

УДК 004.6:616-073.756.8:004.896

Метод навигации медицинского робота на основе денситометрических данных костных тканей для проведения операций по транспедикулярной фиксации

Ю.Н. Куликов^{1,2}, А.А. Воротников^{1,2}, А.А. Гринь^{1,3}, О.В. Левченко¹

¹ НИИ «ТЕХНОБИОМЕД» ФГБОУ ВО «Российский Университет Медицины» Минздрава России»

² ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

³ НИИ СП им. Н.В. Склифосовского

Navigation method based on densitometric data of bone tissue for transpedicular fixation with the medical robot

Y.N. Kulikov^{1,2}, A.A. Vorotnikov^{1,2}, A.A. Grin^{1,3}, O.V. Levchenko¹

¹ Medical-Robotic Digital Systems of the Research Institute TECHNOBIOMED at the FSBEI HE ROSUNIMED of MOH of Russia

² MSTU STANKIN

³ Moscow City Health Department, Head of the Science Department at the Sklifosovsky

Предложен новый метод навигации медицинского робота на основе денситометрических данных костных тканей для проведения операций по транспедикулярной фиксации. Современные медицинские роботы предоставляют хирургу возможность планировать операции, основываясь только на данных о геометрических параметрах костных тканей и транспедикулярных винтов, и их визуализации. Предлагаемый метод позволяет проводить анализ плотности тканей, которые будут затронуты медицинским роботом при планировании маршрута. Благодаря этому появляется возможность построить такой маршрут ввода инструмента, который не приведет к повреждению структуры костей и не затронет критические ткани. Составлены объемный геометрический примитив цилиндра для планирования маршрута и программное обеспечение для визуализации. Проведено экспериментальное исследование по планированию маршрута ввода транспедикулярного винта, установленного на рабочем органе медицинского робота, с использованием компьютерной томографии пациента. Выполнено сравнение метода навигации медицинского робота на базе денситометрических данных костных тканей с методами, основанными на геометрических параметрах костных тканей и параметрах винтов. В результате удалось увеличить среднюю плотность затронутых спланированным маршрутом тканей, что впоследствии должно привести к повышению стабилизации транспедикулярного винта при эксплуатации.

EDN: CRRSYO, <https://elibrary/crrsyo>

Ключевые слова: навигация медицинского робота, транспедикулярная фиксация, компьютерная томография, денситометрические данные

This paper presents a new navigation method based on densitometric data of bone tissue for transpedicular fixation with the medical robot. Modern medical robots provide the surgeon with the opportunity to plan operations based only on data on the geometric parameters of bone tissue and screws, and their visualization. The presented method involves analyzing the density of tissues that will be affected by the medical robot when planning a route. Due

to this, it becomes possible to build an input route that will not damage the bone structure and will not affect critical tissues. A volumetric geometric primitive of a cylinder for route planning and visualization software were compiled. Experimental studies have been conducted on planning the input route of a transpedicular screw installed on the working element of a medical robot in a volumetric voxel model of the patient's body, based on computed tomography data from a patient. The presented method of navigation of a medical robot based on densitometric data of bone tissue for performing transpedicular fixation operations was compared with methods based on geometric parameters of bone tissue and screw parameters. As a result, it was possible to increase the average density of tissues affected by the planned route, which should lead to increased stabilization of the transpedicular screw during exploitation.

EDN: CRRSYO, <https://elibrary/crrsyo>

Keywords: medical robots navigation, transpedicular fixation, computed tomography, densitometric data

Транспедикулярная фиксация — нейрохирургическая операция, направленная на фиксацию ряда позвонков между собой для стабилизации позвоночника. Для установки транспедикулярной системы используют транспедикулярные винты (ТПВ), имплантируемые через ножки в тело позвонка. Маршрут ввода винтов хирург планирует заранее до операции в соответствии с анатомическими особенностями пациента.

Процесс установки ТПВ содержит три основных этапа: пробитие плотной кортикоиды в точке входа ТПВ, формирование резьбы метчиком в педикуле позвонка и установку ТПВ. Два последних этапа требуют высокой точности, так как любые отклонения от спланированного маршрута могут привести к повреждениям анатомических структур. По этой причине огромную популярность приобрели медицинские роботы (МР) [1].

В настоящее время существует много методов навигации МР, основанных на данных, получаемых из внешней среды или внутренней сенсорной системы [2]. В МР при проведении хирургических операций применяются методы [4], базирующиеся на использовании интраоперационных стереофотограмметрических систем (систем стереовидения) [3], интраоперационных рентгенологических исследований (С-дуги), интраоперационных компьютерных томографий (КТ) (О-дуги) и систем определения положения на основе магнитных явлений.

На сегодняшний день при проведении робот-ассистированной операции навигацией МР управляет хирург вручную на основе интраоперационных изображений рабочей области. В помощь хирургам приходит предоставляемое вместе с МР программное обеспечение для визуализации данных, дополнительных построе-

ний геометрических размеров, геометрических расчетов реальных размеров и сегментации.

В области транспедикулярной фиксации хирургу необходимо локализовать ТПВ вдоль линии центра педикулы позвонка [5] для дальнейшей навигации МР. Хирург должен построить маршрут, который не вызовет осложнений и не приведет к повреждениям костных структур. Важно учитывать близость спинного мозга и сосудов. Ошибка при планировании может привести к серьезным послеоперационным осложнениям [6].

При выполнении транспедикулярной фиксации основным источником данных для хирурга служит КТ [7]. КТ строятся из набора вокселей, являющихся денситометрическими данными, из которых можно получить денситометрические параметры, используемые для анализа костных тканей. Денситометрические параметры помогают классифицировать ткани в теле пациента [8, 9].

Цель статьи — разработка метода навигации МР на основе денситометрических данных костных тканей для проведения операций по транспедикулярной фиксации, позволяющего повысить стабильность ТПВ при эксплуатации.

