

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	9
Введение (О.О. Янушевич)	10
ГЛАВА 1. Медицинская робототехника – новое медико-технологическое направление науки и техники (Ю.В. Подураев)	15
1.1. Цели создания и интердисциплинарная структура медицинской робототехники	15
1.2. Актуальные тренды развития современной робототехники и научно-техническая проблематика для медицинских роботов	19
1.3. Интеллектуальное управление в медицинской робототехнике	28
Список литературы	37
ГЛАВА 2. Современные роботомедицинские системы и технологии	39
2.1. Роботизированные технологии в общей хирургии (Д.Н. Панченков, Р.В. Лискевич)	39
2.1.1. Симбиоз инженерной мысли и медицины	40
2.1.2. Колоректальная хирургия: специальность, открывшая путь	42
2.1.3. Гепатобилиарная и панкреатическая хирургия: нет ничего невозможного	44
2.1.4. Хирургическая онкология желудка: совершенство обретает форму	46
2.1.5. Бариатрическая и антирефлюксная хирургия: самые молодые области развития	47
2.1.6. Эндокринная хирургия: робототехника в необычном месте приложения	48
2.1.7. Холецистэктомия: первая ступень в начале долгого пути... 50	
2.1.8. Пластика грыж: двигатель развития и совершенствования методик	51

2.1.9. Роботизированная общая хирургия: инновации невозможно остановить	53
Список литературы	55
2.2. Разработка хирургической роботизированной системы для применения в челюстно-лицевой хирургии (Э.А. Базикян, А.А. Чунихин)	59
Введение	59
2.2.1. Подсистема «Автоматизированный манипуляционный робот-хирург». Прототип автоматизированного устройства смены медицинского рабочего инструмента	69
2.2.1.1. Переходник МРИ с эндоскопической камерой	70
2.2.2. Подсистема «Место пациента». Прототип специализированной оснастки, фиксирующей фантом головы пациента	71
2.2.2.1. Фантомы головы и челюсти пациента	71
2.2.2.2. Специализированная оснастка, фиксирующая фантом головы пациента	72
2.2.3. Подсистема «Мануальный тренажерный комплекс»	73
2.2.4. Подсистема «Рабочее место хирурга». Описание прототипа интеллектуальной системы принятия решений по выбору режимов работы мультифункционального хирургического комплекса	76
2.2.5. Проведение экспериментальных исследований для получения количественной оценки сравнения траекторий, проводимых врачом-хирургом, и траекторий, проводимых роботом	77
2.2.5.1. Критерии сравнения траекторий движения робота и мануальных перемещений врача для выполнения челюстно-лицевых хирургических операций	78
2.2.5.2. Набор типовых траекторий и процесс получения экспериментальных данных	79
2.2.5.3. Критерий I. Стандартное отклонение точек от линейной (полулунной, фестончатой) траектории – величина отклонения в каждой точке от ее проекции на среднюю линию (модель), построенную по методу наименьших квадратов.	81

2.2.5.4. Критерий II. Погрешность величины воздушного зазора между наконечником лазера и обрабатываемой биологической тканью. Разница между измеренным значением воздушного зазора и заданным	87
2.2.5.5. Критерий III. Среднеарифметическое относительной погрешности скорости реза и погрешность средней скорости реза на каждом проходе медицинского рабочего инструмента. Разница между измеренным значением скорости на проходе и заданным	93
2.2.5.6. Критерий IV. Стандартное отклонение от средней скорости – величина отклонения от средней скорости движения. Характеризует качество удержания величины текущей скорости реза.	103
2.2.5.7. Рекомендации и предложения по использованию результатов НИР	110
Заключение	110
Список литературы	111
2.3. 3D-биопечать живых органов и тканей (И.Ю. Малышев).	113
Введение	113
2.3.1. 3D-биопечать: компоненты технологии.	114
2.3.1.1. Предпроцессинг – создание цифровой модели ткани и подготовка биочернил.	115
2.3.1.2. Процессинг – создание объемного биологического аналога органа или ткани	120
2.3.1.3. Постпроцессинг – созревание ткани в биореакторе и имплантация	124
2.3.2. 3D-биопечать: биофабрикация функциональных тканей и органов	124
2.3.2.1. Сосудистая сеть	124
2.3.3. Новые тенденции в биопечати: биопечать <i>in situ</i>	136
2.3.3.1. Биопечать <i>in situ</i> кожи, костных тканей и хряща	137
2.3.3.2. Биопечать <i>in situ</i> тканей зуба	140
2.3.4. Проблемы и перспективы 3D-биопечати в клинической практике	142
Список литературы	143

