

Санкт-Петербургский государственный университет

Математическое обеспечение и администрирование информационных  
систем

Кафедра Системного программирования

Ершов Кирилл Максимович

# Фреймворк для разработки навигационных медицинских систем

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель:  
ст. преп. Смирнов М. Н.

Научный консультант:  
техн. дир. ООО "Системы КМ" Петров А. Г.

Рецензент:  
разработчик ООО "Системы КМ" Менькин С. А.

Санкт-Петербург  
2018

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Software and Administration of Information Systems  
Software Engineering Chair

Kirill Ershov

# Framework for navigation medical system development

Graduation Project

Scientific supervisor:  
Senior Lecturer Mikhail Smirnov

Consultant:  
CTO at CM Systems LLC Alexander Petrov

Reviewer:  
Software Developer at CM Systems LLC Sergey Monkin

Saint-Petersburg  
2018

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1. Постановка задачи</b>	<b>6</b>
<b>2. Обзор</b>	<b>7</b>
2.1. Этапы проведения операций с использованием навигационных медицинских систем . . . . .	7
2.1.1. Предоперационная подготовка . . . . .	7
2.1.2. Регистрация пациента . . . . .	8
2.1.3. Трекинг . . . . .	9
2.2. Обзор маркерных технологий . . . . .	9
2.3. Существующие системы для ассистирования хирургу . .	11
2.4. Система Phoenixcas 3D Viewer . . . . .	11
2.5. Используемые технологии и инструменты . . . . .	12
<b>3. Разработка фреймворка</b>	<b>13</b>
3.1. Архитектура . . . . .	13
3.2. Детали реализации . . . . .	15
<b>4. Разработка модуля</b>	<b>18</b>
<b>5. Апробация</b>	<b>20</b>
<b>6. Заключение</b>	<b>22</b>
<b>Список литературы</b>	<b>23</b>

# Введение

Компьютерные технологии активно применяются в медицине. Хирургия не является исключением, так как при проведении операций особенно высоки риски и важна точность в действиях хирурга. Компьютерные системы ассистируют врачам, например, в нейрохирургии, при установке имплантов или в ортопедии.

Навигационные медицинские системы позволяют выполнять малоинвазивные операции с высокой точностью. Это достигается за счет отслеживания положения хирургических инструментов или имплантов и подсказок хирургу в их правильном позиционировании. Другими словами, навигационные системы в хирургии являются информационными центрами во время операции, предоставляющие полезную информацию хирургу в нужное время. Например, хирург может заранее спланировать место установки импланта, а во время операции с помощью трекинга осуществляется безопасная и точная установка импланта в намеченную цель. Также важным преимуществом использования таких систем является сокращение длительности операций, что в итоге приводит к уменьшению срока восстановления пациента. Благодаря высокой точности позиционирования инструментов навигационные системы позволяют проводить более сложные операции, которые не под силу хирургам, не использующим современные технологии в операционной.

Сейчас навигационные медицинские системы применяются во многих операциях, однако развитие навигации в хирургии началось с нейрохирургии [9]. Это связано с тем, что человеческий мозг крайне чувствителен к внешним воздействиям и любое неверное движение хирурга может плохо сказаться на физическом и психическом состоянии пациента. Изначально для точного позиционирования хирургических инструментов при операциях на мозге использовались громоздкие механические рамки, которые закреплялись на голове пациента. Однако такой метод навигации в нейрохирургии имеет ограниченное применение и не даёт возможности хирургу контролировать ход операции.

В 1980-х годах появились первые безрамочные навигационные систе-

мы для нейрохирургии [14]. Основным преимуществом таких систем является возможность отслеживания хирургических инструментов в режиме реального времени и визуализация их положения относительно пациента. Современные навигационные системы в хирургии основаны на безрамочной технологии и, помимо нейрохирургии, применяются во многих других видах операций [5].

В навигационных медицинских системах отслеживание положения хирургических инструментов в реальном времени может осуществляться с помощью механических систем, датчиков глубины или с помощью различных маркеров. Наиболее универсальным из них является отслеживание на основе маркерных технологий, существует множество их видов [8]. Например, с помощью электромагнитных маркеров можно отслеживать хирургические инструменты даже без прямой видимости.

Для ассистирования хирургу во время операции необходимо визуализировать отслеживаемое положение хирургических инструментов или имплантов относительно пациента. В данной работе для визуализации навигации разрабатывается модуль в системе Phoenixcas 3D Viewer, которая позволяет работать с 3D-моделями.

