УДК 53.087.353

Технологии дополненной реальности в челюстно-лицевой хирургии: создание и позиционирование моделей

Семченков Петр Владимирович[1(*)] semchenkovpv@mail.ru
Соломашенко Артем Борисович[1] asol@bmstu.ru
SPIN-код: 2158-2998
Маркаров Арнольд Эдуардович[2] gkb36@zdrav.mos.ru
SPIN-код: 8919-9645
Мазаев Руслан Александрович[2] 89654335333@mail.ru

[1] *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

[2] *ГБУЗ «ГКБ им. Ф.И. Иноземцева ДЗМ», Москва, Россия*

Аннотация. *Технология дополненной реальности* (AR) *позволяет существенно повысить точность оперативных вмешательств и снизить риск интра- и послеоперационных осложнений. Визуализация анатомических структур в режиме реального времени обеспечивает точную навигацию инструментов и полный обзор зоны вмешательства, чего невозможно добиться с помощью традиционных методов визуализации. Рассмотрены методы создания трехмерных моделей челюстно-лицевой области, их интеграции в* AR*-среду, а также способы позиционирования виртуальных объектов в пространстве. Особое внимание уделяется вопросам регистрации и трекинга* AR*-моделей в условиях хирургического вмешательства.*

Ключевые слова: *дополненная реальность, челюстно-лицевая хирургия,* 3D*-моделирование, интраоперационная навигация*

Augmented Reality in oral surgery: 3D model development and spatial alignment

Semchenkov Petr Vladimirovich[1(*)] semchenkovpv@mail.ru
Solomashenko Artem Borisovich[1] asol@bmstu.ru
SPIN-code: 2158-2998
Markarov Arnold Eduardovich[2] gkb36@zdrav.mos.ru
SPIN-code: 8919-9645
Mazaev Ruslan Aleksandrovich[2] 89654335333@mail.ru

[1] *BMSTU, Moscow, Russia*

[2] *City Clinical Hospital named after F.I. Inozemtsev, Moscow, Russia*

Abstract. Augmented reality (AR) technology significantly improves the accuracy of surgical interventions and reduces the risk of intra- and postoperative complications. Real-time visualization of anatomical structures enables precise instrument navigation and allows dynamic monitoring of the region of interest, which is unachievable with conventional imaging methods. This article explores methods for creating 3D models of the oral region,

their integration into an AR environment, and techniques for positioning of virtual objects in space. Special attention is paid to the issues of registration and tracking of AR models in the conditions of surgical intervention.

Keywords: augmented reality, oral surgery, 3D modeling, intraoperative navigation

Введение. Технологии дополненной реальности становятся неотъемлемой частью современной хирургии, предлагая недоступные ранее инструменты для операций и методы обучения специалистов. Особый потенциал AR-систем, в частности устройств типа head-mounted displays (HMD), раскрывается в челюстно-лицевой хирургии, где требуется оперативное и точное вмешательство. Однако широкое внедрение этих технологий сдерживают два фактора: отсутствие оптимизированных алгоритмов создания 3D-моделей и необходимость совершенствования методов привязки виртуальных объектов.

В данной статье предложен комплексный подход, позволяющий реализовать потенциал AR-технологий в челюстно-лицевой хирургии. Рабочий процесс включает в себя ускоренное создание 3D-моделей на основе данных КТ/МРТ и систему точной пространственной привязки моделей к реальным тканям. За счет оптимизации подготовительного этапа такой подход не только способствует повышению точности, но и сокращает время проведения операций.

Материалы и методы. В рамках данного исследования была выбрана гарнитура дополненной реальности Microsoft HoloLens 2 (MS HL 2), которая оснащена системой пространственного позиционирования на основе камер и датчиков глубины, а также функцией трекинга взгляда оператора. Главным преимуществом гарнитуры является широкий набор инструментов для разработки специализированных медицинских приложений.