Обзор современных МР для проведения операций по транспедикулярной фиксации позвоночного столба. К 1990-м годам технологии КТ значительно улучшились, стали точнее нацеливаться на анатомические структуры, повысилось общее качество изображений [10].

Хирургические системы с компьютерным ассистированием (Computer Assisted Surgery — CAS) начали применяться в конце 1980-х годов для стереотаксических операций в нейрохирургии. Основной целью таких систем является

точное введение и позиционирование инструментов в череп без прямого доступа к операционному полю. Эти системы значительно повышают точность хирургических вмешательств, снижают риск осложнений, связанных с инвазивными методами, уменьшают дозу рентгеновского облучения и позволяют проводить более щадящие операции [11].

Основной принцип CAS заключается в совмещении положения инструментов в реальном времени с их положением на предоперационных изображениях (КТ, магнитно-резонансная томография) или интраоперационных рентгеновских снимках.

Подобные системы дали толчок к развитию МР, которые используют полученные при предоперационном планировании или интраоперационные данные.

Одним из инновационных типов стали МР костной фиксации [12]. Такие роботы имеют небольшие размеры и фактически служат вспомогательным инструментом для хирурга при проведении транспедикулярной фиксации. В дальнейшем специалисты решили переходить от узконаправленных МР к более универсальным решениям, таким как роботы-манипуляторы.

Медицинский робот ROSA Spine предназначен для помощи хирургу в проведении минимально инвазивных операций на позвоночнике, в частности при установке ТПВ. [13]. Основное назначение этого робота — обеспечение высокой точности при установке ТПВ благодаря встроенной системе слежения [14]. Планирование маршрута ввода ТПВ является основным этапом в роботизированной хирургии позвоночника. Этот процесс проводится на рабочей станции МР и базируется на пред- или интраоперационных КТ-данных пациента. На основе 3D-изображений хирург определяет трехмерный маршрут для каждого ТПВ. Планирование включает в себя выбор точки входа ТПВ, его направления и, при необходимости, определение парамедианного продольного кожного разреза для малоинвазивного доступа.

Следует отметить, что планирование маршрута ввода ТПВ происходит путем анализа визуализированных костных тканей, но не денситометрических параметров. Определяется лишь точка входа, направление и общее местоположение ТПВ. Основной задачей планирования становится выбор такого маршрута, который

бы избегал таких критических структур, как нервы или сосуды.

Медицинский робот ExcelsiusGPS представляет собой роботизированную платформу, разработанную для повышения безопасности и точности операций на позвоночнике, особенно при установке ТПВ. МР объединяет в себе жесткий роботизированный манипулятор и полноценные навигационные возможности [15]. Перед операцией хирурги получают предоперационные изображения КТ, или используют интраоперационную КТ, или рентгенограмму. На костном каркасе позвоночника и операционном поле устанавливаются референтные маркеры, которые совмещаются с изображениями. Маршрут введения ТПВ планируется в программном обеспечении, привязанном к МР, что позволяет изменять размеры ТПВ и точки входа.

Программное обеспечение обеспечивает визуализацию анатомии и положения инструментов в реальном времени на протяжении всей процедуры. Планирование маршрута ввода ТПВ и его геометрических размеров происходит на основе визуализации полученных КТ-данных пациента. Программное обеспечение МР позволяет исследовать анатомию пациента, что помогает хирургу в принятии решений. На основе полученных КТ-данных хирург выставляет маршрут, по которому МР будет проводить манипуляции. По оценкам разных авторов, точность локализации ТПВ достигает 96,3 % [16].

Даже при условии точной локализации ТПВ в костных тканях пациента, хирург не получает информации о денситометрических параметрах тканей, в которых он расположен. По этой причине ТПВ может попасть в ткани с малой плотностью, что приведет к низкой стабилизации ТПВ в педикулах позвонков, появлению зазоров между костной тканью и ТПВ при эксплуатации системы.

Медицинский робот BraiLab Cirq помогает хирургам при проведении различных нейрохирургических операций, в частности по транспедикулярной фиксации. Особенностью такого робота является то, что он имеет меньшие габаритные размеры, чем его аналоги. Рабочий процесс с МР BraiLab Cirq обычно включает в себя предоперационное планирование винтовых маршрутов с использованием КТ и навигационного программного обеспечения.

С помощью специализированного программного обеспечения, установленного на рабочей станции или персональном компьютере хирурга, выполняют виртуальное планирование по предоперационной КТ пациента. В рамках этого планирования определяют наилучший маршрут, диаметр и длину ТПВ с использованием информации о физических размерах позвонка и границах костных тканей. Точность установки ТПВ в дальнейшем оценивают путем сравнения фактической локализации ТПВ (на после- или интраоперационной КТ) с запланированным маршрутом (на предоперационном КТ). Точность локализации ТПВ отмечена как важный фактор, влияющий на общий результат процедуры [17].

Таким образом, можно заключить, что при работе с MR BraiLab Cirq для планирования операции хирургу предлагается только визуальная информация о тканях пациента, но не происходит анализа денситометрических параметров тканей, с которыми будет взаимодействовать МР.

По результатам изучения МР для проведения нейрохирургических операций на позвоночнике установлено, что все они оснащены программным обеспечением планирования операций, основанным на визуализации геометрических размеров как костных тканей, так ТПВ. Другими словами, управление такими системами происходит по положению. При этом маршрут ввода ТПВ, который будет исполнять МР, строится без учета денситометрических данных.

Основным достоинством использования денситометрических данных является возможность планирования маршрута не только строго вдоль педикулы, а с некоторым отклонением, чтобы резьба ТПВ попадала в более плотные ткани, а его стержень находился в более мягких тканях и не повреждал их. Положение ТПВ,

локализованного по геометрическим параметрам, показано на рис. 1, а. Видно, что ТПВ проходит через центр педикулы и не касается плотных костных тканей (кортикоиды). Безусловно, такой результат получается не всегда из-за анатомических особенностей каждого пациента, но данный метод является общепринятым и самым распространенным.