2.4. Робот-ассистированная хирургия в урологии (Д.Ю. Пушкарь, К.Б. Колонтарев)	146
Введение	146
2.4.1. Определение	146
Da Vinci 2000 и Da Vinci S	152
Da Vinci Si	153
Da Vinci Xi	153
Senhance Surgical Robotic System	155
Versius robotic system (CMR surgical, Cambridge, UK)	156
2.4.2. Робот-ассистированная радикальная простатэктомия	158
2.4.3. Робот-ассистированная резекция почки	163
2.4.4. Робот-ассистированная радикальная цистэктомия	165
2.4.5. Отечественный хирургический робот-ассистирующий комплекс для выполнения операций в урологии	167
Ожидаемые технико-экономические показатели	168
Список литературы	169
2.5. Современные роботизированные медицинские системы и технологии. Нейрохирургия позвоночника (В.В. Крылов, А.А.Гринь, А.Ю. Кордонский)	175
Введение	175
2.5.1. Робот Mazor 9	176
2.5.2. Робот Brainlab Cirq	179
2.5.3. Медико-технологические параметры медицинских роботов	181
2.5.4. Конструкция и система управления многофункционального устройства для измерения сил и моментов при нейрохирургии позвоночника	181
2.5.5. Алгоритмическое сопровождение многофункционального устройства	183
2.5.6. Лабораторные эксперименты с фантомами позвоночника Sawbones	185
2.5.7. Заключение	190
Список литературы	191

2.6. Роботизированные системы в нейрохирургии головного мозга (<i>О.В. Левченко</i>)	192
2.6.1. Телехирургический робот (ведущий-ведомый)	194
2.6.2. Направляющий автономный робот.	198
2.6.3. Основные тренды развития робототехники в нейрохирургии	202
Список литературы	203
2.7. Понятия и различия реальностей: виртуальная, дополненная и смешанная (<i>И.В. Семенякин</i>)	204
2.7.1. Виртуальная реальность (virtual reality)	204
2.7.2. Дополненная реальность (augmented reality)	205
2.7.3. Смешанная реальность (mixed reality)	205
2.7.4. Основные типы устройств.	206
2.7.5. Применение виртуальной реальности.	207
2.7.6. Применение виртуальной реальности в медицине	208
2.7.7. Разработка приложений смешанной реальности	210
Список литературы	213
2.8. Экзоскелеты (<i>Е.В. Письменная</i>)	215
2.8.1. Экзоскелеты для реабилитации. Экзорехабилитация.	215
Описание экзоскелетов.	216
Что такое экзоскелет EchoAtlet.	216
Выбор типа голенного звена для ходьбы в экзоскелете	226
Размещение и обучение пациентов.	228
2.8.2. Инсульт	229
Общие показания	231
Критерии включения	231
Критерии исключения	231
Применение устройства «ЭкзоАтлет»	233
Выводы по наблюдениям, сделанным по группе пациентов.	269
Список литературы	270

2.8.3. Клинико-биомеханическое обоснование применения медицинского экзоскелета EgoAtlet Bambini Mini и первый опыт проведения реабилитации с его использованием	274
Описание параметров тренировок в экзоскелете EgoAtlet Bambini MINI и клиническая оценка результатов	280
Оценка основных параметров ходьбы	281
Оценка биомеханических параметров ходьбы с использованием лечебно-измерительного комплекса оценки эффективности реабилитации «ЛИКЭР»	291
2.8.4. Выводы	336
Список литературы	336

ГЛАВА 3. Системы управления в медицинской робототехнике (Ю.В. Подураев, А.А. Воротников, Д.Д. Климов) .. 338

3.1. Структура и основные компоненты систем управления медицинскими роботами	338
3.2. Программно-математическое обеспечение и компьютерное моделирование медицинских роботов	349
3.2.1. Подходы к построению программного обеспечения медицинских роботов	349
3.2.2. Архитектура программного обеспечения медицинских роботов	352
Список литературы	355

ГЛАВА 4. Роботизика и интеллектуальная робототехника в медицине (круглый стол) 357

Глава 1

Медицинская робототехника — новое медико-технологическое направление науки и техники

1.1. ЦЕЛИ СОЗДАНИЯ И ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНАЯ СТРУКТУРА МЕДИЦИНСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Медицинская робототехника — это новое медико-технологическое направление науки и техники, предметная область которой формируется путем синергетики знаний и современных технологий трех базовых областей — высокотехнологичной медицины, интеллектуальной робототехники и биотехнологий.

Важно отметить, что в течение многих десятилетий перечисленные сферы деятельности развивались весьма обособленно как в науке и образовании, так и в практических приложениях. Уровень сложности и предметной новизны задач, которые стоят перед медицинской робототехникой, потребовали создания и применения оригинальных подходов решения системных проблем на междисциплинарных стыках базовых фундаментальных областей. При этом ведущая роль в становлении и развитии медицинской робототехники принадлежит методам интеллектуализации и цифровизации ключевых технологий и систем, которые положены в основу современной научно-технической политики Российской Федерации.