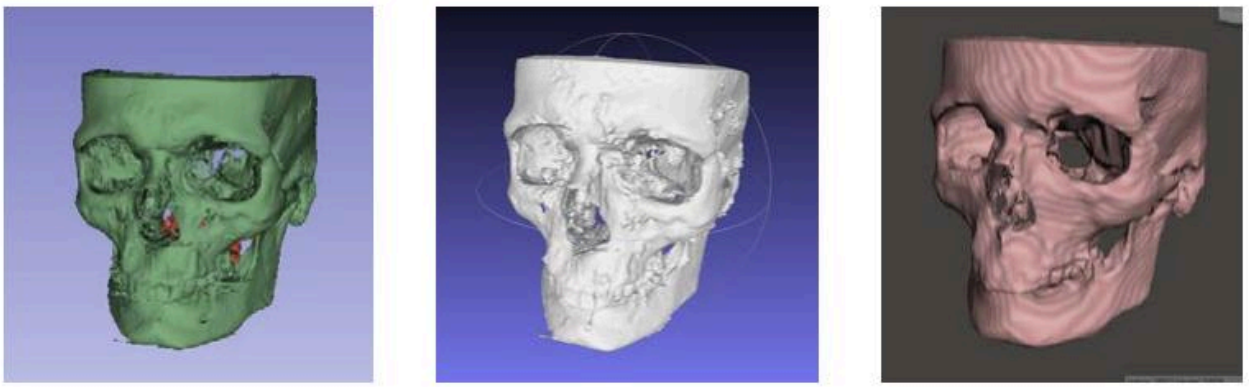
Основным этапом предоперационной подготовки для работы с AR-системами является преобразование цифровых медицинских снимков формата DICOM в трехмерную модель. Создаваемая модель должна соответствовать исходным томографическим данным, четко отображать анатомические структуры, облегчать навигацию за счет настройки прозрачности и цветового выделения отдельных областей. Кроме того, модели должны быть оптимизированы для стабильной работы в AR-среде.

Для обработки медицинских изображений был выбран программный комплекс Slicer 3D, обладающий специализированными инструментами для работы с КТ/МРТ-данными и поддержкой алгоритмов машинного обучения. На первом этапе создания 3D-моделей выполняется выделение области интереса с использованием пороговой фильтрации по интенсивности и ручной корректировки (рис. 1). Для повышения качества моделей применяются встроенные инструменты шумоподавления, восстановления целостности структур и сглаживания поверхностей (рис. 2, *а*). Особое значение имеет возможность цветового выделения отдельных анатомических образований для упрощения навигации в ходе оперативного вмешательства.



Рис. 1. Выделение зоны интереса на медицинских снимках в Slicer 3D

Финальная обработка трехмерной модели заключается в нескольких этапах оптимизации. С помощью программы MeshLab выполняется упрощение полигональной сетки (рис. 2, *б*), что значительно облегчает последующую обработку и обеспечивает плавную визуализацию в AR-гарнитуре. Для более тонкой коррекции используется MeshMixer, специальные инструменты которого позволяют устранить локальные неровности и добиться оптимального качества поверхности (рис. 2, *в*). Важно отметить, что степень соответствия конечной модели напрямую зависит от качества исходных медицинских изображений.

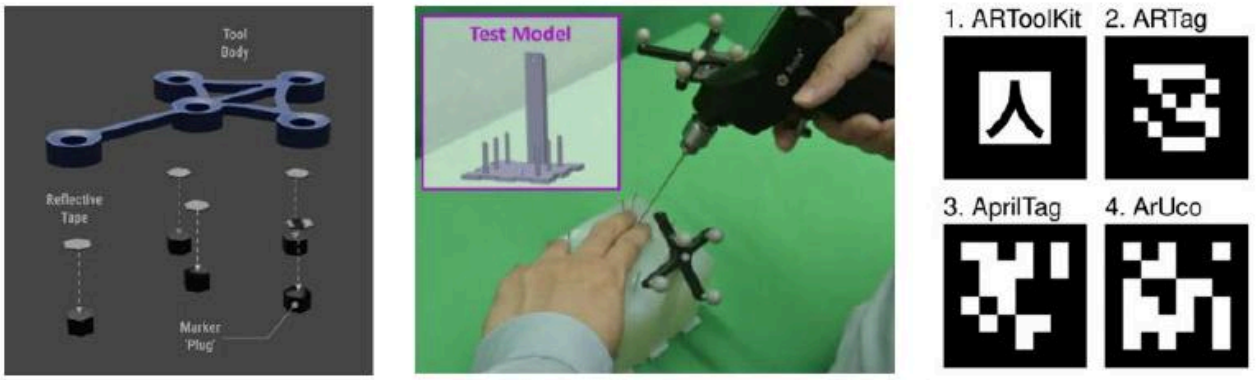


а *б* *в*

Рис. 2. Этапы обработки моделей:
а — исходная модель, полученная в Slicer 3D; *б* — оптимизированная модель; *в* —сглаженная модель

Для точной навигации в ходе хирургического вмешательства требуется надежная пространственная привязка моделей к анатомическим структурам пациента и постоянный трекинг хирургических инструментов. В современной литературе описаны два основных подхода к пространственной привязке: маркерный и безмаркерный методы. При маркерном подходе [1, 2] система распознает специальные метки, закрепленные на теле пациента, с помощью камер AR-гарнитуры, что позволяет точно совмещать виртуальные модели с анатомическими структурами. Безмаркерная технология [3] основана на алгоритмах автоматического распознавания анатомических ориентиров

и проекции модели на соответствующие структуры. Проведенный анализ показывает, что для челюстно-лицевой хирургии наиболее эффективным решением является использование маркерного метода привязки [4]. Наибольшее распространение в клинической практике получили светоотражающие элементы (рис. 3, *а*, *б*) и визуальные маркеры, включая QR-коды, AprilTags и Aruco-метки (рис. 3, *в*).



