

УДК 681.3.016.2

Программный комплекс для количественной оценки пространственной ориентации и динамики анатомических структур на основе метода главных центральных осей инерции и итеративного алгоритма ближайших точек

Погорелый Владимир Романович¹

pogorelyyyvr@student.bmstu.ru

Текучева Светлана Владимировна²

svetlana@tekucheva.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия²ФГБУ НМИЦ «Центральный научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии» Минздрава России, Москва, Россия

Разработан программный комплекс для автоматизированного анализа медицинских изображений компьютерных томограмм в формате DICOM и трехмерных моделей челюстей. Комплекс включает два взаимодополняющих модуля: анализатор пространственной ориентации на основе расчета главных центральных осей инерции и анализатор динамических изменений трехмерных моделей. Реализация выполнена на языке Python 3.8 с использованием специализированных библиотек для обработки медицинских изображений и научных вычислений. Апробация системы на данных компьютерной томографии лицевого отдела черепа пациента с переломом мыщелкового отростка нижней челюсти подтвердила практическую эффективность.

Ключевые слова: медицинская визуализация, DICOM, биомеханический анализ, главные оси инерции, трехмерные модели, пространственные перемещения, стоматология

Введение. Современная медицинская диагностика и планирование лечения требуют точных методов количественного анализа данных медицинской визуализации [1, 2]. В ортодонтии и челюстно-лицевой хирургии успех лечения определяется точностью оценки пространственного положения костных структур [3, 4]. Существующие системы обработки DICOM-изображений (Digital Imaging and Communications in Medicine — цифровая визуализация и коммуникации в медицине) предоставляют базовый инструментарий для линейных и угловых измерений [5], но не позволяют проводить комплексный биомеханический анализ на основе интегральных характеристик. Расчет главных центральных осей инерции позволяет объективно характеризовать пространственную ориентацию анатомических структур. Целью работы является разработка программного комплекса для автоматизированного анализа пространственной ориентации и динамических изменений анатомических структур.

Для апробации системы использованы данные компьютерной томографии лицевого отдела черепа пациентки 13 лет с переломом мыщелкового отростка нижней челюсти слева. Через 2 недели после травмы возникла асимметрия лица, смещение подбородка (рис. 1). Открывание рта ограничено до 27 мм, нарушено смыкание зубных рядов.



Рис. 1. Клинические фотографии

Постановка задачи и обзор существующих подходов. *Формальная постановка задачи.* Задача анализа медицинских изображений и трехмерных моделей в стоматологии формализуется как комплексная проблема, включающая анализ пространственной ориентации на основе расчета главных центральных осей инерции и анализ динамических изменений с минимизацией расстояния между облаками точек. Математически задача может быть представлена как оптимизационная проблема по формуле

$$\min_T \sum_{i=1}^N \|T \cdot P_i(t_1) - Q_j(t_2)\|^2,$$

где T — матрица преобразования (включает поворот и смещение); $P_i(t_1)$ — i -я точка исходного облака в момент времени t_1 ; $Q_j(t_2)$ — ближайшая точка в целевом облаке в момент времени t_2 ; N — общее количество точек в облаке.

Обзор существующих подходов. Анализ современных решений в области обработки медицинских изображений для стоматологии выявляет три основных подхода с существенными ограничениями. Коммерческие системы цефалометрического анализа (например, Dolphin Imaging, OnyxCeph) ориентированы на точечные измерения между антропометрическими точками и не обеспечивают интегральный анализ геометрических характеристик [1, 5]. Ручные методы оценки пространственной ориентации обладают высокой оператор-зависимой вариабельностью и низкой воспроизводимостью [6]. Алгоритмы регистрации 3D-данных математически эффективны, но их клиническое применение ограничено отсутствием интегрированного рабочего процесса, включающего анализ и визуализацию перемещений [5, 7]. Таким образом, актуальной задачей является создание интегрированного решения, сочетающего объективный анализ ориентации на основе интегральных характеристик с автоматизированным конвейером для оценки динамики.

Предлагаемое решение. Программный комплекс реализован на языке Python 3.8 с использованием объектно-ориентированного подхода. Архитектура системы построена по модульному принципу и включает два основных компонента.

Модуль анализа пространственной ориентации. Предназначен для работы с томографическими срезами и включает подсистему загрузки и обработки DICOM-данных, модуль интерактивного выделения областей интереса,

блок расчета геометрических характеристик и систему визуализации результатов (рис. 2).