Предлагаемый метод навигации МР на основе денситометрических данных костных тканей позволит локализовать ТПС так, что резьба будет зацепляться за плотные костные ткани [18], а стержень не будет их повреждать. В этом случае хирургу необходимо минимизировать зацепление сердечника за плотные костные структуры и максимизировать зацепление резьбы за эти плотные структуры, полностью исключив выход ТПВ за область позвонка.

Положение ТПВ, локализованного на основе денситометрических данных костных тканей, показано на рис. 1, б, где зеленым цветом помечены области зацепления резьбы за плотные кортикоидные ткани. Таким образом, можно повысить стабилизацию ТПВ в педикулах позвонков при эксплуатации путем установки ТПВ около более жестких тканей, что повлияет на качество жизни пациента [19].

Разработка объемного геометрического примитива для планирования маршрута ввода ТПВ с использованием МР. Исходя из функциональных особенностей программного обеспечения рассмотренных МР принято решение о необходимости создания программного обеспечения, позволяющего проводить локализацию ТПВ, планирование маршрута и навигацию МР на основе денситометрических данных костных тканей.

Программное обеспечение должно включать в себя визуализацию объемных КТ-данных па-

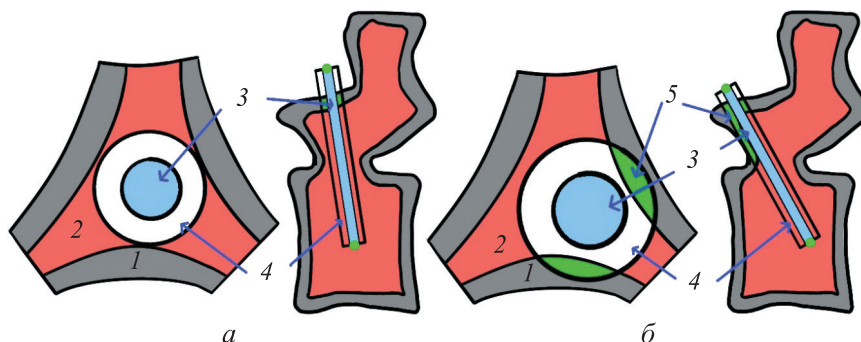


Рис. 1. Схемы локализации ТПС по положению (а) и на основе денситометрических данных (б): 1 — кортикоид; 2 — педикула; 3 — стержень ТПС; 4 — резьба; 5 — область зацепления за кортикоид

циента, функции для сбора денситометрических данных и оценки денситометрических параметров костных тканей. Алгоритм, заложенный в программное обеспечение, должен нативно встраиваться в рабочие процессы взаимодействия с МР, для чего необходим объемный геометрический примитив цилиндра, который является математической моделью ТПВ. Геометрический примитив описывает пространственное положение и ориентацию рабочего органа МР в пространстве и позволяет работать с денситометрическими данными костных тканей.

Объемный геометрический примитив цилиндра локализован в пространстве благодаря двум точкам, так как планируемый маршрут линейен (точка ввода ТПВ и точка, задающая его направление). Для получения матрицы трансформации использован метод LookAt [20], благодаря которому можно создать матрицу для трансформации мировых координат в локальные координаты. Этот метод позволяет описывать положение камер в пространстве: зная точки, куда надо смотреть и откуда смотрят, можно получить универсальную матрицу преобразования [21].

Трехмерная ориентированная координатная сетка, формируемая для сбора денситометрических данных, собирает значения исходных КТ-данных в геометрический примитив цилиндра. Последний будет использован для анализа денситометрических параметров костных тканей, попавших на маршрут. Формирование трехмерной сетки происходит путем последовательного сдвига координат в плоскости XY с переходом на следующий слой вдоль оси Z . Попадание вокселя в математическую модель определяется заданным радиусом ТПВ.

Для работы с трехмерным пространством применяется трехлинейная интерполяция, расширение обычной линейной интерполяции в трехмерном пространстве. Результатом интерполяции является значение денситометрической плотности в искомой точке в пространстве.

Путем сбора данных по планируемому маршруту получают два заполненных геометрических примитива цилиндра, описывающих резбь ТПВ и стержень, как показано на рис. 2, б и в соответственно. Каждый геометрический примитив цилиндра можно использовать отдельно или в совокупности для получения информации о денситометрических параметрах, которые будут задействованы при вводе ТПВ роботом по запланированному маршруту. Схематичное изображение данных, собранных объемным геометрическим примитивом, показано на рис. 2, а. Фактически получают набор срезованных в пространстве вокселей.

Основной способ анализа денситометрических данных — изучение плотности тканей, попавших в объемный геометрический примитив, и получение денситометрических параметров, для чего создается множество срезов вдоль локальной оси Z , данные в каждом из которых усредняются. По усредненным значениям строят графики, как показано на рис. 3, объединяя данные по резбь и ТПВ в один набор.

Среднее значение денситометрического параметра среза тканей в геометрическом примитиве определяется выражением

$$\overline{HU}_k = \left(\frac{1}{N_i N_j} \right) \sum_{i=0}^{N_i} \sum_{j=0}^{N_j} HU_{ijk},$$

где N_i и N_j — количество вокселей в срезе по оси X и Y соответственно; HU_{ijk} — измеренная плотность тканей в искомой координате.

