

Научная статья

УДК 004.94

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-2>

© Оксана Сергеевна Логунова<sup>1</sup>, Юлия Борисовна Кухта<sup>2✉</sup>,  
Елена Александровна Ильина<sup>3</sup>, Сергей Рустамович Сагадиев<sup>4</sup>,  
Антон Андреевич Николаев<sup>5</sup>, Михаил Олегович Вознюк<sup>6</sup>, 2021

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,  
Магнитогорск, Российская Федерация,

<sup>1</sup>logunova66@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

<sup>2</sup>perfectumyuka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9128-3891>

<sup>3</sup>dar\_nas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9143-4343>

<sup>4</sup>ser.sag232@gmail.com

<sup>5</sup>aanton2001@gmail.com

<sup>6</sup>voznjukmikhail@yandex.ru

© Oksana S. Logunova<sup>1</sup>, Iuliia B. Kukhta<sup>2✉</sup>, Elena A. Ilina<sup>3</sup>,  
Sergey R. Sagadiev<sup>4</sup>, Anton A. Nikolaev<sup>5</sup>, Mikhail O. Voznyuk<sup>6</sup>, 2021

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russian Federation,

<sup>1</sup>logunova66@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

<sup>2</sup>perfectumyuka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9128-3891>

<sup>3</sup>dar\_nas@mail.ru, [https:// https://orcid.org/0000-0002-9143-4343](https://orcid.org/0000-0002-9143-4343)

<sup>4</sup>ser.sag232@gmail.com

<sup>5</sup>aanton2001@gmail.com

<sup>6</sup>voznjukmikhail@yandex.ru

### Обработка информации в ассистирующей робототехнической системе: трансформация и визуализация

**Аннотация.** В статье рассматривается разработка программного обеспечения для обработки информации в ассистирующей робототехнической системе. Целью исследования является синтез комплекса алгоритмов, позволяющих выполнять трансформацию цифрового куба, соответствующих его сжатию и растяжению под любым углом к поверхности с заданным усилием, а также позволяющих визуализировать результаты преобразования в объемной форме и любом плоском сечении. В работе описывается решение задач: формирование 3D-изображения в виде цифрового куба с возможностью его расслоения по дискретной сетке; разработка алгоритмов для трансформации цифрового куба. В результате спроектированы ассистирующая робототехническая система, программный модуль трансформации и визуализации квазикуба виртуального объекта; определены направления развития системы.

**Ключевые слова:** ассистирующая робототехническая система, 3D-изображение, трансформация изображения, цифровой куб для изображения, сжатие цифрового куба, композиция преобразований для послойной визуализации.

## Information processing in the assisting robotechanical system: transformation and visualization

**Absrtact.** The article considers the development of software for information processing in an assisting robotic-technical system. The goal of the article is to synthesize a set of algorithms which allow transforming a digital cube in correspondence with its compression and stretching at any angle to the surface with a given force, as well as visualizing the transformation results in a volumetric form and any flat section. The paper describes the solution of several problems – generating 3D-image in the form of a digital cube with the possibility of its stratification along a discrete mesh. The authors also present the development of algorithms for transforming a digital cube. As a result, an assisting robotic system, a software module for transforming and visualizing the quasi-cube of a virtual object were designed and further development directions of the system were identified.

**Keywords:** assisting robotic system, 3D-image, image transformation, digital cube for image, digital cube compression, composition of transformations for layer-by-layer visualization.

### Введение

Национальным проектом «Наука» были определены приоритетные направления развития науки, среди которых «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта»<sup>1</sup>. Развитие современных цифровых технологий открывает новые возможности в разработке интеллектуальных систем, использующих методы и средства трансформации и визуализации многомерных изображений. Одной из востребованных областей, обеспечивающих комфортные и безопасные условия жизни человека в обществе, является медицина, в которой активно развиваются технологии диагностирования, построенные на основе визуализации изображения структурных частей организма человека. Широкое внедрение этих технологий требует проектирования и разработки ассистирующих робототехнических систем (далее – АРС) для обучения персонала и дистанционного проведения обследования.

Одной из составляющих АРС являются модули трансформации и визуализации получаемой с диагностических аппаратов информации. В настоящее время широко используются 3D-изображения, представленные в виде цифрового куба. Поиск опубликованных материалов на платформе Российского индекса научного цитирования позволил найти более 70 тысяч источников по трансформации 3D-изображений и более 100 тысяч – по способам и методам визуализации. При этом анализ теоретических и практических разработок показал, что широко освещены исследования в области визуализации и трансформации виртуального объекта, аналогичного реальному. При визуализации виртуального объекта наибольшее внимание уделяется:

– визуализации видимой поверхности объекта при наличии<sup>2</sup> или отсутствии<sup>1</sup> информации о его внутренней структуре;

<sup>1</sup> Национальный проект «Наука». – URL: <https://национальныепроекты.рф/projects/nauka> (дата обращения: 06.08.2020).

<sup>2</sup> Остапов Д. С., Усатиков С. В. Программа для построения базы данных с обучающей выборкой для распознавания плоских изображений объектов природного происхождения, с каче-

- получению информации в статическом или динамическом режиме при формировании исходных данных об объекте<sup>2</sup>;
- визуализации объекта с учетом уровня детализации его структуры<sup>3</sup>;
- визуализации объекта с учетом его физико-химических свойств<sup>1</sup>.

ственной и количественной оценкой состояния поверхности единичных объектов и их массового количества. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016618408, 28.07.2016. Заявка № 2016615486 от 30.05.2016; Алексанян Г. К., Щербаков И. Д., Кучер А. И. Программа визуализации внутренних структур исследуемого объекта методом электроимпедансной томографии (Визуализация 3D-ЕИТ1). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018666295, 13.12.2018. Заявка № 2018662721 от 13.11.2018; Ксенофонтов С. Ю. Способ трехмерной визуализации внутренней структуры исследуемого объекта в реальном времени. Патент № RU 2681348 С1, 06.03.2019. Заявка № 2018114616 от 19.04.2018; Блохинов Ю. Б., Веркеенко М. С. Алгоритмы построения цифровых трехмерных моделей уникальных объектов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 4. – С. 118–131.

<sup>1</sup> Хан М. Д., Игнатенко А. В. Основанные на изображениях способ представления и визуализации трехмерного объекта и способ представления и визуализации анимированного объекта. Патент № RU 2216781 С2, 20.11.2003. Заявка № 2001118221/09 от 29.06.2001; Григоров И. Г. Способ формирования изображения поверхности объекта. Патент № RU 2707980 С1, 03.12.2019. Заявка № 2019114912 от 16.05.2019; Веселов В. И., Филин Ю. Н., Картавцев Н. С. Архитектурное построение формографики инфо-гиперкубов // Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы III Международной научно-практической конференции (Москва, 14 мая 2015 г.) / под редакцией М. И. Ботова – Москва: Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, 2015. – С. 273–280; Супель А., Хвостов П. М., Игнатьев К. Е. Оценка эффективности проектирования трехмерных полигональных моделей как способа визуализации иллюстративной информации // Современные информационные технологии: сборник трудов по материалам 5-й Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 27 сентября 2019 г.) / под редакцией В. М. Артюшенко, В. И. Воловач. – Москва: ООО «Научный консультант», 2019. – С. 115–120.

<sup>2</sup> Галкин В. И., Анохин А. О., Галкин Е. В., Преображенский Е. В., Палтиевич А. Р. Способ получения 3-мерной модели поверхности объекта. Патент № RU 2427796 С1, 27.08.2011. Заявка № 2009148280/28 от 25.12.2009; Городничев М. Г., Гематудинов Р. А., Кухаренко А. М. О некоторых методах визуализации динамических 3D моделей // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 1 (7). – С. 18–29; Жилияков Е. Г., Лихошерстный А. Ю. Архитектура нейросети в задаче прецедентного распознавания объектов на изображениях с использованием частотных признаков // Вопросы радиоэлектроники. – 2013. – Т. 4. – № 1. – С. 35–45; Лиманова Н. И., Труханов А. С. Визуализация объектов компьютерной томографии // Наука без границ. – 2018. – № 5 (22). – С. 52–54; Багутдинов Р. А. Идея многокурсорной системы технического зрения для формирования 3D-моделей поверхности объекта в задачах разработки мобильных роботов // Программные системы и вычислительные методы. – 2017. – № 4. – С. 1–6.