# 1. Постановка задачи

Целью данной работы является создание фреймворка для разработки навигационных медицинских систем, предназначенных для ассистирования хирургу и проведения малоинвазивных операций. Для её достижения были поставлены следующие задачи:

- реализовать фреймворк для разработки навигационных медицинских систем на основе маркерных технологий;
- разработать модуль в системе Phoenixcas 3D Viewer для ассистирования хирургу и проведения малоинвазивных операций;
- провести апробацию.

## 2. Обзор

### 2.1. Этапы проведения операций с использованием навигационных медицинских систем

#### 2.1.1. Предоперационная подготовка

Первым этапом проведения хирургических операций с использованием навигационных систем является предоперационная подготовка. Перед тем как начать операцию, необходимо получить точную 3D-модель пациента. Это может быть сделано, например, с помощью компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии или с помощью 3D-сканирования [13].

Компьютерная томография позволяет делать 3D-снимки высокого разрешения, а также получать контрастные изображения костных структур. Поэтому для получения 3D-модели кости обычно используют именно компьютерную томографию. Кроме того, с использованием специальных методик контрастного усиления, можно получить модель сердечно-сосудистой системы с точностью до миллиметра [13]. К недостаткам компьютерной томографии можно отнести высокую дозу рентгеновского излучения и низкую точность при снимках мягких тканей.

Магнитно-резонансная томография, в отличие от КТ, не использует рентгеновское излучение и позволяет получать 3D-модели мягких тканей в высоком разрешении. Недостатком МРТ является появление помех на снимке при движении пациента и наличии металлических имплантов.

3D-сканирование применяется для получения объёмных изображений поверхности тела пациента (рис. 1). Данная технология используется, например, в пластической хирургии или при установке имплантов.

После получения 3D-модели пациента врач анализирует изображение, оценивает состояние пациента и может спланировать операцию. Например, определить точное место установки импланта или координаты опухоли, которую следует удалить.



Рис. 1: Изображение, полученное с помощью 3D-сканирования лица.

### **2.1.2. Регистрация пациента**

После предоперационной подготовки необходимо провести регистрацию пациента [8]. Это процедура, которая позволяет соотнести 3D-модель пациента, полученную на предыдущем этапе, с текущей позицией пациента. Другими словами, устанавливается соответствие между системой координат реального мира и виртуальной системой координат, в которой размещаются модель пациента и модели других отслеживаемых объектов.

Способы регистрации пациента с использованием маркеров различаются по месту их размещения. В 1986 году впервые был описан безрамочный способ регистрации [14], при котором маркеры размещаются прямо на коже пациента. При данном подходе не требуются дополнительные хирургические вмешательства, однако точность регистрации уступает другим методам. Например, маркеры могут быть жёстко закреплены на черепе пациента при регистрации в нейрохирургии. В зубной хирургии маркеры крепятся на специальные шины, позволяющие точно определять положение челюсти.





Рис. 2: Хирургический инструмент с оптическими маркерами.

### 2.1.3. Трекинг

Как только пациент зарегистрирован, можно приступать к операции. Трекинг инструмента или импланта позволяет размещать 3D-модели отслеживаемых объектов в виртуальной системе координат относительно пациента [8]. Это помогает хирургу точно поместить имплант в запланированное место или безопасно перемещать хирургический инструмент.

Для трекинга хирургических инструментов или имплантов также используются маркерные технологии. Маркеры размещают на поверхности инструмента (рис. 2) или импланта, а во время операции вычисляются их координаты и ориентация относительно пациента. Однако зачастую разместить маркеры на самом импланте невозможно, поэтому для трекинга имплант крепят на инструмент с маркерами, который позволяет отслеживать положение импланта.

## 2.2. Обзор маркерных технологий

При регистрации пациента и трекинге инструментов могут применяться различные маркерные технологии. Маркеры различаются по способу передачи движений.

Оптические маркерные технологии используют камеры для определения координат маркера. Различают активные и пассивные оптические маркеры [8]. Активные маркеры сами являются источником света, который видит камера, а пассивные маркеры могут только отра-

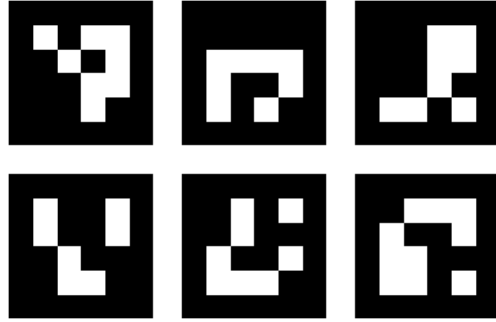


Рис. 3: Оптические маркеры ArUco.