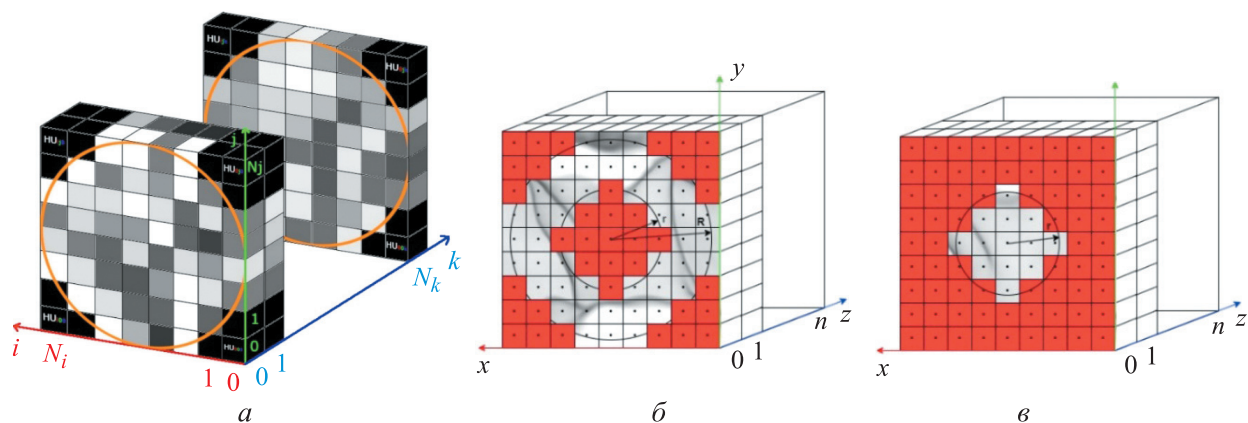


Рис. 2. Модели срезов денситометрических данных в геометрическом примитиве цилиндра

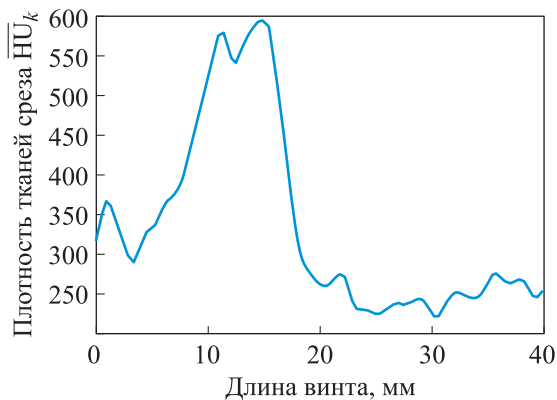


Рис. 3. Распределение средней плотности костных тканей среза HU_k по резьбе и ТПВ, попавших на маршрут

Для построения графиков индексы пересчитываются в расстояние следующим образом:

$$l_k = \frac{k}{N_k - 1} \nu Size,$$

где l_k — значение длины в определенном индексе; $\nu Size$ — минимальное значение размера вокселя; N_k — количество вокселей в срезе по оси Z .

Изменение степени зацепления оценивают по маршрутам, локализованным в пространстве позвонка, методом геометрического анализа и предлагаемым методом на основе денситометрических данных. По данным, собранным по двум маршрутам, можно получить денситометрические параметры и сопоставить их между собой. После чего определяют денситометрический параметр изменения степени зацепления

$$P = \frac{HU_{1k} - HU_{2k}}{HU_{2k}} \cdot 100, \%,$$

где HU_{1k} и HU_{2k} — средние значения денситометрических параметров среза по первому и второму маршрутам.

Разработка алгоритма планирования маршрута ввода ТПВ с использованием МР на базе денситометрических данных тканей позвонков. Предлагаемый метод является шагом верификации маршрута, который планирует хирург при проведении нейрохирургической операции. Планирование маршрута включает в себя выставление положения точки ввода инструмента, выставление положения точки направления инструмента и задание геометрических размеров вводимых инструментов. Зачастую геометрические размеры являются таб-

личными значениями, предоставляемыми производителем инструментов и транспедикулярных систем.

Алгоритм навигации МР на основе денситометрических данных включает в себя следующие шаги:

- 1) начало;
- 2) получение и загрузка объемных воксельных данных пациента;
- 3) планирование маршрута ввода инструмента:
 - выставление положения точки начала маршрута;
 - выставление положения точки направления маршрута;
 - задание параметров ТПВ (длина и диаметр);
- 4) верификация плана маршрута в локальном пространстве координат позвонка:
 - получение денситометрических данных из КТ пациента;
 - оценка денситометрических параметров костных тканей, попавших на маршрут;
 - проверка денситометрического параметра степени зацепления за кортикоиду; если степень мала, то повтор п. 3;
 - проверка мальпозиции ТПВ [22], если мальпозиция присутствует, то повтор п. 3;
- 5) локализация положения позвонка пациента относительно локальной системы координат;
- 6) локализация положения основания МР относительно локальной системы координат;
- 7) пересчет маршрута в пространство координат МР;
- 8) верификация плана маршрута относительно основания МР;
- 9) отправка плана движения на МР;
- 10) конец.

Будем рассматривать только п. 3 и 4 алгоритма, так как остальные шаги совпадают с общей концепцией работы МР при проведении хирургических операций.

Экспериментальное исследование по определению планируемого маршрута ввода ТПВ с использованием МР. При экспериментальном исследовании использованы анонимизированные данные пациентов, которые загружали в созданную среду (прототип программного обеспечения) для анализа, где пользователь должен выставить положение двух точек в пространстве позвонков. Экспериментальное