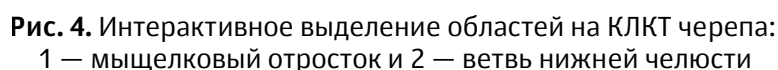
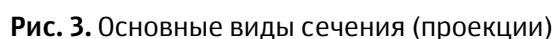
Алгоритм обработки DICOM-данных: пользователь указывает путь к директории, содержащей DICOM-файлы. Программа выполняет рекурсивный поиск всех файлов в указанной папке и ее подкаталогах. Для каждого найденного файла производится чтение и проверка наличия обязательного атрибута Pixel Array (массива пикселей, содержащего данные изображения). Если атрибут присутствует, файл добавляется в массив срезов. После обработки всех файлов выполняется сортировка срезов по координате Z пациента для правильного пространственного упорядочивания. Затем из заголовков DICOM-файлов извлекаются метаданные (пространственные характеристики, параметры визуализации). На завершающем этапе формируется трехмерный массив воксельных данных, готовый для последующего анализа.



Рис. 2. Блок-схема архитектуры программного комплекса для обработки данных компьютерной томографии

Система проекций и навигации предоставляет стандартные виды: аксиальную, сагиттальную и фронтальную проекции (рис. 3) с интуитивной навигацией.

Алгоритм навигации по проекциям начинается с выбора типа проекции (аксиальная, сагиттальная, фронтальная). Определяется текущий отображаемый срез, после чего трехмерные данные преобразуются для выбранной плоскости. Вычисляются параметры отображения (масштаб, ориентация). Срезы упорядочиваются по координате Z , после чего текущий срез выводится на экран. Алгоритм завершается обработкой команд навигации: переключением срезов и проекций. Интерактивное выделение областей представлено на рис. 4.



Расчет углов между пространственно-ориентированными областями на основе главных осей инерции: Данный этап алгоритма выполняется после определения ориентации главных осей инерции для каждой выделенной ана-

томической области. Для каждой области i известен угол θ_i ориентации главной оси I_1 . Ориентация второй главной оси I_2 вычисляется как $\theta_i + \pi/2$. Угол между одноименными осями двух различных областей i и j определяется как абсолютная разность их углов ориентации: $\Delta\theta_{ij} = |\theta_i - \theta_j|$. Для корректного представления минимального углового отклонения между осями вводится операция нормализации: $\Delta\theta_{n \text{ от } m} = \min(\Delta\theta, \pi - \Delta\theta)$. Таким образом, алгоритм позволяет количественно оценить взаимную пространственную ориентацию различных анатомических структур на основе их объективных геометрических характеристик.

Модуль анализа пространственных перемещений. Предназначен для мониторинга динамических изменений анатомических структур в процессе лечения (рис. 5). Модуль решает три основные задачи: сравнение последовательных 3D-сканов для анализа изменений положения костных структур; количественную оценку перемещений с построением полей смещений; визуализацию динамики лечения через создание тепловых карт.

Алгоритм обработки данных включает импорт и обработку 3D-моделей, регистрацию и совмещение облаков точек, расчет пространственных перемещений, генерацию тепловых карт и интерактивную визуализацию.



Рис. 5. Блок-схема архитектуры программного комплекса для анализа пространственных перемещений

Алгоритм совмещения облаков точек реализуется в два этапа: грубое и точное совмещение.

Грубое совмещение. Вычисляются геометрические центры исходного и целевого облаков точек. Определяется вектор смещения, необходимый для совмещения этих центров. Строится матрица преобразования, выполняющая данный сдвиг, которая применяется ко всем точкам исходного облака. В результате получается предварительно выровненное облако точек, центры масс которого совпадают с целевым облаком.

Точное совмещение. К предварительно выровненному облаку применяется итеративный алгоритм ближайших точек (Iterative Closest Point). На каждой итерации для каждой точки исходного облака в целевом облаке находится ближайший сосед с использованием эффективной структуры данных KD-дерево. Затем вычисляется оптимальное преобразование (поворот и сме-

щение), минимизирующее среднеквадратичное расстояние между всеми найденными парами соседних точек. Расчет результатов совмещения. Финальное преобразование получается последовательным применением грубого и точного преобразований. Итоговое, точно совмещенное облако точек вычисляется применением этой матрицы к исходным данным. Для количественной оценки перемещений для каждой точки рассчитывается евклидово расстояние до ее ближайшего соседа в целевом облаке, что формирует поле перемещений.