жать свет. Для повышения точности трекинга могут применяться инфракрасные камеры, рядом с которыми располагается источник инфракрасного света. Маркеры при данном подходе покрываются специальным светоотражающим материалом. По такому принципу работает маркерная система Polaris [12].

Примером оптической пассивной маркерной технологией являются маркеры ArUco [2] (рис. 3). Такие маркеры можно просто распечатать на бумаге. При этом, зная только размеры маркера и калибровочные параметры камеры можно с видеопотока одной камеры получить его координаты и ориентацию. Кроме того, каждый маркер имеет свой уникальный идентификатор, что удобно при отслеживании нескольких объектов.

Другим видом маркерных технологий являются электромагнитные маркеры. Для получения координат маркеров, которые в данном случае являются магнитами, используют ресиверы. Положение маркера определяется по искажениям магнитного потока. Преимущество электромагнитных маркеров в том, что их можно использовать даже когда отслеживаемых объектов нет в прямой видимости.



Рис. 4: Навигационная медицинская система Navient.

### 2.3. Существующие системы для ассистирования хирургу

Для помощи хирургу во время операции существуют такие навигационные системы как Brainlab Curve или Navient [6, 10](рис. 4). Данные системы применяются в нейрохирургии, кардиохирургии или спинной хирургии. Однако для навигации в них используется один конкретный оптический тип маркеров, что ограничивает их применимость.

### 2.4. Система Phoenixcas 3D Viewer

Phoenixcas 3D Viewer — это система с модульной архитектурой, предназначенная для планирования хирургических операций. Система написана на языке C++ и основана на графическом движке Ogre3D [11]. Данная система содержит модули для визуализации и различных замеров трёхмерных моделей. В данной работе для отображения моделей пациента и отслеживаемых объектов в реальном времени реализуется модуль в системе Phoenixcas 3D Viewer. На рис. 5 представлена архитектура системы.

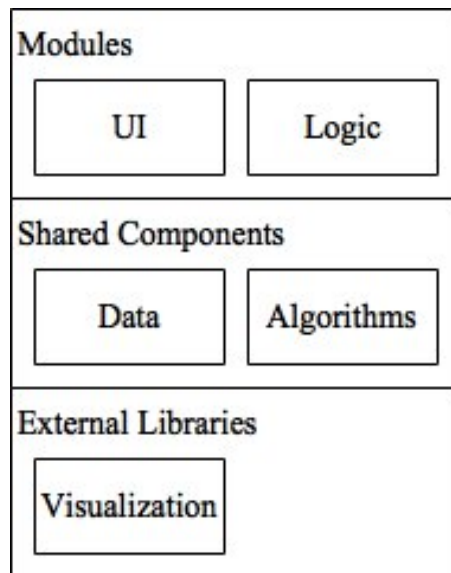


Рис. 5: Архитектура системы Phoenixcas 3D Viewer [15].

## 2.5. Используемые технологии и инструменты

В данной работе фреймворк и логика модуля в системе Phoenixcas 3D Viewer реализуются на языке C++. Графический интерфейс модуля реализуется на JavaScript и HTML. Для обработки видеопотока с камеры используется библиотека OpenCV. Работа с маркерами ArUco осуществляется с помощью библиотеки Aruco Library [1].

## 3. Разработка фреймворка

Для проведения хирургических операций с использованием компьютерных технологий необходимо в реальном времени отслеживать положение инструментов или имплантов относительно пациента. Отслеживаемые объекты размещаются в виртуальной системе координат, где начало координат — положение пациента. Для их корректного размещения необходимо знать координаты и ориентацию относительно пациента.

При трекинге, основанном на маркерных технологиях, маркеры размещаются на пациенте, импланте и инструменте. Изначально высчитываются координаты и ориентация отслеживаемых объектов независимо друг от друга. Например, можно получить координаты маркеров ArUco относительно камеры. Затем координаты и ориентация пациента или импланта пересчитываются относительно положения пациента.

Для получения координат и ориентации отслеживаемых объектов в реальном времени необходимо в реализуемом фреймворке указать используемую в данной операции маркерную технологию и координаты установки маркеров. Координаты должны задаваться относительно системы координат, в которой описана 3D-модель. Врач может это сделать во время предоперационной подготовки. В зависимости от конкретной используемой маркерной технологии может понадобиться и другая информация. Например, при использовании маркеров ArUco необходимо также передавать видеопоток с активной камеры.