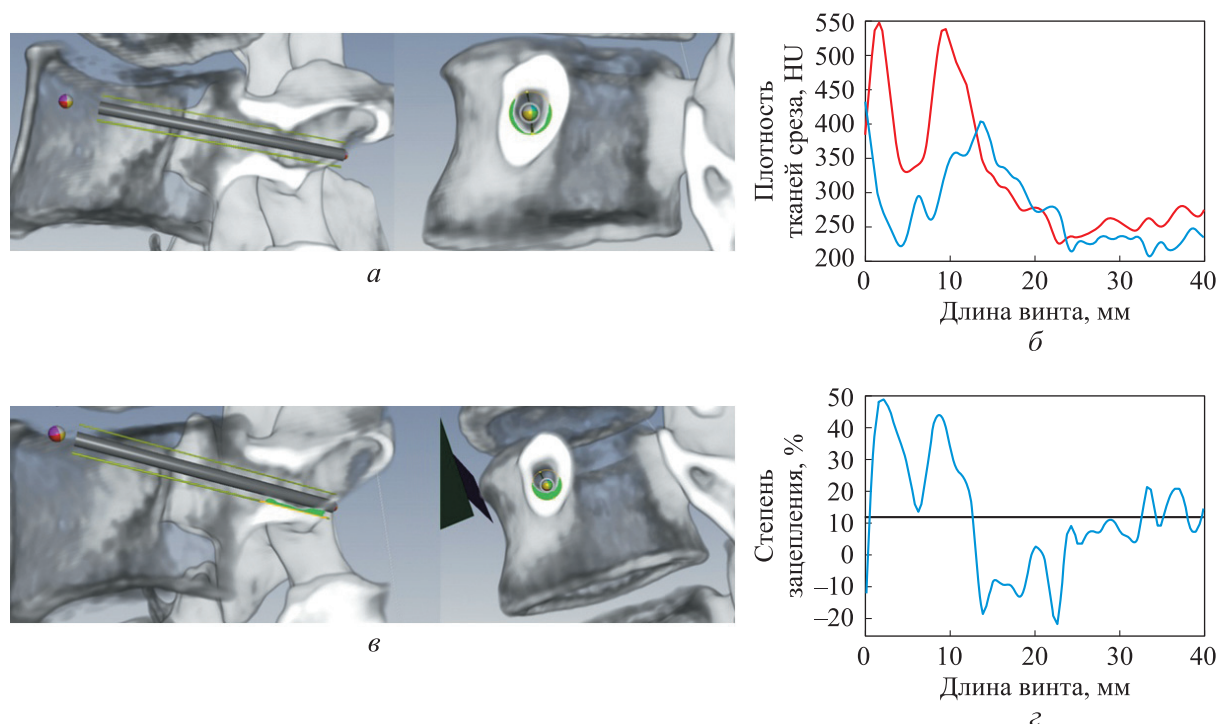


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования:
 а и б — маршруты составленные первым и вторым методами навигации;
 б — зависимости плотности тканей от длины ТПВ, полученные по первому (—) и второму (—) методам навигации; г — распределение степени зацепления по длине ТПВ

исследование выполнено для сравнения методов навигации МР при проведении транспедикулярной фиксации на основе геометрических параметров [23] и денситометрических данных. Типовые положения ТПВ для второго метода взяты из исследований по установке ТПВ строго в кортикоиду [24].

Прототип программного обеспечения не строит маршрут движения МР автоматически, но предлагает хирургу средства оценки, помогающие принять решение при выборе наиболее желаемого маршрута движения в костных тканях, улучшив устойчивость ТПВ.

Исходя из предложенного алгоритма, планирование маршрута является методом подбора корректного положения по денситометрическим параметрам, который может вестись итеративно. Хирург получает возможность анализировать денситометрические параметры костных тканей в теле позвонков и на основании полученной информации корректировать маршрут.

В ходе эксперимента изменялось только положение точек ввода и направления ТПВ, параметры ТПВ оставались постоянными. То есть менялись только пространственное положение и ориентация объемного геометрического при-

митива, но не его длина и диаметр. Для сбора значений не было разделения на резьбу и стержень ТПВ, геометрические примитивы цилиндра использованы вместе для получения денситометрических параметров.

Для эксперимента выбрано КТ поясничной области 61-летнего мужчины. Рассмотрен позвонок L1 без ТПВ и повреждений, в котором достаточно пространства для локализации ТПВ вдоль педикулы с минимальным зацеплением за плотные кортикоидные ткани. Маршрут, составленный первым методом навигации, показан на рис. 4, а, где зеленым цветом помечены области зацепления резьбы за кортикоиду. Педикула имеет нестандартную форму, что приводит к необходимости сильно поднимать кончик ТПВ относительно центра позвонка. При таком положении удастся локализовать ТПВ максимально по центру педикулы.

Если же использовать второй метод навигации, то можно добиться такого маршрута, при котором ТПВ будет зацепляться резьбой за большую часть кортикоида, что приведет к улучшению стабилизации. Маршрут, составленный вторым методом навигации, показан на рис. 4, б. Видно, что зеленых областей зацепления за кортикоиду стало намного боль-

ше, чем при использовании первого метода навигации.

Анализ графиков, приведенных на рис. 4, в, показывает, какие значения попали в объемный геометрический примитив цилиндра при первом и втором методах навигации. На участке 13...24 мм плотность тканей для первого маршрута выше, чем для второго. Значения в начале объемного геометрического примитива различаются на 100...250 HU.

Распределение степени зацепления объемного геометрического примитива цилиндра за плотные кортикоидные ткани по длине ТПВ приведено на рис. 4, г. Видно, что не все значения указывают на увеличение степени зацепления, так как присутствуют зоны ниже нуля. Среднее значение составляет 10 % (черная горизонтальная линия), что свидетельствует об увеличении затронутых плотных тканей.

Следует отметить, что в результате локализации ТПВ не выходит за область костных тканей, а следовательно, не затрагивает критические структуры.

Подобной локализации ТПВ в пространстве позвонка можно достичь только использованием МР. Высокая точность наведения и жесткость конструкции МР позволяют хирургу устанавливать ТПВ около более жестких тканей, что повысит стабилизацию ТПВ.

Выводы

1. Составлен прототип программного обеспечения для планирования маршрута ввода инструмента при проведении робот-ассистированной операции по транспедикулярной фиксации. Сформирован объемный геометрический примитив для работы с денситометрическими данными костных тканей пациента. Разработан алгоритм планирования маршрута ввода инструментов.

2. Проведены экспериментальные исследования по локализации ТПВ в пространстве позвонка с последующей оценкой денситометрических параметров зацепаемых тканей и денситометрического параметра степени зацепления. В итоге удалось добиться положительного результата зацепления.

3. Предложен метод, позволяющий расширить возможности хирургов при проведении операций по транспедикулярной фиксации с применением МР.