<sup>3</sup> Логунова О. С., Андреев С. М., Гарбар Е. А., Маркевич А. В., Николаев А. А. Автоматизация научных исследований нарушения сплошности плоской поверхности: конструкционное решение программно-аппаратного комплекса // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 1 (46). – С. 54–59; Литвинова Ю. С., Максименко-Шейко К. В., Шейко Т. И. Аналитическая идентификация трехмерных геометрических объектов по информации о форме их сечений // Проблемы машиностроения. – 2017. – Т. 20. – № 1. – С. 45–51; Глаз А. Б., Тимухин А. А. Восстановление 3D поверхности лиц на базе исходных 2D изображений // Математические методы распознавания образов. – 2005. – Т. 12. – № 1. – С. 69–72.

Трансформация виртуального объекта использует методы моделирования и включает:

- методы деформации объекта с учетом видимости или невидимости его структуры<sup>2</sup>;
- методы масштабирования объекта с учетом видимости или невидимости его структуры<sup>3</sup>;
- методы реконструкции объекта<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Филин Ю. Н., Кофанов А. В., Картавец И. С., Картавец Н. С. Проективнографическое формообразование инфо-гиперкубов: теоретические и методические аспекты // *Строительство: наука и образование*. – 2015. – № 1. – URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/01/5\\_Filin.pdf](http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/01/5_Filin.pdf) (дата обращения: 06.08.2020); Журавлев Г. М., Теличко В. Г., Куриен Н. С., Гвоздев А. Е., Малий Д. В. Математическое моделирование разрушения элементов строительных конструкций под действием динамической нагрузки // *Чебышевский сборник*. – 2019. – Т. 20. – № 4 (72). – С. 372–386; Бубис Е. Л. Визуализация периода трансформации состояния поляризации в кристалле исландского шпата (аналог опыта Умова) // *Успехи современного естествознания*. – 2008. – № 3. – С. 104.

<sup>2</sup> Гниненко И. А. Разработка 3D моделей для лаборатории 3D визуализации и компьютерной графики // *Сборник трудов межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского (Москва, 17 февраля – 01 марта 2017 г.)*. – Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2017. – С. 92–93; Осинцев А. В., Очков К. Ю. Визуализация перемещений и деформаций методом цифровой корреляции изображений // *Научная визуализация*. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 15–23; Бугакова Т. Ю. Трехмерное моделирование деформации инженерного объекта методом сплайн-интерполяции // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 96–105; Кравченко А. М., Семеренко И. П., Икама Д. Л. Моделирование и визуализация напряженно-деформированного состояния механических систем в условиях современной образовательной среды // *Научный резерв*. – 2019. – № 4 (8). – С. 92–98; Бугакова Т. Ю., Шляхова М. М. 3D-моделирование и визуализация деформации поверхности на примере купола Новосибирского планетария // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2015. – Т. 7. – С. 63–67.

<sup>3</sup> Орлов С. Г., Шабров Н. Н. Вершинный шейдер для визуализации деформируемой пластины // *Научная визуализация*. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 1–14; Гора С. Ю., Довгаль В. М. Метод и инструментальные средства решения задачи сжатия изображений с использованием механизмов хаотической динамики // *Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета*. – 2012. – № 4–2 (24). – С. 25–28; Дерюгина Е. О., Борсук Н. А., Васина Е. В. Подход к реализации 3D-моделей эксклюзивных экспонатов музея по их фотографиям // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2019. – Т. 24. – № 7. – С. 48–55; Кознов Д. В., Ларчик Е. В., Терехов А. Н. Трансформация динамических представлений в предметно-ориентированном визуальном моделировании // *Программирование*. – 2015. – № 4. – С. 3–12; Картавец И. С., Веселов В. И., Георгиевский О. В., Филин Ю. Н. Архикуб-изоконструктор трансформации формографики // *Сборник трудов к международной научно-практической конференции «Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии» (Москва, 18 декабря 2013 г.) / под редакцией В. А. Умнова*. – Москва: РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2013. – С. 156–160; Бугакова Т. Ю., Борисов Д. А. Разработка методики определения пространственно-временного состояния техногенных объектов // *Известия высших учебных заведений. Раздел Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2015. – № 5/С. – С. 246–250.

Схема консолидации методов визуализации и трансформации 3D для виртуального объекта представлена на рис. 1.

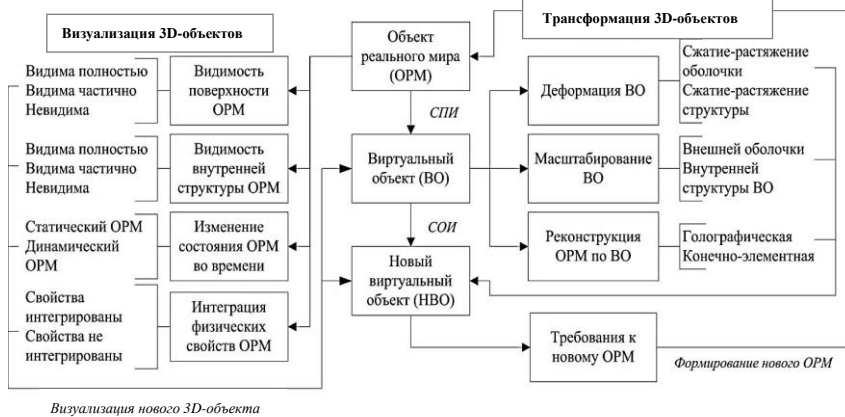


Рис. 1. Схема консолидации методов визуализации и трансформации для виртуального объекта: СПИ – средства получения изображения; СОИ – средства обработки изображения

С учетом результатов теоретико-информационного анализа разработок в области моделирования визуализации 3D-объекта авторы создали классификацию, позволяющую определить основное направление тенденции развития алгоритмов послыного преобразования при сжатии и растяжении цифрового куба.

В процессе анализа теоретических и практических разработок выявлено следующее противоречие: при наличии множества пакетов прикладных программ и библиотек программных модулей, реализующих алгоритмы визуализации 3D-объекта с возможностью представления информации об изменении его свойств и формы, остаются труднорешаемые задачи визуализации и трансформации изображений 3D-объектов для проблемно-ориентированных областей, связанные с восстановлением изображения по потоку фотографий и видеоряда, полученных с диагностических аппаратов ультразвукового исследования человека.

<sup>1</sup> Клячин А. А., Клячин В. А., Григорьева Е. Г. Визуализация расчета формы поверхностей минимальной площади // Научная визуализация. – 2014. – Т. 6. – № 2. – С. 34–42; Вяткин С. И., Городилов М. А., Долговесов Б. С. Геометрическое моделирование и визуализация функционально заданных объектов на базе функций возмущения с использованием графических акселераторов // Научная визуализация. – 2010. – Т. 2. – № 3. – С. 22–49; Парфентьев К. В., Гаврилов А. И. Построение моделей подстилающей поверхности на основе реконструкции данных мультиспектрального мониторинга // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9. – № 6. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/160TVN617.pdf> (дата обращения: 06.08.2020); Бастов Г. А. Технологии графической трансформации объектов в условиях использования компьютерной графики // Дизайн и технологии. – 2016. – № 51 (93). – С. 6–12; Крыловецкий А. А., Черников И. С. Реконструкция и распознавание объектов в системах компьютерного зрения // Телематика'2009: сборник трудов XVI Всероссийской научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 22–25 июня 2009 г.). – Санкт-Петербург: СПбГУИТМО, 2009. – С. 314–315.