Результаты апробации программного комплекса. Исходный угол смещения мышелкового отростка составил $87,8^\circ$ (рис. 6). После месячного ортодонтического лечения отмечены: улучшение лицевых признаков и окклюзии (рис. 7), увеличение открывания рта до 40 мм. Контрольный КЛКТ (рис. 8) показал изменение угла до $75,5^\circ$ (табл. 1), что подтверждает положительную динамику.

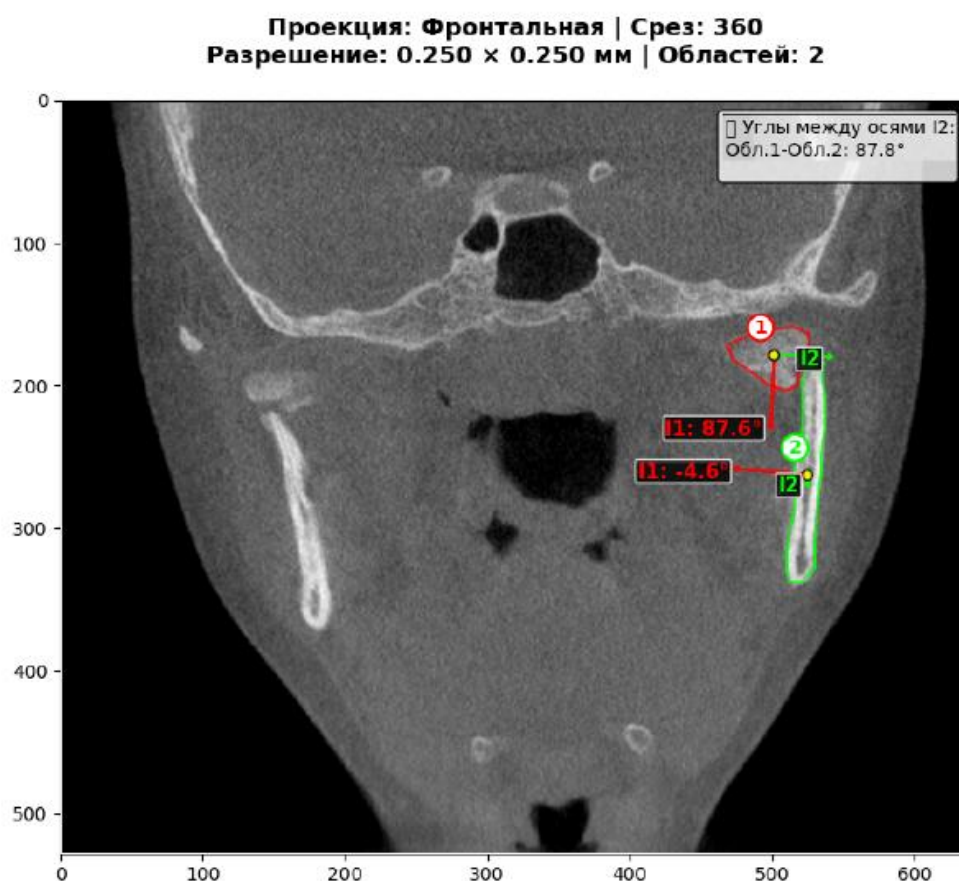


Рис. 6. Рассчитанный угол смещения мышелкового отростка относительно ветви нижней челюсти (угол между осью I2 области 1 и осью I2 области 2)

Анализ пространственных перемещений с использованием тепловой карты (рис. 9) выявил зоны максимального смещения костных фрагментов, достигавшие 4,78 мм в области мышелкового отростка. Сравнение с ручным совмещением в Materialise Mimics (рис. 10) показало сопоставимые результаты, подтверждающие достоверность методики.