4. Дальнейшие работы будут посвящены развитию средств анализа денситометрических параметров костных тканей для получения еще более точных результатов, экспериментальным исследованиям по установке ТПВ в физические модели и оценке силы, необходимой для нарушения их положения.

Литература

- [1] Подураев Ю.В., Панченков Д.Н., Лискевич Р.В. *Медицинская робототехника*. Москва, ГЭОТАР-Медиа, 2023. 381 с.
- [2] Кремповский П.Р., Луцков Ю.И. Навигационные системы автоматизированных робототехнических комплексов. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2021, № 6, с. 58–61.
- [3] Stolka P.J. *Navigation with local sensors in surgical robotics*. URL: <https://epub.uni-bayreuth.de/id/eprint/302/> (дата обращения: 15.06.2025).
- [4] Юрченко С.М. Компьютерная навигация в хирургии позвоночника. *Хирургия. Восточная Европа*, 2019, т. 8, № 3, с. 455–468.
- [5] Daemi N., Ahmadian A., Mirbagheri A. et al. Planning screw insertion trajectory in lumbar spinal fusion using pre-operative CT images. *37th Annual Int. Conf. of the IEEE EMBC*, 2015, pp. 3639–3642, doi: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7319181>
- [6] Бердюгин К.А., Чертков А.К., Штадлер Д.И. и др. Ошибки и осложнения транспедикулярной фиксации позвоночника погружными конструкциями. *Фундаментальные исследования*, 2012, № 4-2, с. 425–431. EDN: PBADTV
- [7] Михайлов А.Н., Лукьяненко Т.Н. Минеральная плотность позвонков у больных с шейным остеохондрозом по данным количественной компьютерной томографии. *Международные обзоры: клиническая практика и здоровье*, 2014, № 6, с. 24–32.
- [8] Куликов Ю.Н., Воротников А.А., Мищенко Д.С. и др. Информационная система сбора, хранения и обработки денситометрических данных для определения перспективных навигационных данных медицинских роботов. *Медицинская техника*, 2024, № 1, с. 10–13. EDN: DZGLWS

- [9] Куликов Ю.Н., Мищенко Д.С., Воротников А.А. и др. Прототип программного комплекса по анализу интраоперационных данных транспедикулярной фиксации для учета индивидуальных особенностей пациента. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2024661832. Заявл. 22.05.2024, опублик. 22.05.2024.
- [10] Wilson Jr.J.P., Fontenot L., Stewart C. et al. Image-guided navigation in spine surgery: from historical developments to future perspectives. *J. Clin. Med.*, 2024, vol. 13, no. 7, art. 2036, doi: <https://doi.org/10.3390/jcm13072036>
- [11] Merloz Ph., Tonetti J., Milaire M. и др. Вклад 3D-визуализации в хирургию позвоночника. *Гений ортопедии*, 2014, № 1, с. 51–57.
- [12] Tsai T.H., Tzou R.D., Su Y.F. et al. Pedicle screw placement accuracy of bone-mounted miniature robot system. *Medicine*, 2017, vol. 96, no. 3, art. e5835, doi: <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005835>
- [13] Lefranc M., Peltier J. Evaluation of the ROSA™ Spine robot for minimally invasive surgical procedures. *Expert Rev. Med. Devices*, 2016, vol. 13, no. 10, pp. 899–906, doi: <https://doi.org/10.1080/17434440.2016.1236680>
- [14] D'Souza M., Gendreau J., Feng A. et al. Robotic-assisted spine surgery: history, efficacy, cost, and future trends. *Robotic Surgery: Research and Reviews*, 2019, vol. 6, pp. 9–23, doi: <https://doi.org/10.2147/RSRR.S190720>
- [15] Wallace D.J., Vardiman A.B., Booher G.A. et al. Navigated robotic assistance improves pedicle screw accuracy in minimally invasive surgery of the lumbosacral spine: 600 pedicle screws in a single institution. *Int. J. Med. Robot.*, 2020, vol. 16, no. 1, art. e2054, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.2054>
- [16] Bhimreddy M., Hersh A.M., Jiang K. et al. Accuracy of pedicle screw placement using the ExcelsiusGPS robotic navigation platform: an analysis of 728 screws. *Int. J. Spine Surg.*, 2024, vol. 18, no. 6, pp. 712–720, doi: <https://doi.org/10.14444/8660>
- [17] Kuo K.L., Su Y.F., Wu C.H. et al. Assessing the intraoperative accuracy of pedicle screw placement by using a bone-mounted miniature robot system through secondary registration. *PloS One*, 2016, vol. 11, no. 4, art. e0153235, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153235>
- [18] Phan K., Hogan J., Maharaj M. et al. Cortical bone trajectory for lumbar pedicle screw placement: a review of published reports. *Orthop. Surg.*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 213–221, doi: <https://doi.org/10.1111/os.12185>
- [19] Delgado-Fernandez J., García-Pallero M.A., Blasco G. et al. Review of cortical bone trajectory: evidence of a new technique. *Asian Spine J.*, 2017, vol. 11, no. 5, pp. 817–831, doi: <https://doi.org/10.4184/asj.2017.11.5.817>
- [20] Christie M., Olivier P., Normand J.M. Camera control in computer graphics. *Comput. Graph. Forum*, 2008, vol. 27, no. 8, pp. 2197–2218, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2010.01181.x>
- [21] Куликов Ю.Н., Воротников А.А., Мищенко Д.С. и др. Определение денситометрических данных геометрическими примитивами для анализа структуры костных тканей при транспедикулярной фиксации. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 7, с. 3–14. EDN: RYTKHK
- [22] Гринь А.А., Талыпов А.Э., Кордонский А.Ю. и др. Сравнительный метаанализ имплант-ассоциированных осложнений и частоты спондилодеза при методе Goel–Harms и задней трансартикулярной фиксации C1–C2 по методу F. Magerl. *Нейрохирургия*, 2024, т. 26, № 2, с. 100–111, doi: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2024-26-2-100-111>
- [23] Puvanesarajah V., Liauw J.A., Lo S. et al. Techniques and accuracy of thoracolumbar pedicle screw placement. *World J. Orthop.*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 112–123, doi: <https://doi.org/10.5312/wjo.v5.i2.112>
- [24] Sansur C.A., Caffes N.M., Ibrahimi D.M. et al. Biomechanical fixation properties of cortical versus transpedicular screws in the osteoporotic lumbar spine: an in vitro human cadaveric model. *J. Neurosurg. Spine*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 467–476, doi: <https://doi.org/10.3171/2016.2.SPINE151046>