Кроме того, в настоящее время существует ряд нерешенных задач, важных для создания интерактивного тренажера для обучения ультразвуковой диагностике:

- 1) восстановление формы объектов на основе фоторяда монохромных снимков;
- 2) построение объемного изображения на основании анализа выделенных кадров полученного видеопотока информации в формате цифрового куба с возможностью выполнения деформации объекта под воздействием приложенного усилия;
- 3) выбор сечения цифрового куба по заданному направлению и при заданном усилии нажатия на него.

Учитывая выявленные противоречия и проблемы, авторы определили цель исследования – синтез комплекса алгоритмов, позволяющих выполнять трансформацию цифрового куба, соответствующих его сжатию и растяжению под любым углом к поверхности с заданным усилием, и визуализация результатов преобразования в формате 3D и любом плоском сечении.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- создано 3D-изображение в виде цифрового куба с возможностью его расслоения по дискретной сетке;
- разработан комплекс алгоритмов для трансформации цифрового куба: назначение усилия сжатия или растяжения, трансформация структуры объекта, согласование усилия и изменения формы объектов в цифровом кубе;
- разработан комплекс алгоритмов для визуализации эффектов трансформации цифрового куба: выбора положения сечения цифрового куба, определение послышной цифровой гаммы отображения его сжатия и растяжения, представление его композиционного сечения.

В настоящей работе отражены:

- способы получения исходной информации для построения квазикуба;
- структура программного обеспечения АРС, соответствующая функциям специалиста по ультразвуковой диагностике;
- комплекс алгоритмов для функционирования АРС при трансформации и визуализации 3D-куба виртуального объекта.

### **Основная часть**

#### **Способы формирования 3D-изображения с возможностью расслоения по дискретной сетке**

Создание АРС ультразвуковой диагностики использует практически все методы визуализации и трансформации виртуального объекта, представленные на рис. 1. Особенности указанной системы являются формирование динамических массивов исходных данных как по структуре внутри 3D-куба, так и по его положению внутри основного объекта; различие физических свойств структурных элементов куба, которые подвергаются трансформации.

Исходное изображение, необходимое для создания АРС, представляет собой набор плоских изображений, упорядоченных по времени их фиксации за один проход датчиков аппарата УЗИ. Получение массива исходных данных для формирования 3D-изображения возможно как минимум двумя способами: поступление изображения с действующих аппаратов ультразвуковой диагностики и синтез плоских

изображений с последующей сборкой квазикуба.

При использовании первого способа в АРС должна поступить информация с аппарата УЗИ, сформированная в виде трех файлов со следующими расширениями:

- *dcm* (Digital Imaging and Communications in Medicine) – растровый однокадровый или многокадровый файл для хранения медицинских снимков;
- *index* – растровый файл предварительного просмотра;
- *vol* – ультразвуковой файл с цифровой обработанной зашифрованной информацией о всех кадрах, полученных в ходе ультразвукового исследования.

Извлечение графической информации из файла с расширением *dcm* не вызывает сложностей при использовании специальных программных библиотек. Выполнить расшифровку файла с расширением *vol* без согласия производителя аппаратной части является нарушением закона об авторских правах.

Для использования второго способа в АРС достаточно сформировать библиотеку открытой информации и сгенерировать цифровой куб.

Пример консолидации плоских изображений реального объекта с возможностью раскрытия внутренней структуры в квазикуб приведен на рис. 2. Для исключения конфликта интересов использования персональной информации для примера выбран такой объект, как яблоко. Описание технологии получения виртуального объекта планируется в последующих работах.

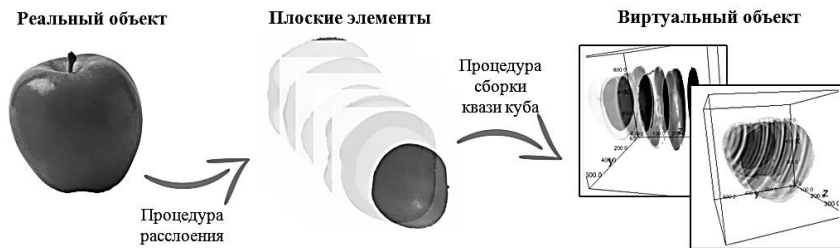


Рис. 2. Схема генерации квазикуба для использования в АРС

Для создания комплекса алгоритмов пилотного программного обеспечения авторы работы использовали второй способ получения квазикуба.

### Структура программного обеспечения АРС и комплекс алгоритмов

На основании изучения манипуляций специалиста по ультразвуковой диагностике при получении изображения сформирована структура программного обеспечения для АРС. Блочная схема соответствия действий специалиста, программного обеспечения АРС и алгоритмов представлена на рис. 3. Таким образом, комплекс алгоритмов трансформации и визуализации цифрового квазикуба включает три компонента: комплекс алгоритмов получения изображения реального или виртуального объекта (2.1); комплекс алгоритмов трансформации изображения виртуального объекта (2.2); комплекс алгоритмов визуализации нового виртуального объекта (2.3). Расширение функционала проекта (как пилотного, так и введенного в эксплуатацию) приведет к уточнению и увеличению перечня процедур и алгоритмов в реальном времени. Поскольку пока не рассматривается функционал позиционирования джойстика на теле пациента, автоматический анализ получаемого изображения в блочной схеме на

рис. 3 не представлен.

Приведем несколько алгоритмов для понимания порядка формирования результирующей информации. Для представления виртуального объекта необходимо создать полигональную сетку и определить структурную единицу информации для ее хранения.

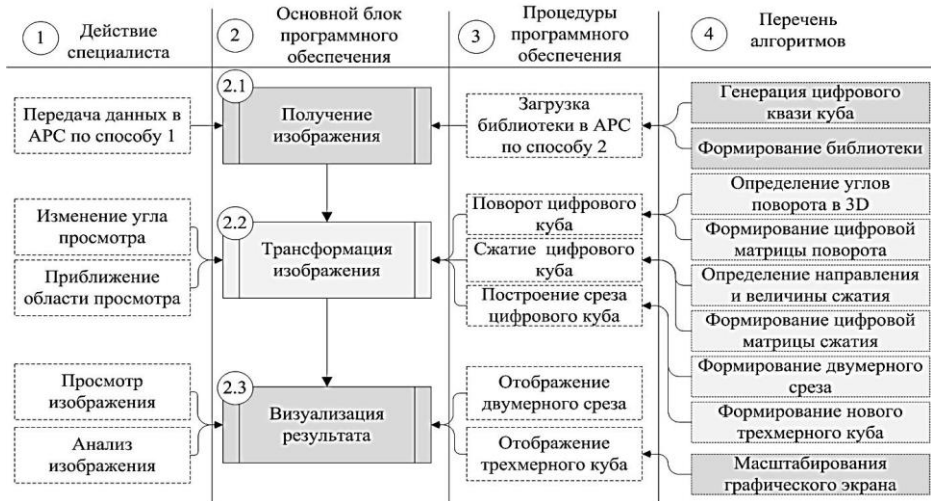


Рис. 3. Блочная схема соответствия действий специалиста, программного обеспечения APC и алгоритмов

На рис. 4 изображен графический вид виртуальной сетки, на рис. 5 – структурная единица информации.

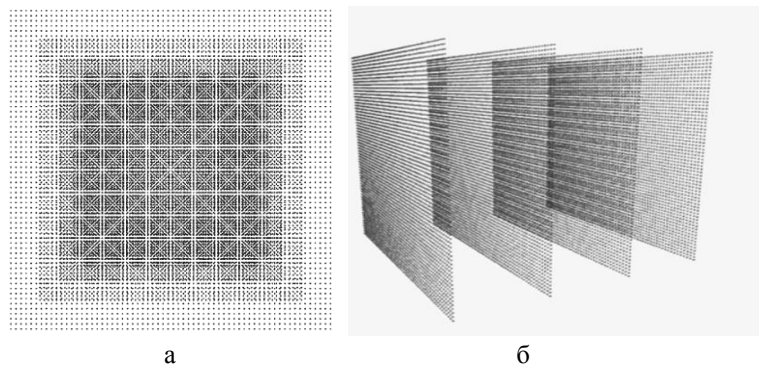


Рис. 4. Вид вершинной полигональной сетки для виртуального представления ОРМ:  
а – 2D-проекция; б – отображение по слоям куба



Рис. 5. Схема структуры хранения информации о координатах вершин полигональной сетки

Вершины, составляющие полигональную сетку, описываются набором трехмерных координат (X, Y, Z), определяющим их точное положение в виртуальном пространстве квазикуба. Хранение информации организовано в формате массива, для каждого элемента которого требуется как минимум 12 байт. Инициализация всей структуры квазикуба начинается с определения местоположения первой вершины относительно экранного пространства визуальной формы программы с учетом смещения относительно начала буфера памяти, его значение для самого массива будет равно нулю.