### 3.1. Архитектура

Для каждой маркерной технологии в фреймворке необходимо реализовать 4 интерфейса: для пациента, импланта, инструмента и импланта на инструменте. Последний может понадобиться, если на самом импланте разместить маркеры нет возможности. Данные интерфейсы содержат методы, возвращающие текущие координаты и ориентацию отслеживаемых объектов в операционной относительно камеры (в случае оптических маркерных систем) или других отслеживающих

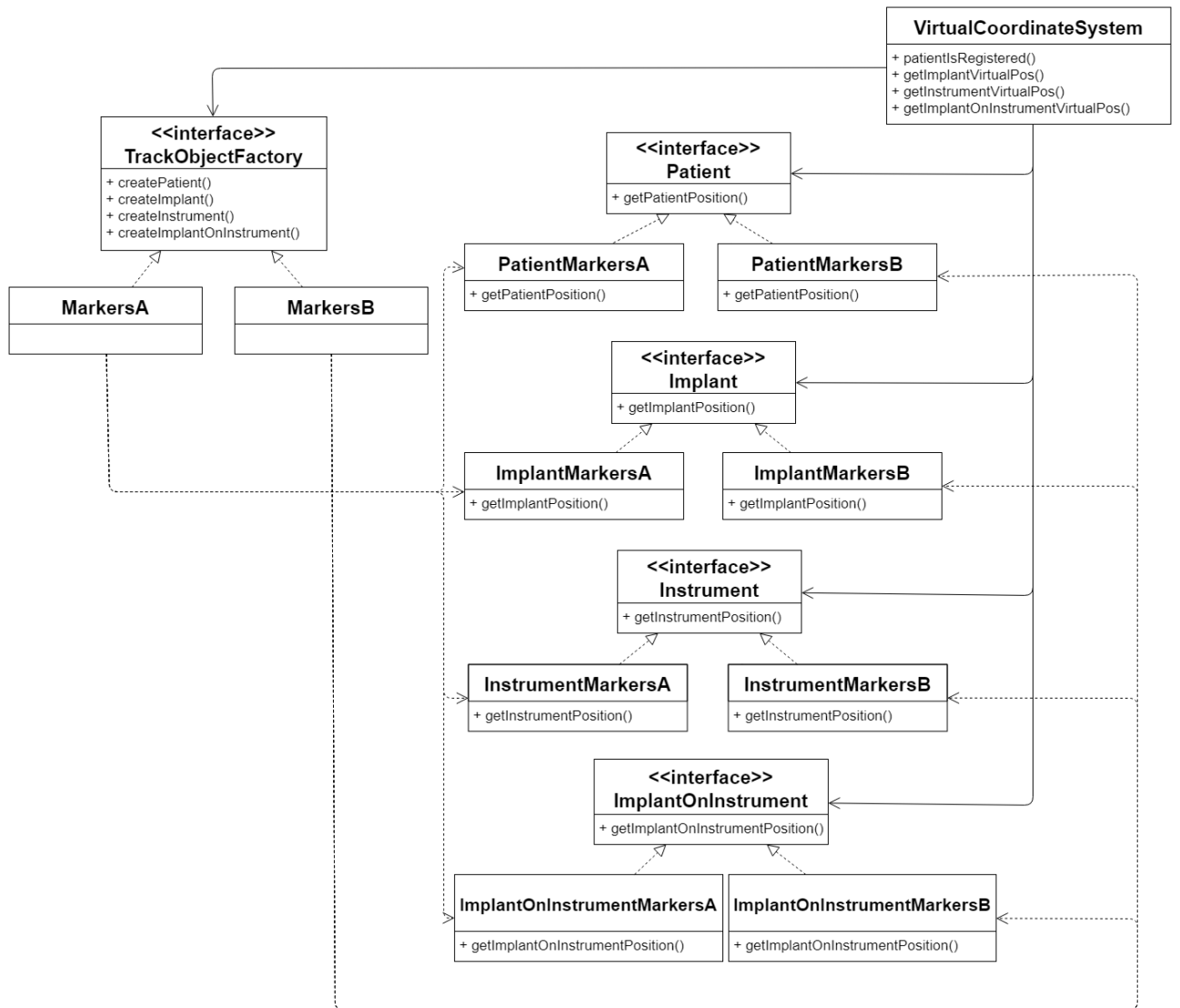


Рис. 6: Архитектура фреймворка.

устройств. Эти методы используются в классе `VirtualCoordinateSystem`, в котором реализуется получение координат инструмента, импланта или импланта на инструменте в виртуальной системе координат относительно пациента.

Для того, чтобы сделать класс `VirtualCoordinateSystem` независимым от конкретной маркерной технологии, для каждого типа маркеров также реализуется интерфейс `TrackObjectFactory`. Данный интерфейс содержит методы для создания объектов пациента, импланта или инструмента.