Рис. 7. Клинические фотографии в динамике ортодонтического лечения

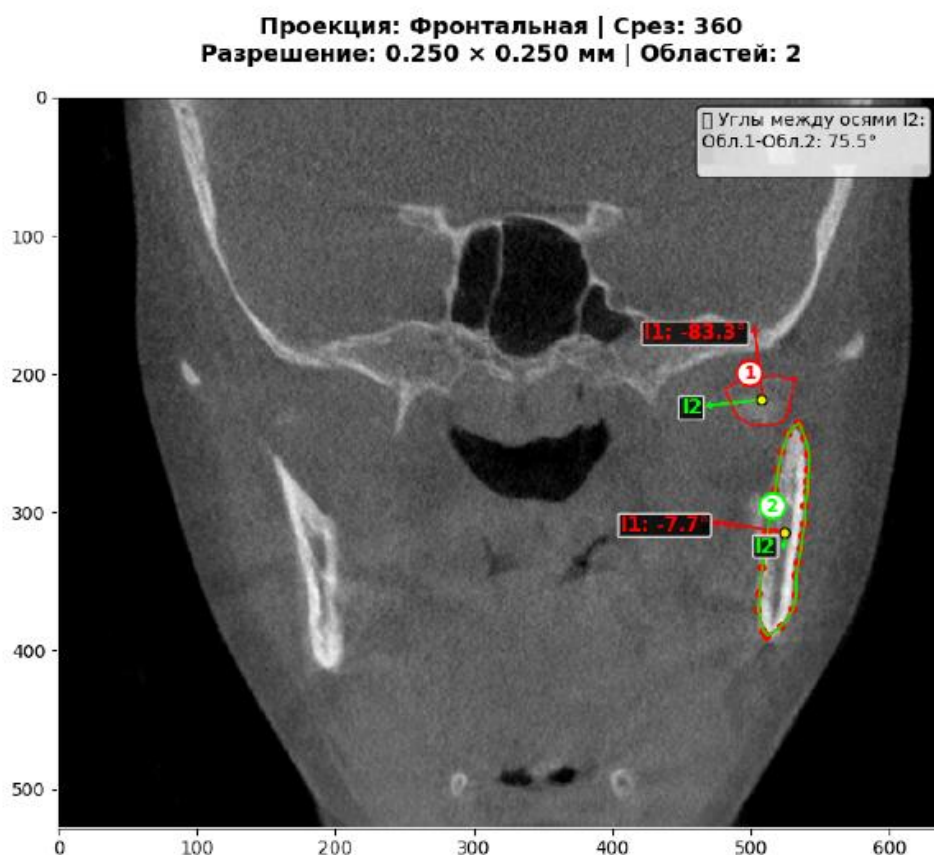


Рис. 8. Повторное КЛКТ лицевого черепа

Заключение. В работе разработан и апробирован программный комплекс для биомеханического анализа в стоматологии. Основные научные и практические результаты включают создание метода оценки пространственной ориентации анатомических структур на основе расчета главных центральных осей инерции, что обеспечило переход от субъективных точечных измерений к объективной количественной оценке интегральных геометрических характеристик. Реализован алгоритм анализа динамических изменений, основанный на двухэтапной регистрации облаков точек с использованием грубого совмещения по центрам масс и точного совмещения по итеративному алгоритму ближайших точек, а также последующем расчете поля перемещений.

Таблица 1

Результаты количественного анализа на КЛКТ лицевого отдела черепа

Этап лечения	Анатомическая область	Площадь области, мм ²	Угол ориентации и главной оси (П1), град	Угол между областями, град	Динамика изменения угла между областями, град
До лечения	Мышелковый отросток	85,2	87,6	83	12,3
	Ветвь нижней челюсти	210,8	4,6		
В динамике (через 1 месяц)	Мышелковый отросток	83,2	83,3	75,5	
	Ветвь нижней челюсти	219,8	7,7		