Алгоритм генерации цифрового квазикуба включает этап считывания данных из памяти для получения координат частиц из структуры хранения данных 3D-куба. Структура хранения данных представляет собой одномерный массив данных, каждый элемент – вектор размерностью 3×N. Схема структуры хранения информации изображена на рис. 5. Функциональная схема работы АРС представлена на рис. 6 (использованы следующие обозначения: МЭ – процедура масштабирования экрана; 1–4 – один из видов преобразования поворота или сжатия).

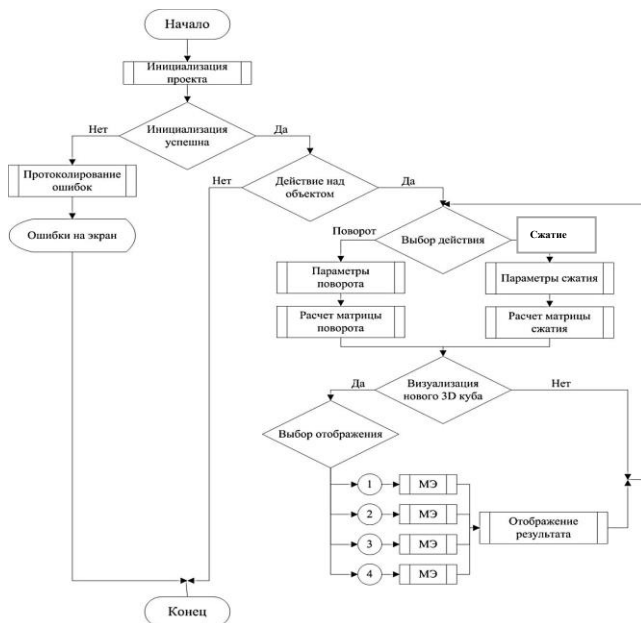


Рис. 6. Функциональная схема работы программного модуля АРС для трансформации и визуализации виртуального объекта

## Комплекс алгоритмов трансформации и визуализации цифрового куба

### Алгоритмы работы с полигональной сеткой

Теоретические основы алгоритмов работы с полигональной сеткой базируются на аффинных преобразованиях, где все операции трансформации трехмерного объекта описаны с использованием математического аппарата матричного представления данных при реализации таких операций, как поворот, сжатие / растяжение, перемещение 3D-объекта<sup>1</sup>. Программная разработка алгоритма была выполнена с применением библиотеки OpenGL Mathematics<sup>2</sup>, которая включает основные функции операций матричных преобразований в трехмерном пространстве; это позволило применить базовые функции OpenGL для отображения текущего положения полигональной сетки. Основной алгоритм работы можно представить в виде схемы (см. рис. 7).

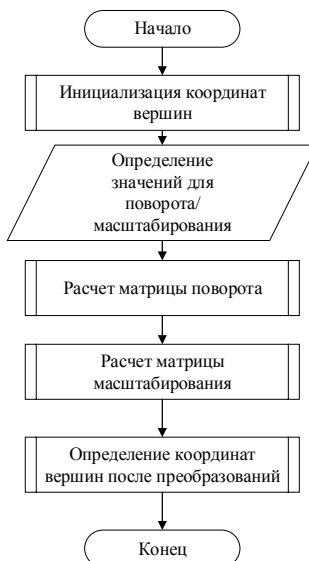


Рис. 7. Алгоритм преобразования полигональной сетки

Принцип использования функций библиотеки OpenGL заключается в возможности определения текущих координат экранного манипулятора с учетом перемещения относительно начального положения и расчета величины смещения, что является исходным параметром при вызове процедур, осуществляющих реализацию поворота, масштабирования, перемещения и сжатия / растяжения полигональной сетки. Например, алгоритм масштабирования включает в себя вызов функции Scale(vector), где в качестве основного параметра передается трехкомпонентный вектор, каждый элемент которого хранит в себе множитель растяжения для каждой из осей координат. В результате для определения новых значений вершин используется матрица

<sup>1</sup> Дьяконов В. П. Энциклопедия компьютерной алгебры. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 1268 с.

<sup>2</sup> Задорожный А. Г. Вагин Д. В., Кошкина Ю. И. Введение в двумерную компьютерную графику с использованием библиотеки OpenGL. – Новосибирск: НГТУ, 2018. – 103 с.

масштабирования и происходит расчет новых трехмерных координат с учетом текущих преобразований.

*Алгоритм визуализации цифрового куба*

Возможность отображения цифрового куба на экране базируется на программной реализации построения многослойной полигональной сетки, состоящей из множества вершин, каждая из которых описана набором трехмерных координат. Общее количество слоев сетки может варьироваться в зависимости от необходимой детализации визуального представления 3D-объекта. Каждый узел сетки проиндексирован и имеет свой уникальный номер, что позволяет оптимизировать инициализацию структуры хранения данных. Общая схема работы модуля визуализации представлена на рис. 8.

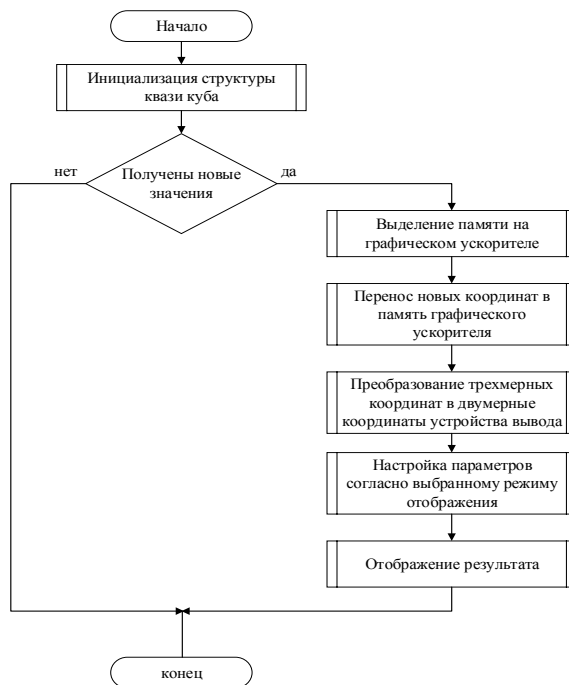


Рис. 8. Алгоритм процесса визуализации

В процессе визуализации выполняется обращение к функции `glBufferData` библиотеки OpenGL для выделения на графическом устройстве участка памяти, заполняемого переданным массивом координат вершин полигональной сетки из оперативной памяти. Далее происходит обновление данных видеопамати с помощью функции `glBufferSubData`, инициализирующей изменение текущих параметров массива значений вершин полигональной сетки. Графический ускоритель преобразует полученные трехмерные координаты в двумерные для отображения на плоскости устройства вывода при помощи функции `glDrawArrays`, для которой в качестве основных параметров передаются тип отображаемого примитива и индексы границ диапазона массива вершин. В результате последовательного вызова представленных функций формиру-

ется итоговое изображение в памяти кадрового буфера, его вывод на пользовательский экран осуществляется с помощью функции `glSwapBuffers`. В итоге реализуется поддержка многопоточности между центральным и графическим процессорами, первый из которых выполняет от одного до двух потоков вычислений на одно процессорное ядро, а второй может поддерживать несколько тысяч потоков на каждый мультипроцессор. Использование графического процессора позволяет снизить нагрузку на центральный процессор и повысить скорость передачи данных между центральным и графическим процессорами.