References

- [1] Poduraev Yu.V., Panchenkov D.N., Liskevich R.V. *Meditinskaya robototekhnika* [Medical robotics]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2023. 381 p. (In Russ.).
- [2] Krempovskiy P.R., Lutskov Yu.I. Navigation systems of automated robotic complexes. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2021, no. 6, pp. 58–61. (In Russ.).
- [3] Stolka P.J. Navigation with local sensors in surgical robotics. URL: <https://epub.uni-bayreuth.de/id/eprint/302/> (accessed: 15.06.2025).
- [4] Yurchenko S.M. Computer navigation in spinal surgery. *Khirurgiya. Vostochnaya Evropa* [Surgery. East Europe], 2019, vol. 8, no. 3, pp. 455–468. (In Russ.).
- [5] Daemi N., Ahmadian A., Mirbagheri A. et al. Planning screw insertion trajectory in lumbar spinal fusion using pre-operative CT images. *37th Annual Int. Conf. of the IEEE EMBC*, 2015, pp. 3639–3642, doi: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7319181>
- [6] Berdyugin K.A., Chertkov A.K., Shtadler D.I. et al. Mistakes and complications of transpedicular fixation of spine. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2012, no. 4-2, pp. 425–431. EDN: PBADTV (in Russ.).
- [7] Mikhaylov A.N., Lukyanenko T.N. Vertebral mineral density in patients with cervical osteochondrosis according to a quantitative computed tomography vertebral mineral density in patients with cervical osteochondrosis according to a quantitative computed tomography. *Mezhdunarodnye obzory: klinicheskaya praktika i zdorovye*, 2014, no. 6, pp. 24–32. (In Russ.).
- [8] Kulikov Yu.N., Vorotnikov A.A., Mishchenkov D.S. et al. Information system for collecting, storing and processing densitometry data to determine perspective navigation data for medical robots. *Meditinskaya tekhnika* [Biomedical Engineering], 2024, no. 1, pp. 10–13. EDN: DZGLWS (in Russ.).
- [9] Kulikov Yu.N., Mishchenkov D.S., Vorotnikov A.A. et al. *Prototip programmnogo kompleksa po analizu intraoperatsionnykh dannykh transpedikulyarnoy fiksatsii dlya ucheta individualnykh osobennostey patsienta* [Prototype of software package for analysis of intraoperative data of transpedicular fixation to take into account individual characteristics of the patient]. Software registration certificate no. 2024661832. Appl. 22.05.2024, publ. 22.05.2024. (In Russ.).
- [10] Wilson Jr.J.P., Fontenot L., Stewart C. et al. Image-guided navigation in spine surgery: from historical developments to future perspectives. *J. Clin. Med.*, 2024, vol. 13, no. 7, art. 2036, doi: <https://doi.org/10.3390/jcm13072036>
- [11] Merloz Ph., Tonetti J., Milaire M. et al. 3D visualization contribution to the spine surgery. *Geniy ortopedii* [Orthopaedic Genius], 2014, no. 1, pp. 51–57. (In Russ.).
- [12] Tsai T.H., Tzou R.D., Su Y.F. et al. Pedicle screw placement accuracy of bone-mounted miniature robot system. *Medicine*, 2017, vol. 96, no. 3, art. e5835, doi: <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005835>
- [13] Lefranc M., Peltier J. Evaluation of the ROSA™ Spine robot for minimally invasive surgical procedures. *Expert Rev. Med. Devices*, 2016, vol. 13, no. 10, pp. 899–906, doi: <https://doi.org/10.1080/17434440.2016.1236680>
- [14] D'Souza M., Gendreau J., Feng A. et al. Robotic-assisted spine surgery: history, efficacy, cost, and future trends. *Robotic Surgery: Research and Reviews*, 2019, vol. 6, pp. 9–23, doi: <https://doi.org/10.2147/RSRR.S190720>
- [15] Wallace D.J., Vardiman A.B., Booher G.A. et al. Navigated robotic assistance improves pedicle screw accuracy in minimally invasive surgery of the lumbosacral spine: 600 pedicle screws in a single institution. *Int. J. Med. Robot.*, 2020, vol. 16, no. 1, art. e2054, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.2054>
- [16] Bhimreddy M., Hersh A.M., Jiang K. et al. Accuracy of pedicle screw placement using the ExcelsiusGPS robotic navigation platform: an analysis of 728 screws. *Int. J. Spine Surg.*, 2024, vol. 18, no. 6, pp. 712–720, doi: <https://doi.org/10.14444/8660>
- [17] Kuo K.L., Su Y.F., Wu C.H. et al. Assessing the intraoperative accuracy of pedicle screw placement by using a bone-mounted miniature robot system through secondary