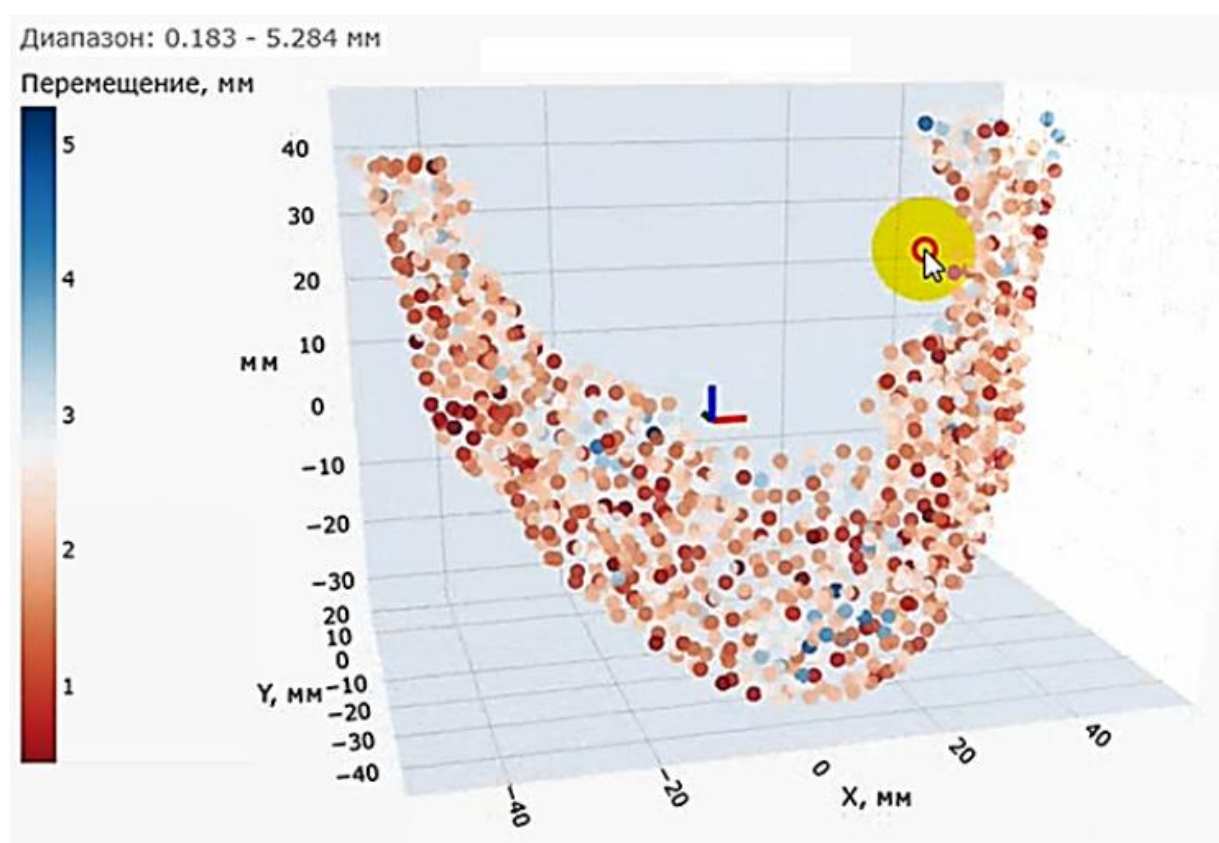


Рис. 9. Тепловая карта перемещений точек для модели «до лечения»

Апробация комплекса на клиническом случае перелома мышелкового отростка нижней челюсти подтвердила его практическую эффективность. Комплекс позволил количественно зафиксировать исходную пространственную диспропорцию (угол смещения $87,8^\circ$) и оценить положительную динамику

в результате ортодонтического лечения (снижение угла до $75,5^\circ$). Анализ поля перемещений выявил зоны максимальной костной репозиции с величинами до 4,78 мм. Проведенная валидация путем сравнения с ручным совмещением в профессиональном программном пакете Materialise Mimics показала сопоставимость результатов, что свидетельствует о достоверности разработанных алгоритмов.

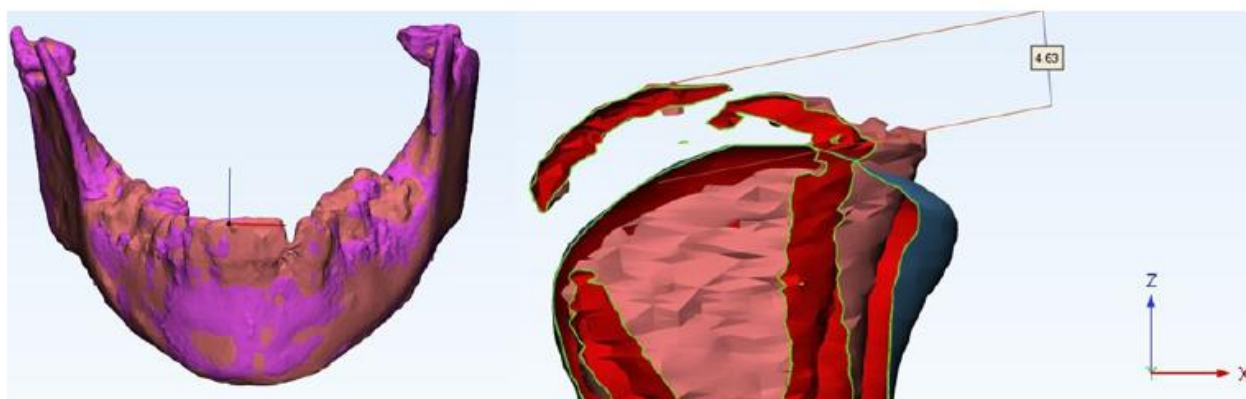


Рис. 10. Ручное совмещение двух поверхностных моделей нижней челюсти «до» и «после» лечения в программном комплексе Materialise Mimics