Таким образом, для получения координат и ориентации импланта или инструмента в виртуальной системе координат относительно пациента, клиенту необходимо в конструктор класса `VirtualCoordinateSystem` передать экземпляр класса, реализующего интерфейс `TrackObjectFactory` с необходимой маркерной технологией. И затем, через методы класса `VirtualCoordinateSystem` по необходимости получать текущее положение импланта или инструмента. Чтобы проверить, зарегистрирован ли пациент, в классе `VirtualCoordinateSystem` также реализован метод `patientIsRegistered`. На рис. 6 представлена архитектура фреймворка.

## 3.2. Детали реализации

Для работы с маркерами `ArUco` используется библиотека `ArUco Library`. Обработка видеопотока с камеры осуществляется с помощью библиотеки `OpenCV`. Для создания объекта класса `ArUcoMarkers`, реализующего интерфейс `TrackObjectFactory`, в конструктор данного класса необходимо передать видеопоток с активной камеры, размер маркеров, используемый словарь маркеров, калибровочные параметры камеры, номера идентификаторов и позиции закреплённых маркеров на пациенте, импланте или инструменте.

Видеопоток задаётся как экземпляр класса `VideoCapture` из библиотеки `OpenCV`. Для определения координат и ориентации маркеров `ArUco` нужно знать размеры маркеров и получить изображение с одной камеры. При каждом запросе текущих координат пациента, имплан-

та или инструмента относительно камеры, из видеопотока извлекается кадр, из которого затем с помощью библиотеки ArUco Library вычисляются координаты и ориентация каждого маркера относительно камеры.

Калибровочные параметры камеры необходимы для корректной детекции маркеров [4]. В данной работе параметры внутренней калибровки и коэффициенты дисторсии были получены с помощью библиотеки OpenCV.

Для детекции маркеров также необходимо знать словарь, которому принадлежат используемые маркеры. В каждом словаре маркеры имеют свой уникальный идентификатор. Словари различаются по количеству маркеров и размеру. В данной работе используется словарь ARUCO\_MIP\_36h12, рекомендуемый авторами библиотеки [7].

На изображении с камеры определяются координаты всех обнаруженных маркеров. Поэтому для отслеживаемых объектов также необходимо задать идентификаторы маркеров, которые к ним прикреплены. Если маркер на пациенте, инструменте или импланте обнаружен, сначала определяются координаты маркера, затем вычисляется центр отслеживаемого объекта. Координаты центра определяются вычитанием из координат маркера относительно камеры координат маркера относительно центра отслеживаемого объекта.

Для определения координат и ориентации пациента, импланта или инструмента достаточно использовать один маркер ArUco. Однако во время операции маркер может пропасть из области видимости камеры. Поэтому предусмотрена возможность использования нескольких маркеров. Для каждого отслеживаемого объекта задаётся список идентификаторов маркеров и их координаты относительно центра. В случае, если имплант закреплён на инструменте, для определения центра импланта необходимо также знать координаты крепления импланта к инструменту.

В классе VirtualCoordinateSystem вычисляются положение импланта и инструмента в виртуальной системе координат относительно пациента по координатам относительно отслеживающего устройства. Сдвиг и поворот импланта и инструмента осуществляется с помощью функ-



ций Rodrigues и composeRT из библиотеки OpenCV [3].

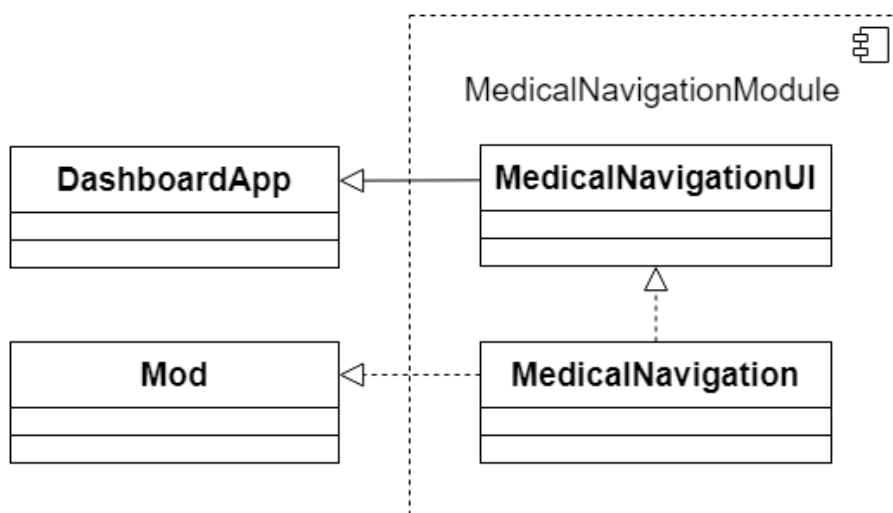


Рис. 7: Архитектура модуля в системе Phoenixcas 3D Viewer.