В результате работы созданы алгоритмы, позволяющие построить полигональную сетку, и реализованы функции для отображения графической информации в трехмерном пространстве.

### Результаты визуализации разработанного программного обеспечения

Для реализации задач трансформации и визуализации информации для виртуального объекта, получаемого с аппаратов ультразвуковой диагностики, выбран формат представления ОРМ в виде цифрового куба. Суть такого подхода заключается в детальной визуализации трехмерного тела в виде многослойной полигональной сетки, узлы которой связаны между собой (см. рис. 4). В ходе реализации действий, касающихся виртуального объекта, выполняется трансформация структуры полигональной сетки. Примеры такой трансформации представлены на рис. 9.

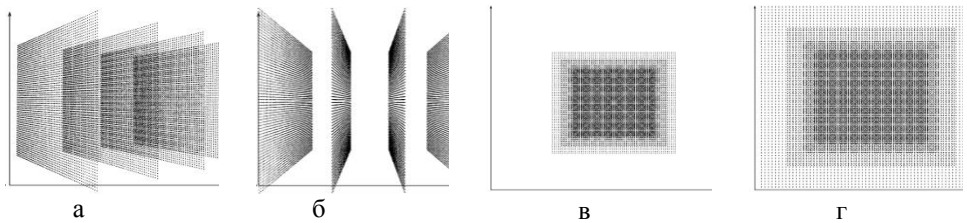


Рис. 9. Основные схемы трансформации 3D-куба при использовании АРС ультразвуковой диагностики: а, б – повороты куба; в, г – сжатие / растяжение куба

Реализация программного модуля для трансформации и визуализации 3D-куба выполнена с использованием:

- языка программирования C++, применяемого для реализации основного функционала модулей;
- функций и процедур библиотеки OpenGL с не зависящим от платформы программным интерфейсом для написания приложений, использующих двумерную и трехмерную компьютерную графику;
- кроссплатформенной библиотеки Qt для создания графических пользовательских интерфейсов (GUI) от фирмы Trolltech. Эта библиотека полностью объектно-ориентирована, благодаря чему доступно легкое расширение возможностей и разработка новых компонентов;
- библиотеки GLM (OpenGL Mathematics), позволяющей использовать данные для OpenGL.

На рис. 10 представлено несколько рабочих окон модуля программного продукта, реализованных для решения задачи.

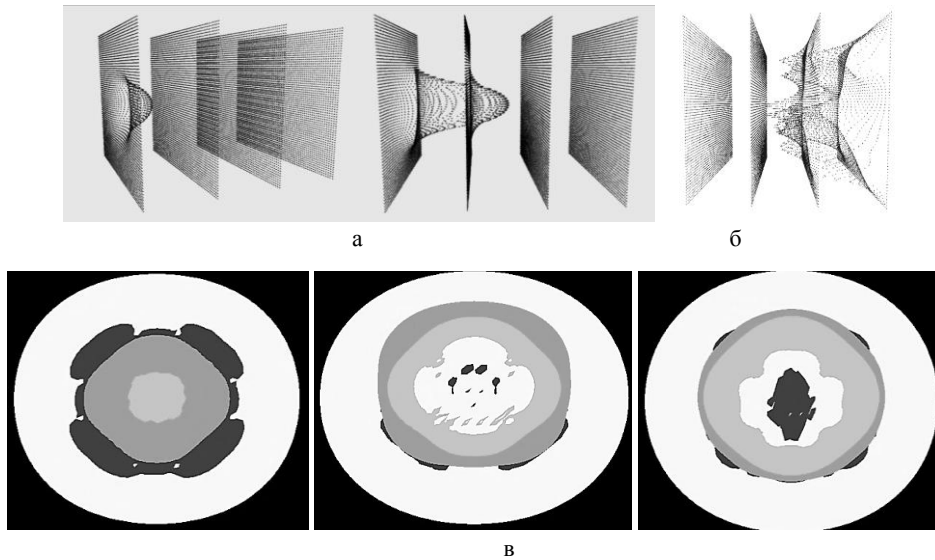


Рис. 10. Результаты трансформации и визуализации:  
а – визуализация процесса деформации;  
б – деформация тела по выбранным узлам;  
в – деформация наполненной полигональной сетки

### Перспективы развития

В данной статье приведены результаты начального этапа разработки программного обеспечения для модуля трансформации и визуализации информации, представленной в виде 3D-куба, наполненного структурными элементами объекта реального мира. Перспективными направлениями развития проекта являются:

- позиционирование джойстика на поверхности объекта реального мира;
- автоматический анализ получаемого изображения, в ходе которого определяются внутренние структурные элементы с установлением площади плоских элементов и объема 3D-элементов;
- построение дерева классификации объектов;
- построение дерева принятия решений по классификации объектов с точки зрения медицинской диагностики.

### Выводы

В ходе нашего исследования мы пришли к следующим выводам:

1. Анализ источников показал отсутствие аналогов и прототипов программного и аппаратного обеспечения АРС, способного в обучающем и удаленном режимах выполнять элементы УЗИ-диагностики для объектов как реального, так и виртуального мира.
2. Анализ функций специалиста по УЗИ-диагностике позволил соотнести действия специалиста и работу модулей программного обеспечения.
3. Наибольшую сложность при разработке программного обеспечения для АРС составляет формирование библиотеки исходных данных, близких по форме и структуре к изображениям, получаемым с реальных аппаратов.

4. Начальный этап исследования показал, что при выбранной концепции реализации желаемые результаты могут быть достигнуты.

#### **Список литературы**

Алексанян Г. К., Щербаков И. Д., Кучер А. И. Программа визуализации внутренних структур исследуемого объекта методом электроимпедансной томографии (Визуализация 3D-EIT1). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018666295, 13.12.2018. Заявка № 2018662721 от 13.11.2018.

Багутдинов Р. А. Идея многокурсовой системы технического зрения для формирования 3D-моделей поверхности объекта в задачах разработки мобильных роботов // Программные системы и вычислительные методы. – 2017. – № 4. – С. 1–6.

Бастов Г. А. Технологии графической трансформации объектов в условиях использования компьютерной графики // Дизайн и технологии. – 2016. – № 51 (93). – С. 6–12.

Блохинов Ю. Б., Веркеенко М. С. Алгоритмы построения цифровых трехмерных моделей уникальных объектов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 4. – С. 118–131.

Бубис Е. Л. Визуализация периода трансформации состояния поляризации в кристалле исландского шпата (аналог опыта Умова) // Успехи современного естествознания. – 2008. – № 3. – С. 104.

Бугакова Т. Ю. Трехмерное моделирование деформации инженерного объекта методом сплайн-интерполяции // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 96–105.

Бугакова Т. Ю., Борисов Д. А. Разработка методики определения пространственно-временного состояния техногенных объектов // Известия высших учебных заведений. Раздел Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 246–250.

Бугакова Т. Ю., Шляхова М. М. 3D-моделирование и визуализация деформации поверхности на примере купола Новосибирского планетария // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 7. – С. 63–67.

Веселов В. И., Филин Ю. Н., Картавцев Н. С. Архитектурное построение формографики инфо-гиперкубов // Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы III Международной научно-практической конференции (Москва, 14 мая 2015 г.) / под редакцией М. И. Ботова – Москва: Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, 2015. – С. 273–280.

Вяткин С. И., Городилов М. А., Долговесов Б. С. Геометрическое моделирование и визуализация функционально заданных объектов на базе функций возмущения с использованием графических акселераторов // Научная визуализация. – 2010. – Т. 2. – № 3. – С. 22–49.

Галкин В. И., Анохин А. О., Галкин Е. В., Преображенский Е. В., Палтневич А. Р. Способ получения 3-мерной модели поверхности объекта. Патент № RU 2427796 C1, 27.08.2011. Заявка № 2009148280/28 от 25.12.2009.

Глаз А. Б., Тимухин А. А. Восстановление 3D поверхности лиц на базе исходных 2D изображений // Математические методы распознавания образов. – 2005. – Т. 12. – № 1. – С. 69–72.

