 1991. – 288 с. – ISBN 5-7355-0131-3.

2. Marquardt K.H. Mast, rigging and sails of ships of the XVIII century / Karl Heinz Marquardt; Trans. from German A. A. Cheban. – Ленинград: Shipbuilding, 1991. – 288 p. – ISBN 5-7355-0131-3.

3. Raoul Graumont; John Hensel. Encyclopedia of Knots and Fancy Rope Work/ Raoul Graumont; John Hensel :Cambridge (Maryland): Cornell Maritime Press, 1977. ISBN 0-87033-021-7.

4. Джерман К., Бивис Б. Современный трос в морской практике. – пер. с англ. Гусева В.П. – Ленинград: Судостроение, 1980.

4. Jerman K., Beavis B. Modern cable in marine practice. – translated from English. Guseva V.P. – Ленинград: Shipbuilding, 1980.

5. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. Theory and Practice of Error Control Codes. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

5. Bleikhut R. Theory and practice of error-controlling codes. Theory and Practice of Error Control Codes. – Moscow: Mir, 1986. – 576 p.