## 4. Разработка модуля

Для ассистирования хирургу во время операции реализован модуль в программной системе Phoenixcas 3D Viewer. Данный модуль позволяет врачу точно размещать хирургический инструмент или имплант относительно пациента, ориентируясь на текущее положение 3D-моделей на мониторе компьютера.

Логика модуля для навигации импланта или инструмента реализована на языке C++. На рис. 7 показана архитектура модуля. Для активации модуля в классе MedicalNavigation реализован метод activate. В методе создаётся экземпляр класса VirtualCoordinateSystem из реализованного в данной работе фреймворка для трекинга инструмента или импланта. В конструктор данного класса передаётся экземпляр класса, реализующего интерфейс TrackObjectFactory с используемой в данный момент маркерной технологией.

Перед отрисовкой следующего кадра трёхмерной сцены вызывается метод update. В методе устанавливаются координаты и ориентация инструмента или импланта относительно пациента, которые возвращают методы класса VirtualCoordinateSystem. В случае, если пациент не зарегистрирован, в трёхмерной сцене не отображаются никакие модели. Если регистрация произошла, размещаются 3D-модели пациента и, если имплант или инструмент обнаружены, их модели также отобра-

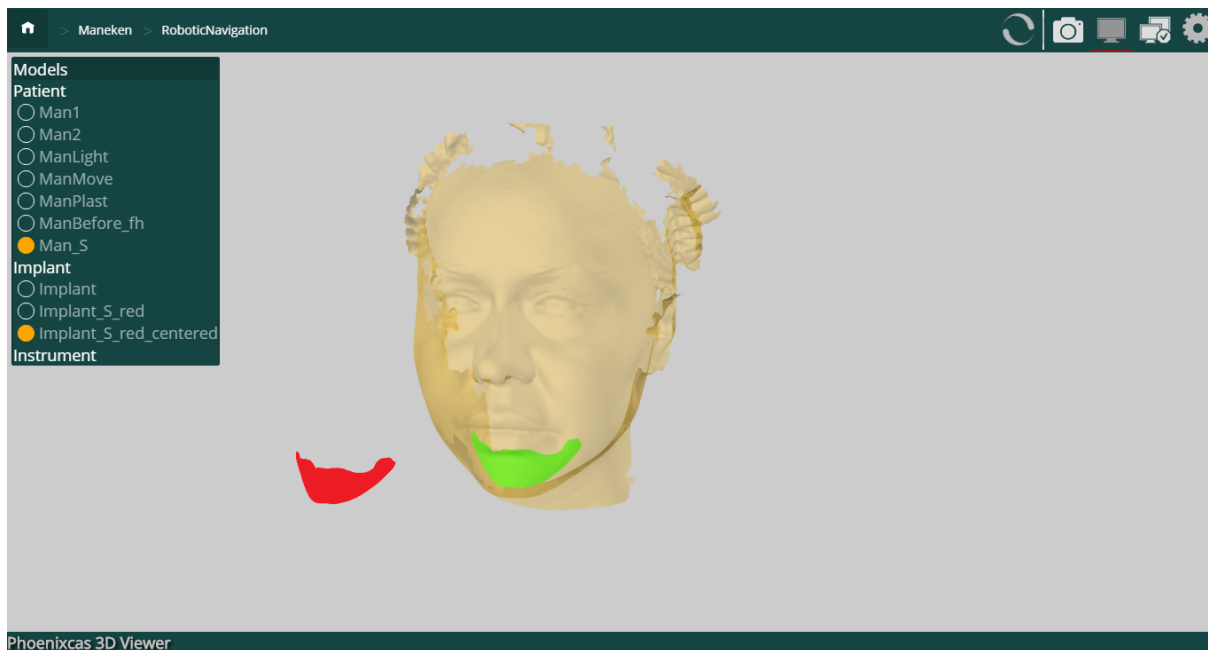


Рис. 8: Графический интерфейс модуля.

жаются в трёхмерной сцене.

Графический интерфейс модуля реализован на JavaScript и HTML. Пользователь во время работы программы может выбрать 3D-модель для пациента, импланта или инструмента. При установке импланта врачу необходимо видеть место, где имплант должен оказаться. Поэтому вместе с моделью пациента в трёхмерной сцене также размещается модель импланта зелёного цвета в месте его установки. 3D-модель, обозначающая текущее положение импланта, окрашена в красный цвет. Чтобы модели имплантов были видны, для каждой выбранной модели пациента устанавливается прозрачный материал. На рис. 8 показан графический интерфейс модуля.