Гниненко И. А. Разработка 3D моделей для лаборатории 3D визуализации и компьютерной графики // Сборник трудов межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского (Москва, 17 февраля – 01 марта 2017 г.). – Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2017. – С. 92–93.

Гора С. Ю., Довгаль В. М. Метод и инструментальные средства решения задачи сжатия изображений с использованием механизмов хаотической динамики // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2012. – № 4–2 (24). – С. 25–28.

Городничев М. Г., Гематудинов Р. А., Кухаренко А. М. О некоторых методах визуализации динамических 3D моделей // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 1 (7). – С. 18–29.

Григорьев И. Г. Способ формирования изображения поверхности объекта. Патент № RU 2707980 C1, 03.12.2019. Заявка № 2019114912 от 16.05.2019.

Дерюгина Е. О., Борсук Н. А., Васина Е. В. Подход к реализации 3D-моделей эксклюзивных экспонатов музея по их фотографиям // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2019. – Т. 24. – № 7. – С. 48–55.

Дьяконов В. П. Энциклопедия компьютерной алгебры. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 1268 с.

Жиликов Е. Г., Лихошерстный А. Ю. Архитектура нейросети в задаче прецедентного распознавания объектов на изображениях с использованием частотных признаков // Вопросы радиоэлектроники. – 2013. – Т. 4. – № 1. – С. 35–45.

Журавлев Г. М., Теличко В. Г., Куриен Н. С., Гвоздев А. Е., Малий Д. В. Математическое моделирование разрушения элементов строительных конструкций под действием динамической нагрузки // Чебышевский сборник. – 2019. – Т. 20. – № 4 (72). – С. 372–386.

Задорожный А. Г. Вагин Д. В., Кошкина Ю. И. Введение в двумерную компьютерную графику с использованием библиотеки OpenGL. – Новосибирск: НГТУ, 2018. – 103 с.

Карташев И. С., Веселов В. И., Георгиевский О. В., Филин Ю. Н. Архикуб-изоконструктор трансформации формографики // Сборник трудов к международной научно-практической конференции «Экономически эффективные и экологически чистые инновационные технологии» (Москва, 18 декабря 2013 г.) / под редакцией В. А. Умнова. – Москва: РЭУ им. Г. В. Плеханова, 2013. – С. 156–160.

Клячин А. А., Клячин В. А., Григорьева Е. Г. Визуализация расчета формы поверхностей минимальной площади // Научная визуализация. – 2014. – Т. 6. – № 2. – С. 34–42.

Кознов Д. В., Ларчик Е. В., Терехов А. Н. Трансформация динамических представлений в предметно-ориентированном визуальном моделировании // Программирование. – 2015. – № 4. – С. 3–12.

Кравченко А. М., Семеренко И. П., Икама Д. Л. Моделирование и визуализация напряженно-деформированного состояния механических систем в условиях современной образовательной среды // Научный резерв. – 2019. – № 4 (8). – С. 92–98.

Крыловецкий А. А., Черников И. С. Реконструкция и распознавание объектов в системах компьютерного зрения // Телематика'2009: сборник трудов XVI Всероссийской научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 22–25 июня 2009 г.). – Санкт-Петербург: СПбГУИТМО, 2009. – С. 314–315.

Ксенофонтов С. Ю. Способ трехмерной визуализации внутренней структуры исследуемого объекта в реальном времени. Патент № RU 2681348 C1, 06.03.2019. Заявка № 2018114616 от 19.04.2018.

Лиманова Н. И., Труханов А. С. Визуализация объектов компьютерной томографии // Наука без границ. – 2018. – № 5 (22). – С. 52–54.

Литвинова Ю. С., Максименко-Шейко К. В., Шейко Т. И. Аналитическая идентификация трехмерных геометрических объектов по информации о форме их сечений // Проблемы машиностроения. – 2017. – Т. 20. – № 1. – С. 45–51.

Логунова О. С., Андреев С. М., Гарбар Е. А., Маркевич А. В., Николаев А. А. Автоматизация научных исследований нарушения сплошности плоской поверхности: конструкционное решение программно-аппаратного комплекса // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 1 (46). – С. 54–59.

Орлов С. Г., Шабров Н. Н. Вершинный шейдер для визуализации деформируемой пластины // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 1–14.

Осинцев А. В., Очков К. Ю. Визуализация перемещений и деформаций методом цифровой

корреляции изображений // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 15–23.

Остапов Д. С., Усатилов С. В. Программа для построения базы данных с обучающей выборкой для распознавания плоских изображений объектов природного происхождения, с качественной и количественной оценкой состояния поверхности единичных объектов и их массового количества. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016618408, 28.07.2016. Заявка № 2016615486 от 30.05.2016.

Парфентьев К. В., Гаврилов А. И. Построение моделей подстилающей поверхности на основе реконструкции данных мультиспектрального мониторинга // Интернет-журнал «Наукoведение». – 2017. – Т. 9. – № 6. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/160TVN617.pdf> (дата обращения: 06.08.2020).

Супель А., Хвостов П. М., Игнатьев К. Е. Оценка эффективности проектирования трехмерных полигональных моделей как способа визуализации иллюстративной информации // Современные информационные технологии: сборник трудов по материалам 5-й Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 27 сентября 2019 г.) / под редакцией В. М. Артюшенко, В. И. Воловач. – Москва: ООО «Научный консультант», 2019. – С. 115–120.

Филин Ю. Н., Кофанов А. В., Картавцев И. С., Картавцев Н. С. Проективографическое формoобразование инфo-гиперкубов: теоретические и методические аспекты // Строительство: наука и образование. – 2015. – № 1. – URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/01/5\\_Filin.pdf](http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/01/5_Filin.pdf) (дата обращения: 06.08.2020).

Хан М. Д., Игнатенко А. В. Основанные на изображениях способ представления и визуализации трехмерного объекта и способ представления и визуализации анимированного объекта. Патент № RU 2216781 C2, 20.11.2003. Заявка № 2001118221/09 от 29.06.2001.

## References

Aleksanian G. K., Shcherbakov I. D., Kucher A. I. *Programma vizualizatsii vnutrennikh struktur issleduemogo ob"ekta metodom elektroimpedansnoi tomografii (Vizualizatsiia 3D-EIT1). Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM RU 2018666295, 13.12.2018. Zaiavka № 2018662721 ot 13.11.2018* [Software for visualization of internal structures of the prototype system by electrical impedance tomography (3D-EIT1 visualization). Certificate of registration for the software for ECM RU 2018666295, 13.12.2018. Application No. 2018662721 dated 13.11.2018].

Bagutdinov R. A. *Ideia mnogorakurnoi sistemy tekhnicheskogo zreniia dlia formirovaniia 3D-modelei poverkhnosti ob"ekta v zadachakh razrabotki mobil'nykh robotov* [The idea of a multi-view vision system for forming 3D models for the surface of an object in the tasks of developing mobile robots]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody* [Software systems and computational methods], 2017, no. 4, pp. 1–6.

Bastov G. A. *Tekhnologii graficheskoi transformatsii ob"ektov v usloviakh ispol'zovaniia komp'uternoi grafiki* [Graphic transformations of the object in case of using computer graphics]. *Dizain i tekhnologii* [Design and technologies], 2016, no. 51 (93), pp. 6–12.

Blokhinov Iu. B., Verkeenko M. S. *Algoritmy postroeniia tsifrovyykh trekhmernyykh modelei unikal'nykh ob"ektov* [Algorithms for construction digital 3D models for unique objects]. *Izvestiia RAN. Teoriia i sistemy upravleniia* [Journal of computer and systems sciences international], 2011, no. 4, pp. 118–131.

Bubis E. L. *Vizualizatsiia perioda transformatsii sostoiianiia poliarizatsii v kristalle islandskogo shpata (analog opyta Umova)* [Visualization of the transformation period of the polarization state in the Icelandic spar crystal (analogue of the Umov's experiment)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia* [Advances in current natural sciences], 2008, no. 3, pp. 104.