а *б* *в*

Рис. 3. Виды опорных маркеров:
а — светоотражающая лента; *б* — светоотражающие сферы; *в* — визуальные маркеры

Предложенная в этой статье методика для области челюстно-лицевой хирургии заключается в использовании набора визуальных меток, которые располагаются на лице пациента и отслеживаются встроенными в HMD камерами. Ключевой момент заключается в использовании мультимодальных маркеров — меток, которые распознаются на медицинских изображениях и камерой устройства. Конструкция такого маркера (рис. 4) представляет собой напечатанную из пластика подложку, одна сторона которой предназначена для крепления QR-кода, а другая повторяет часть лица, на которую будет производится крепление. Внутри подложки помещается рентгеноконтрастный шарик, который позволяет совместить систему координат медицинского изображения с системой координат трехмерной модели. Крепление осуществляется с помощью медицинского скотча, что достаточно жестко держит маркеры на голове пациента от этапа предоперационного планирования до окончания операции.

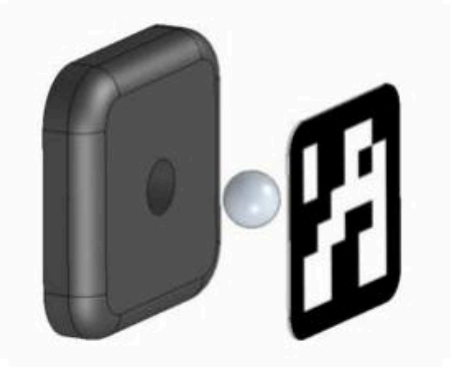


Рис. 4. Конструкция мультимодального маркера

Обсуждение полученных результатов. Предложенная методика интеграции AR-технологий в челюстно-лицевую хирургию демонстрирует значительный теоретический потенциал для улучшения хирургической практики. Разработанный подход сочетает ускоренное создание 3D-моделей на основе медицинских изображений с инновационной системой пространственной привязки, что в перспективе может существенно оптимизировать предоперационную подготовку. Особое внимание в методике уделено вопросам точного соответствия виртуальных моделей исходным томографическим данным и их стабильной визуализации в AR-среде.

Ключевым элементом системы являются мультимодальные маркеры, конструкция которых теоретически позволяет достичь точного совмещения координатных систем медицинской визуализации и дополненной реальности. Предложенное решение учитывает специфику челюстно-лицевых операций, где требуется особо точное позиционирование виртуальных моделей относительно анатомических структур. Важным преимуществом методики является ее комплексный характер, объединяющий все этапы — от обработки DICOM-изображений до финальной визуализации в гарнитуре HoloLens 2.

Заключение. Теоретический анализ предложенного подхода позволяет говорить о его перспективности для применения в челюстно-лицевой хирургии. Разработанная методика предлагает решение ключевых проблем, связанных с созданием 3D-моделей и их точной пространственной привязкой в AR-среде. Особую ценность представляет использование мультимодальных маркеров, которые потенциально могут обеспечить надежную корреляцию между медицинскими изображениями и виртуальными объектами.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальную проверку эффективности предложенных решений, включая оценку точности позиционирования и стабильности работы системы в реальных клинических условиях. Перспективным направлением развития может стать интеграция алгоритмов искусственного интеллекта для автоматизации процессов сегментации и трекинга, что позволит еще больше оптимизировать рабочий процесс хирургических вмешательств.

Список источников

[1] Лысенко А.В., Яременко А.И., Иванов В.М., Смирнов А.Ю., Любимов А.И., Izzard Ch.S.M., Прокофьева А.А. Применение навигационной системы на основе технологии дополненной реальности в челюстно-лицевой хирургии. Digital Diagnostics, 2024, т. 5, № 3, с. 450–466. https://doi.org/10.17816/DD624183

[2] Gomez A.M. et al. STTAR: surgical tool tracking using off-the-shelf augmented reality head-mounted displays. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023, vol. 99. https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3238309

[3] Ury E. et al. Markerless Augmented Reality Guidance System for Maxillofacial Surgery: An Omnidirectional Tracking Method. Health Science Reports, 2025, vol. 8, no. 3, art. no. e70518. https://doi.org/10.1002/hsr2.70518

[4] Kunz C. et al. Infrared marker tracking with the HoloLens for neurosurgical interventions. Current Directions in Biomedical Engineering. De Gruyter, 2020, vol. 6, no. 1, art. no. 20200027. https://doi.org/10.1515/cdbme-2020-0027