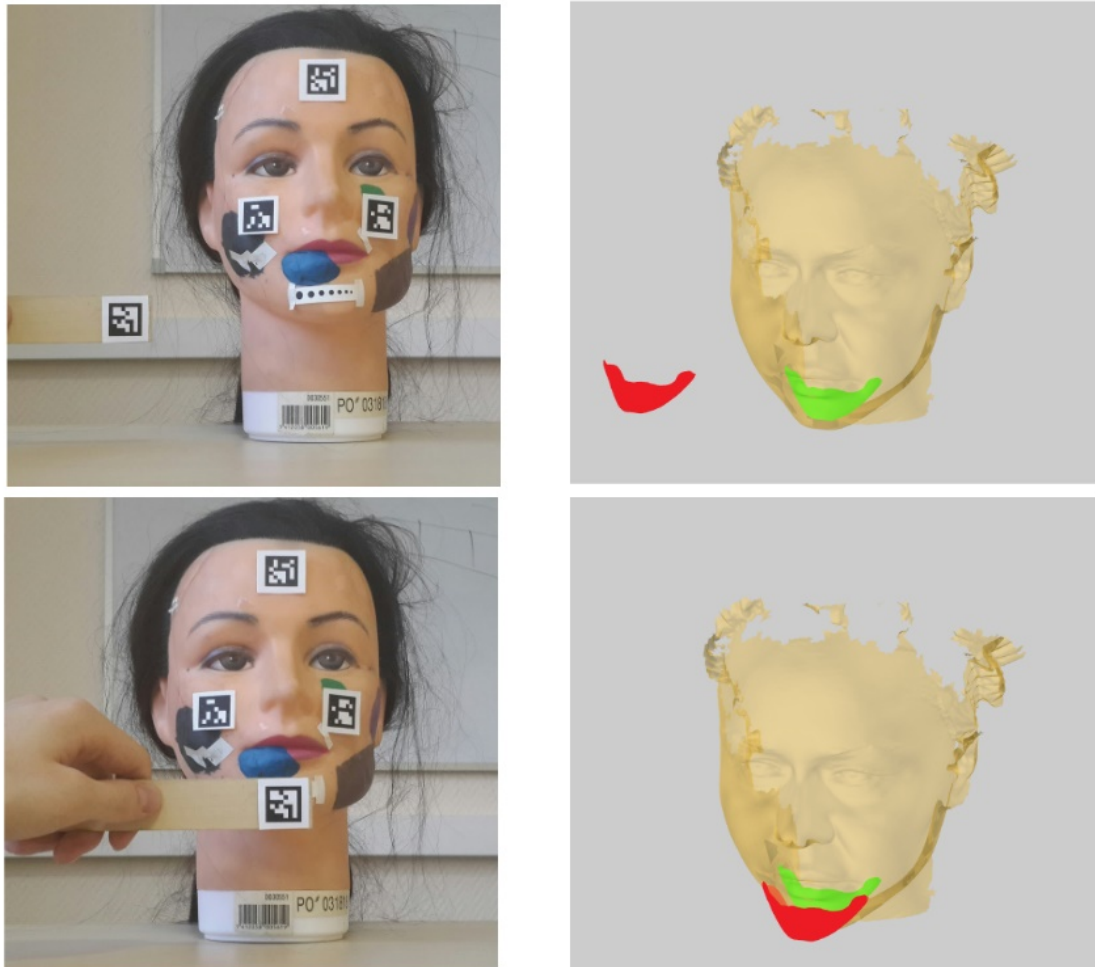


Рис. 9: Демонстрация работы системы на манекене.

## 5. Апробация

В ходе работы были проведены две демонстрации работы системы врачам. Для этого были получены 3D-модели реального пациента и импланта, на манекене смоделирована операция установки импланта нижней челюсти. На рис. 10 показана работа системы во время демонстрации.

На первой демонстрации врачи указали на слишком большой размер маркеров, а также предложили обозначить место установки импланта в трёхмерной сцене. Ко второй демонстрации были исправлены замечания, а также добавлен учёт ориентации импланта относительно пациента. На рис. 10 показаны модели в трёхмерной сцене на первой и второй демонстрациях.