Bugakova T. Iu. *Trekhmernoe modelirovanie deformatsii inzhenernogo ob"ekta metodom spline-interpoliatsii* [Three-dimensional modeling of deformations of an engineering object with spline in-

terpolation method]. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik of SSUGT], 2019, vol. 24, no. 3, pp. 96–105.

Bugakova T. Iu., Borisov D. A. Razrabotka metodiki opredeleniia prostranstvenno-vremennogo sostoiianiia tekhnogennykh ob"ektov [Development of a method for determining the spatial-temporal state of technogenic objects]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Razdel Geodeziia i aerofotos"emka* [Proceedings of the higher educational institutions. Geodesy and aerophotosurveying], 2015, no. 5/C, pp. 246–250.

Bugakova T. Iu., Shliakhova M. M. 3D-modelirovanie i vizualizatsiia deformatsii poverkhnosti na primere kupola Novosibirskogo planetariia [3D modelling and visualisation of surface deformation by the example of Novosibirsk planetarium]. *Interespo Geo-Sibir'* [Geo-Siberia Interexpo], 2015, vol. 7, pp. 63–67.

Veselov V. I., Filin Iu. N., Kartavtsev N. S. Arkhitekturnoe postroenie formografiki infogiperkubov [Architectural construction of infographic and hypercube formography]. *Innovatsii: perspektivy, problemy, dostizheniia: materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Moskva, 14 maia 2015 g.)* [Innovations: perspectives, challenges, achievements: Proceedings of the III International research and practice conference (Moscow, May 14, 2015); ed. by M. I. Botov]. Moscow: Rossiiskii ekonomicheskii universitet imeni G. V. Plekhanova, 2015, pp. 273–280.

Viatkin S. I., Gorodilov M. A., Dolgovesov B. S. Geometricheskoe modelirovanie i vizualizatsiia funktsional'no za-dannykh ob"ektov na baze funktsii vozmushcheniia s ispol'zovaniem graficheskikh akseleratorov [Geometric modeling and visualization of functionally defined objects based on perturbation functions applying graphical accelerators]. *Nauchnaia vizualizatsiia* [Scientific visualization], 2010, vol. 2, no. 3, pp. 22–49.

Galkin V. I., Anokhin A. O., Galkin E. V., Preobrazhenskii E. V., Paltievich A. R. *Sposob polucheniiia 3-mernoii modeli poverkhnosti ob"ekta. Patent № RU 2427796 C1, 27.08.2011. Zaiavka № 2009148280/28 ot 25.12.2009* [Method for producing a 3-dimensional surface model of an object. Patent № RU 2427796 C1, 27.08.2011. Application No. 2009148280/28 dated 25.12.2009].

Glaz A. B., Timukhin A. A. Vosstanovlenie 3D poverkhnosti lits na baze iskhodnykh 2D izobrazhenii [Restoration of the 3D surface of faces based on the original 2D images]. *Matematicheskie metody raspoznavaniia obrazov* [Mathematical methods of pattern recognition], 2005, vol. 12, no. 1, pp. 69–72.

Gninenko I. A. Razrabotka 3D modelei dlia laboratorii 3D vizualizatsii i komp'iuternoi grafiki [Development of 3D models for the laboratory of 3D visualization and computer graphics]. *Sbornik trudov mezhvuzovskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov im. E. V. Armenskogo (Moskva, 17 fevralia – 01 marta 2017 g.)* [Collection of works of the inter-university scientific and technical conference of students, postgraduate students and young specialists named after E. V. Armensky (Moscow, 17 February – 1 March 2017)]. Moscow: MIEM NIU VShE, 2017, pp. 92–93.

Gora S. Iu., Dovgal' V. M. Metod i instrumental'nye sredstva resheniia zadachi szhatiia izobrazhenii s ispol'zovaniem mekhanizmov khaoticheskoi dinamiki [Method and tools for solving the problem of image compression using the mechanisms of chaotic dynamics]. *Uchenye zapiski. Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes. Electronic scientific journal of Kursk State University], 2012, no. 4–2 (24), pp. 25–28.

Gorodnichev M. G., Gematudinov R. A., Kukharenko A. M. O nekotorykh metodakh vizualizatsii dinamicheskikh 3D modelei [Some methods of rendering dynamic 3D models]. *Ekonomika i kachestvo sistem sviazi* [Economics and quality of communication systems], 2018, no. 1 (7), pp. 18–29.

Grigorov I. G. *Sposob formirovaniia izobrazheniia poverkhnosti ob"ekta. Patent № RU 2707980 C1, 03.12.2019. Zaiavka № 2019114912 ot 16.05.2019* [Method of generating an image of an object surface. Patent № RU 2707980 C1, 03.12.2019. Application No. 2019114912 dated 16.05.2019].

Deriugina E. O., Borsuk N. A., Vasina E. V. Podkhod k realizatsii 3D-modelei ekskliuzivnykh

ekspontov muzeia po ikh fotografiiam [Implementation approach of 3D-models of exclusive museum exhibits by their photos]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2019, vol. 24, no. 7, pp. 48–55.

D'iaconov V. P. *Entsiklopediia komp'iuternoi algebrы* [Encyclopedia of computer algebra]. Moscow: DMK Press, 2010. 1268 p.

Zhiliakov E. G., Likhosherstnyi A. Iu. Arkhitektura neuroseti v zadache pretsedentnogo raspoznavaniia ob'ektov na izobrazheniakh s ispol'zovaniem chastotnykh priznakov [Architecture of neural networks in the precedent object recognition task using frequency signs]. *Voprosy radioelektroniki* [Issues of radio electronics], 2013, vol. 4, no. 1, pp. 35–45.

Zhuravlev G. M., Telichko V. G., Kurien N. S., Gvozdev A. E., Malii D. V. Matematicheskoe modelirovanie razrusheniia elementov stroitel'nykh konstruksii pod deistviem dinamicheskoi nagruzki [Mathematical modeling of structural elements destruction under dynamic load]. *Chebyshevskii sbornik* [Chebyshevsky collection], 2019, vol. 20, no. 4 (72), pp. 372–386.

Zadorozhnyi A. G. Vagin D. V., Koshkina Iu. I. *Vvedenie v dvumernuiu komp'iuternuiu grafiku s ispol'zovaniem biblioteki OpenGL* [Introduction to 2D computer graphics using OpenGL]. Novosibirsk: NGTU, 2018. 103 p.

Kartavtsev I. S., Veselov V. I., Georgievskii O. V., Filin Iu. N. Arkhikub-izokonstruktor transformatsii formo-grafiki [Archicube isoconstructor of formographic transformation]. *Sbornik trudov k mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Ekonomicheski effektivnye i ekologicheski chistye innovatsionnye tekhnologii" (Moskva, 18 dekabria 2013 g.)* [Collection of works for the International research and practice conference "Cost-effective and environmentally friendly innovative technologies" (Moscow, December 18, 2013); ed. by V. A. Umnov]. Moscow: REU im. G. V. Plekhanova, 2013, pp. 156–160.

Kliachin A. A., Kliachin V. A., Grigor'eva E. G. Vizualizatsiia rascheta formy poverkhnostei minimal'noi ploschadi [Visualization of calculation of minimal area surfaces]. *Nauchnaia vizualizatsiia* [Scientific visualization], 2014, vol. 6, no. 2, pp. 34–42.

Koznov D. V., Larchik E. V., Terekhov A. N. Transformatsiia dinamicheskikh predstavlenii v predmetno-orientirovannom vizual'nom modelirovanii [Transformation of dynamic representations in domain specific modeling]. *Programmirovaniie* [Programming and computer software], 2015, no. 4, pp. 3–12.

Kravchenko A. M., Semerenko I. P., Ikama D. L. Modelirovanie i vizualizatsiia napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia mekhanicheskikh sistem v usloviiah sovremennoi obrazovatel'noi sredy [Modeling and visualizing strained-deformed state of mechanical systems in modern educational environment]. *Nauchnyi rezerv* [Scientific reserve], 2019, no. 4 (8), pp. 92–98.