- registration. *PloS One*, 2016, vol. 11, no. 4, art. e0153235, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153235>
- [18] Phan K., Hogan J., Maharaj M. et al. Cortical bone trajectory for lumbar pedicle screw placement: a review of published reports. *Orthop. Surg.*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 213–221, doi: <https://doi.org/10.1111/os.12185>
- [19] Delgado-Fernandez J., García-Pallero M.A., Blasco G. et al. Review of cortical bone trajectory: evidence of a new technique. *Asian Spine J.*, 2017, vol. 11, no. 5, pp. 817–831, doi: <https://doi.org/10.4184/asj.2017.11.5.817>
- [20] Christie M., Olivier P., Normand J.M. Camera control in computer graphics. *Comput. Graph. Forum*, 2008, vol. 27, no. 8, pp. 2197–2218, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2010.01181.x>
- [21] Kulikov Yu.N., Vorotnikov A.A., Mishchenkov D.S. et al. Using geometric primitives to determine densitometric data in analyzing the bone tissue structure at transpedicular fixation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2025, no. 7, pp. 3–14. EDN: RYTKHK (in Russ.).
- [22] Grin A.A., Talypov A.E., Kordonskiy A.Yu. et al. Comparative meta-analysis of implant-associated complications and spinal fusion incidence in Goel-Harms technique and posterior C1-C2 transarticular screw fixation per F. Magerl. *Neyrokhirurgiya* [Russian journal of neurosurgery], 2024, vol. 26, no. 2, pp. 100–111, doi: <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2024-26-2-100-111> (in Russ.).
- [23] Puvanesarajah V., Liauw J.A., Lo S. et al. Techniques and accuracy of thoracolumbar pedicle screw placement. *World J. Orthop.*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 112–123, doi: <https://doi.org/10.5312/wjo.v5.i2.112>
- [24] Sansur C.A., Caffes N.M., Ibrahim D.M. et al. Biomechanical fixation properties of cortical versus transpedicular screws in the osteoporotic lumbar spine: an in vitro human cadaveric model. *J. Neurosurg. Spine*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 467–476, doi: <https://doi.org/10.3171/2016.2.SPINE151046>

Статья поступила в редакцию 01.07.2025

Информация об авторах

КУЛИКОВ Юрий Николаевич — младший научный сотрудник лаборатории медико-роботических цифровых технологий. НИИ «ТЕХНОБИОМЕД» ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России; магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника». ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (127055, Москва, Российская Федерация, пер. Вадковский, д. 1, e-mail: kulikobyura@mail.ru).

ВОРОТНИКОВ Андрей Александрович — старший научный сотрудник лаборатории медико-роботических цифровых технологий. НИИ «ТЕХНОБИОМЕД» ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России; старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника». ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (127055, Москва, Российская Федерация, пер. Вадковский, д. 1, e-mail: aavorotnikov90@gmail.com).

Information about the authors

KULIKOV Yuri Nikolaevich — Junior Researcher, Laboratory of Medical-Robotic Digital Systems. Research Institute TECHNOBIOMED at the FSBEI HE ROSUNIMED of MOH of Russia; Master's Degree, Robotics and Mechatronics Department. MSTU «STANKIN» (127055, Moscow, Russian Federation, Vadkovskiy Pereulok, Bldg. 1, e-mail: kulikobyura@mail.ru).

VOROTNIKOV Andrei Aleksandrovich — Senior Researcher, Laboratory of Medical-Robotic Digital Systems. Research Institute TECHNOBIOMED at the FSBEI HE ROSUNIMED of MOH of Russia; Senior Lecturer, Robotics and Mechatronics Department. MSTU «STANKIN» (127055, Moscow, Russian Federation, Vadkovskiy Pereulok, Bldg. 1, e-mail: aavorotnikov90@gmail.com).

ГРИНЬ Андрей Анатольевич — доктор медицинских наук, член-корреспондент РАН, заведующий научным отделением неотложной нейрохирургии НИИ СП им. Н.В. Склифосовского; главный нейрохирург Департамента здравоохранения города Москвы; ведущий научный сотрудник НИИ «ТЕХНОБИОМЕД». ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России (127006, Москва, Российская Федерация, ул. Долгоруковская, д. 4, e-mail: aagreen@yandex.ru).

ЛЕВЧЕНКО Олег Валерьевич — доктор медицинских наук, профессор РАН, заведующий кафедрой «Нейрохирургии», проректор. ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России (127006, Москва, Российская Федерация, ул. Долгоруковская, д. 4, e-mail: levchenko-ov@msmsu.ru).

GRIN Andrey Anatolyevich — Doctor of Science (Medical), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Science Department. Sklifosovsky Research Institute of Emergency Medicine; Chief Freelance Neurosurgeon of the Moscow City Health Department; Leading Researcher, Laboratory of Medical-Robotic Digital Systems. Research Institute TECHNOBIOMED at the FSBEI HE ROSUNIMED of MOH of Russia (127006, Moscow, Russian Federation, Dolgorukovskaya St., Bldg. 4, e-mail: aagreen@yandex.ru).

LEVCHENKO Oleg Valeryevich — Doctor of Science (Medical), Professor of the Russian Academy of Sciences, Vice Rector, Head of the Department of Neurosurgery. FSBEI HE ROSUNIMED of MOH of Russia (127006, Moscow, Russian Federation, Dolgorukovskaya St., Bldg. 4, e-mail: levchenko-ov@msmsu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Куликов Ю.Н., Воротников А.А., Гринь А.А., Левченко О.В. Метод навигации медицинского робота на основе денситометрических данных костных тканей для проведения операций по транспедикулярной фиксации. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 3, с. 14–25.

Please cite this article in English as:

Kulikov Y.N., Vorotnikov A.A., Grin A.A., Levchenko O.V. Navigation method based on densitometric data of bone tissue for transpedicular fixation with the medical robot. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 3, pp. 14–25.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Модуляционные источники электропитания
в радиопередающих устройствах»**

Автор М.В. Родин

Изложены сведения о модуляционных источниках электропитания, рассмотрены их назначение в составе радиопередающих устройств, основные схемы, принципы работы и характеристики. Приведены примеры решения задач, контрольные вопросы и задания для самостоятельной подготовки, а также практикум для исследования модуляционных источников электропитания.

Предназначено для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплины «Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств» и «Устройства генерирования и формирования сигналов» на кафедре «Радиоэлектронные системы и устройства». Может быть также полезно при выполнении курсовых и дипломных проектов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>