Достоинства и недостатки разработанного программного комплекса. К достоинствам предложенного решения следует отнести его кроссплатформенность, достигнутую за счет реализации на языке Python и использования открытых библиотек, что обеспечивает работу в различных операционных средах. Открытая модульная архитектура комплекса позволяет гибко расширять его функционал и адаптировать под конкретные исследовательские или клинические потребности. Важным преимуществом является прямая ориентация на решение актуальных клинических задач в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии, не полностью покрываемых существующим коммерческим программным обеспечением. Основными недостатками разработанного комплекса являются зависимость точности анализа пространственной ориентации от качества ручного выделения областей интереса на томографических срезах, что вносит оператор-зависимый фактор. Кроме того, текущая реализация требует предварительной подготовки 3D-моделей из DICOM-данных во внешних программных пакетах, что усложняет рабочий процесс и создает дополнительные этапы обработки. Перспективные направления развития работы включают: реализацию встроенного модуля для конвертации DICOM в 3D-модели, что позволит создать сквозной рабочий процесс внутри самого комплекса; добавление функции интерактивного выбора реперной (неизменной) области для «наглядного» и более точного совмещения облаков точек при анализе динамики, что повысит удобство работы для врача.

Литература

- [1] Тверье В.М., Никитин В.Н. Уточнение прикуса на основе биомеханического моделирования. *Российский журнал биомеханики*, 2017, т. 21, № 1, с. 41–50.
- [2] Дьяченко Д.Ю., Венскель Е.В. Клиническая анатомия жевательных мышц с позиции кинематики и динамики нижней челюсти. *Волгоградский научно-медицинский журнал*, 2022, т. 19, № 3, с. 11–16.
- [3] Старикова Н.В., Бабаев Д.Я. Создание условий скелетного вытяжения при переломе мыщелкового отростка нижней челюсти у детей и подростков. *Стоматология*, 2020, т. 6, № 2, с. 33–37.
- [4] Епифанов С.А., Балин В.Н. Компьютерные технологии в реконструктивной хирургии средней зоны лица. *Вестник национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова*, 2014, т. 9, № 4, с. 28–32.
- [5] Крючкова Т.Н., Ефимов А.И. Совмещение трехмерных облаков точек. Итеративный алгоритм ближайших точек. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2023, № 11, с. 203–209.
- [6] *Iterative Closest Point (ICP) Algorithm in Python*. URL: https://github.com/iitaakash/icp_python (accessed 21.09.2025).
- [7] Чибрикова П.В., Лосев Ф.Ф. Биомеханическое обоснование ортодонтического лечения с применением компьютерного моделирования. *Российский вестник детской стоматологии*, 2023, т. 16, № 1, с. 45–52.
- [8] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 542 с.

Software complex for quantitative assessment of spatial orientation and dynamics of anatomical structures based on the method of principal central axes of inertia and the iterative closest point algorithm

Pogorely Vladimir Romanovich¹

pogorelyyyvr@student.bmstu.ru

Tekucheva Svetlana Vladimirovna²

svetlana@tekucheva.ru

¹ BMSTU, Moscow, Russia

² Medical Research Center for Central Institute of Dentistry and Maxillofacial Surgery, Moscow, Russia

A software complex for automated analysis of DICOM images and 3D jaw models has been developed. It features two complementary modules: a spatial orientation analyzer based on principal central axes of inertia calculation, and a dynamic changes analyzer for 3D models. Implemented in Python 3.8 using specialized medical imaging and scientific computing libraries, the system enables quantitative assessment of spatial orientation, angle calculations between anatomical areas, tissue displacement analysis, and interactive visualization. The approach provides objective evaluation of anatomical structures' spatial position, crucial for treatment planning. Validation on CT data of a patient with mandibular condylar process fracture confirmed system effectiveness.

Keywords: *medical imaging, DICOM, biomechanical analysis, principal axes of inertia, three-dimensional models, spatial displacements, dentistry*