Krylovetskii A. A., Chernikov I. S. Rekonstruksii i raspoznavanie ob'ektov v sistemakh komp'iuternogo zreniia [Reconstruction and recognition of objects in computer vision systems]. *Telematika'2009: sbornik trudov XVI Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii (Sankt-Peterburg, 22–25 iunია 2009 g.)* [Telematics'2009: collection of works of the XVI All-Russian scientific and methodological conference (St Petersburg, June 22–25, 2009)]. St Petersburg: SPbGUITMO, 2009, pp. 314–315.

Ksenofontov S. Iu. *Sposob trekhmernoi vizualizatsii vnutrennei struktury issleduemogo ob'ekta v real'nom vremeni. Patent № RU 2681348 C1, 06.03.2019. Zaiavka № 2018114616 ot 19.04.2018* [Method of 3D visualization of internal structure of investigated object in real time. Patent № RU 2681348 C1, 06.03.2019. Application No. 2018114616 dated 19.04.2018].

Limanova N. I., Trukhanov A. S. Vizualizatsiia ob'ektov komp'iuternoi tomografii [Visualization of computer tomography objects]. *Nauka bez granits* [Science without borders], 2018, no. 5 (22), pp. 52–54.

Litvinova Iu. S., Maksimenko-Sheiko K. V., Sheiko T. I. Analiticheskaia identifikatsiia trekhmernykh geometricheskikh ob'ektov po informatsii o forme ikh sechenii [Analytical identifica-

tion of three-dimensional geometric objects by information about the shape of their cross-sections]. *Problemy mashinostroeniia* [Journal of mechanical engineering], 2017, vol. 20, no. 1, pp. 45–51.

Logunova O. S., Andreev S. M., Garbar E. A., Markevich A. V., Nikolaev A. A. Avtomatizatsiia nauchnykh issledovaniy narusheniia sploshnosti ploskoi poverkhnosti: konstruksionnoe reshenie programmno-apparatnogo kompleksa [Automation of scientific research of flat surface discontinuities: structural solution of a hardware-software complex]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2020, no. 1 (46), pp. 54–59.

Orlov S. G., Shabrov N. N. Vershinnyi sheider dlia vizualizatsii deformiruemoi plastiny [Vertex shader for visualizing a deformable strip]. *Nauchnaia vizualizatsiia* [Scientific visualization], 2016, vol. 8, no. 2, pp. 1–14.

Osintsev A. V., Ochkov K. Iu. Vizualizatsiia peremeshchenii i deformatsii metodom tsifrovoy korreliatsii izobrazhenii [Visualization of displacement and deformation by digital image correlation method]. *Nauchnaia vizualizatsiia* [Scientific visualization], 2016, vol. 8, no. 2, pp. 15–23.

Ostapov D. S., Usatkov S. V. *Programma dlia postroeniia bazy dannykh s obuchaiushchei vyborkoi dlia raspoznavaniia ploskikh izobrazhenii ob"ektov prirodnogo proiskhozhdeniia, s kachestvennoi i kolichestvennoi otsenкой sostoianiia poverkhnosti edinichnykh ob"ektov i ikh massovogo kolichestva. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM RU 2016618408, 28.07.2016. Zaiavka № 2016615486 ot 30.05.2016* [A program for building a database with a training sample for recognizing flat images of objects of natural origin, with a qualitative and quantitative assessment of the surface state of single objects and their mass number. Certificate of program registration for computer RU 2016618408, 28.07.2016. Application No. 2016615486 dated 30.05.2016].

Parfent'ev K. V., Gavrilov A. I. Postroenie modelei podstilaiushchei poverkhnosti na osnove rekonstruksii dannykh mul'tispektral'nogo monitoringa [Developing the underlying surface models based on the reconstruction of multispectral monitoring data]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* [Internet journal "Science studies"], 2017, vol. no. 6. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/160TVN617.pdf> (accessed: 06.08.2020).

Supel' A., Khvostov P. M., Ignat'ev K. E. Otsenka effektivnosti proektirovaniia trekhmernykh poligonal'nykh modelei kak sposoba vizualizatsii illiustrativnoi informatsii [Evaluating the design efficiency of 3D polygonal models as a way to visualize illustrative information]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: sbornik trudov po materialam 5-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Moskva, 27 sentiabria 2019 g.)* [Modern information technologies: Proceedings of the 5th All-Russian scientific and technical conference (Moscow, September 27, 2019); ed. by V. M. Artiushenko, V. I. Volovach]. Moscow: OOO "Nauchnyi konsul'tant", 2019, pp. 115–120.

Filin Iu. N., Kofanov A. V., Kartavtsev I. S., Kartavtsev N. S. Proektivograficheskoe formoobrazovanie info-giperkubov: teoreticheskie i metodicheskie aspekty [Projective geometric shaping of info-hypercubes: theoretical and methodical aspects]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: science and education], 2015, no. 1. Available at: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/01/5\\_Filin.pdf](http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2015/01/5_Filin.pdf) (accessed: 06.08.2020).

Khan M. D., Ignatenko A. V. *Osnovnyye na izobrazheniakh sposob predstavleniia i vizualizatsii trekhmernogo ob"ekta i sposob predstavleniia i vizualizatsii animirovannogo ob"ekta. Patent № RU 2216781 C2, 20.11.2003. Zaiavka № 2001118221/09 ot 29.06.2001* [An image-based method for representing and visualizing a 3D object, and a method for representing and visualizing an animated object. Patent № RU 2216781 C2, 20.11.2003. Application No. 2001118221/09 dated 29.06.2001].

---

Для цитирования: Логунова О. С., Кухта Ю. Б., Ильина Е. А., Сагадиев С. Р., Николаев А. А., Вознюк М. О. Обработка информации в ассистирующей робототехнической системе: трансформация и визуализация // Вестник Череповецкого государственного университета. –

2021. – № 1 (100). – С. 20–40. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-2>

**For citation:** Logunova O. S., Kukhta Iu. B., Ilina E. A., Sagadiev S. R., Nikolaev A. A., Voznyuk M. O. Information processing in the assisting robotechnical system: transformation and visualization. *Cherepovets State University Bulletin*, 2021, no. 1 (100), pp. 20–40. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-2>

**Заявленный 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.

### Сведения об авторах

Оксана Сергеевна Логунова /  
Oksana S. Logunova

Доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, [logunova66@gmail.com](mailto:logunova66@gmail.com), Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т. Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Российская Федерация) /

Юлия Борисовна Кухта /  
Iuliia B. Kukhta

Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, [logunova66@gmail.com](mailto:logunova66@gmail.com), Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russian Federation).

Елена Александровна  
Ильина / Elena A. Ilina

Кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-9128-3891>, [perfectumyuka@mail.ru](mailto:perfectumyuka@mail.ru), Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т. Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Российская Федерация) / Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-9128-3891>, [perfectumyuka@mail.ru](mailto:perfectumyuka@mail.ru), Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russian Federation).

Сергей Рустамович  
Сагадиев /  
Sergey R. Sagadiev

Кандидат педагогических наук, <https://orcid.org/0000-0002-9143-4343>, [dar\\_nas@mail.ru](mailto:dar_nas@mail.ru), Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т. Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Российская Федерация) / Candidate of Pedagogical Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-9143-4343>, [dar\\_nas@mail.ru](mailto:dar_nas@mail.ru), Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russian Federation).

Студент, [ser.sag232@gmail.com](mailto:ser.sag232@gmail.com), Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т. Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Российская Федерация) / Student, [ser.sag232@gmail.com](mailto:ser.sag232@gmail.com), Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russian Federation).

Антон Андреевич Николаев /  
Anton A. Nikolaev

Студент, aanton2001@gmail.com, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т. Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Российская Федерация) / Student, aanton2001@gmail.com, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russian Federation).

Михаил Олегович Вознюк /  
Mikhail O. Voznyuk

Студент, voznyukmikhail@yandex.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т. Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Российская Федерация) / Student, voznyukmikhail@yan-dex.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию: 30.10.2020

Одобрена после рецензирования: 30.11.2020

Принята к публикации: 11.12.2020

The article was submitted: 30.10.2020

Approved after reviewing: 30.11.2020

Accepted for publication: 11.12.2020