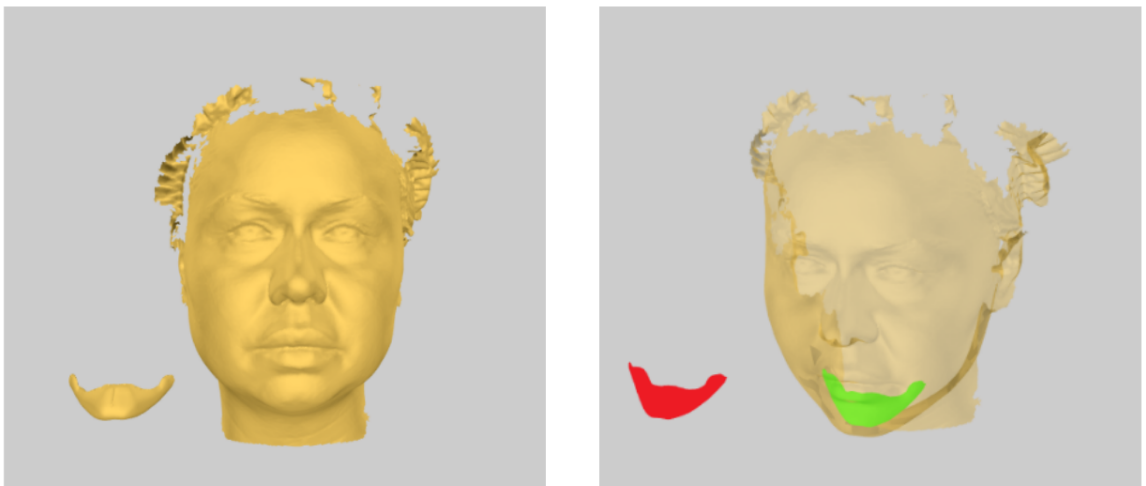


Рис. 10: Модели в трёхмерной сцене на первой демонстрации (слева) и на второй (справа).

Во время апробации на манекене врачи подтвердили актуальность решаемой задачи. В дальнейшем будут добавлены и другие маркерные технологии.

## 6. Заключение

В ходе данной работы был реализован фреймворк для разработки навигационных медицинских систем и модуль для ассистирования хирургу. Ниже результаты описаны более подробно.

- Реализован фреймворк для разработки навигационных медицинских систем на языке C++. Добавлена поддержка маркеров ArUco.
- Разработан модуль в системе Phoenixcas 3D Viewer для ассистирования хирургу и проведения малоинвазивных операций.
- Проведена апробация на манекене.

## Список литературы

- [1] ArUco library. — URL: <https://sourceforge.net/projects/aruco/>.
- [2] ArUco markers. — URL: <https://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>.
- [3] Camera Calibration and 3D Reconstruction. — URL: [https://docs.opencv.org/3.4.1/d9/d0c/group\\_\\_calib3d.html](https://docs.opencv.org/3.4.1/d9/d0c/group__calib3d.html).
- [4] Camera resectioning. — URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Camera\\_resectioning](https://en.wikipedia.org/wiki/Camera_resectioning).
- [5] Computer-assisted surgery. — URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-assisted\\_surgery](https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-assisted_surgery).
- [6] Curve image guided surgery. — URL: <https://www.brainlab.com/en/surgery-products/overview-platform-products/curve-image-guided-surgery/>.
- [7] Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming / Sergio Garrido-Jurado, Rafael Munoz-Salinas, Francisco José Madrid-Cuevas, Rafael Medina-Carnicer // Pattern Recognition. — 2016. — Vol. 51. — P. 481–491.
- [8] Leventon Michael Emmanuel. A registration, tracking, and visualization system for image-guided surgery : Ph.D. thesis / Michael Emmanuel Leventon ; Massachusetts Institute of Technology. — 1997.
- [9] Mezger Uli, Jendrewski Claudia, Bartels Michael. Navigation in surgery // Langenbeck's archives of surgery. — 2013. — Vol. 398, no. 4. — P. 501–514.
- [10] Navient. — URL: <https://www.claronav.com/navient/>.
- [11] Ogre3D. — URL: <https://www.ogre3d.org/>.

- [12] Polaris system. — URL: <https://www.ndigital.com/medical/products/polaris-family/>.
- [13] Surgical navigation systems: A technological overview / G Figueras-Benítez, L Urbano, A Acero et al. // VII International Conference on Electrical Engineering Surgical navigation systems, Technological overview corregido. — 2014.
- [14] A frameless stereotaxic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope / David W Roberts, John W Strohbehn, John F Hatch et al. // Journal of neurosurgery. — 1986. — Vol. 65, no. 4. — P. 545–549.
- [15] Менькин Сергей Александрович. Модуль расчета деформации трехмерной модели мягкой ткани моделью несжимаемого имплантата для компьютерной системы планирования хирургических операций. — Master's thesis / Менькин С. ; Санкт-Петербургский государственный университет. — 2016.