Целью медицинской робототехники является повышение качества лечения пациентов на этапах исследования и диагностики, при выполнении медицинских операций и хирургических вмешательств путем системного сочетания медицинских, робототехнических и биологических методов. При этом достигается ряд следующих лечебных и социально-экономических эффектов [1]:

- ранняя диагностика заболеваний, в том числе путем применения цифровой обработки и компьютерного анализа показаний медицинских приборов и визуализации изображений;
- малая инвазивность хирургии и снижение интраоперационной кровопотери благодаря проведению хирургических вмешательств с минимальным повреждением структуры здоровых тканей и минимальным нарушением их функций;
- сокращение времени выполнения операций вследствие высокоточных методов позиционирования, интеллектуального планирования и навигации движения медицинских инструментов;
- удобство работы и снижение утомляемости врачей и медицинского персонала, практическое исключение мануальных врачебных ошибок;
- высокий уровень 3D-визуализации операционного поля и видеографики движений медицинских инструментов;
- сокращение времени госпитализации и реабилитации пациентов после сложных операций за счет снижения инвазивности процедур и повышения точности роботизированных манипуляций;
- диагностика и контроль критически важных параметров состояния пациента в реальном времени при хирургическом вмешательстве.

Основной целью коллаборации робототехники и медицины является повышение эффективности лечения и уменьшение рисков нанесения вреда здоровью пациентов при выполнении обследований и хирургических вмешательств. Поставленная цель достигается через целенаправленный научно-технический поиск интеллектуальных роботизированных систем и технологий, позволяющих принципиально превзойти возможности естественных систем человека путем роботизированного выполнения медицинских операций.

Следовательно, и медико-роботизированные системы надо воспринимать как интеллектуальный медицинский инструментарий, функциональные возможности которого используются исключительно в рамках плана лечения, ограничительных условий и полного контроля со стороны врачей и медперсонала.

Интердисциплинарный предмет медицинской робототехники (МР) определяет системный характер ее структуры. Это означает понимание медицинской робототехники как целостной системы как с точки зрения структурных компонентов в их взаимосвязи, так и по применяемым медицинским, роботизированным и биотехническим технологиям.

Основные структурные компоненты МР и взаимодействие между ними можно наглядно проиллюстрировать в виде цветовой графической модели «Пирамида медицинской робототехники» (рис. 1.1).

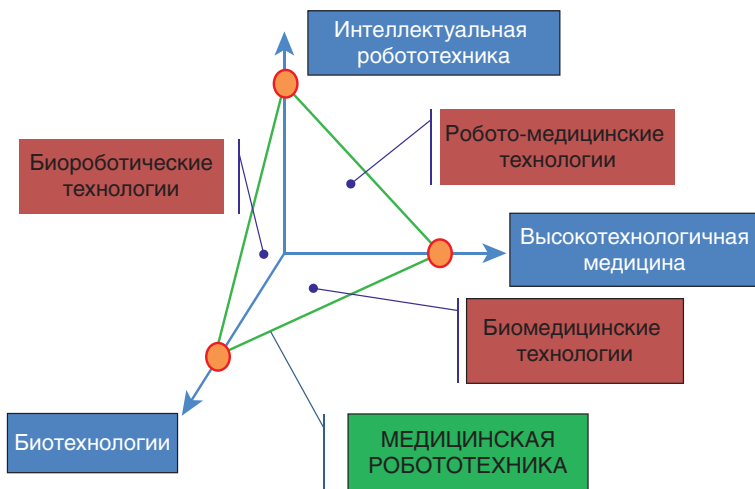


Рис. 1.1. Структурная модель «Пирамида медицинской робототехники»

Три базовых направления развития современной медицинской робототехники графически представлены как координатные векторы. К ним отнесены три фундаментальные области: высокотехнологичная медицина, интеллектуальная робототехника и биотехнологии. Безусловно, достигнутый высокий уровень развития базовых областей позволил сегодня ставить и успешно решать научные и практические задачи по созданию и внедрению МР.

Отметим, что каждая из трех указанных областей в свою очередь является междисциплинарной системой. Например, современная мехатроника (рис. 1.2) построена путем интеграции прецизионной механики, микроэлектроники и информационных технологий, реализующих компьютерное проектирование и управление роботами, в том числе с использованием методов искусственного интеллекта [2].

Подчеркнем, что в мехатронике структурные взаимосвязи элементов разной физической природы (механических, электротехнических, программных, сенсорных и т.д.) дали толчок к разработке и применению мехатронных (по сути, гибридных) технологий. Подробнее вопросы проектирования и программирования современных роботов рассмотрены в разделе 1.2 и главах 2 и 3.

Предложенная модель «Пирамида медицинской робототехники», несмотря на очевидную схематичность, позволяет показать основные этапы становления МР как междисциплинарной медико-технологической области науки и пути ее дальнейшего развития.

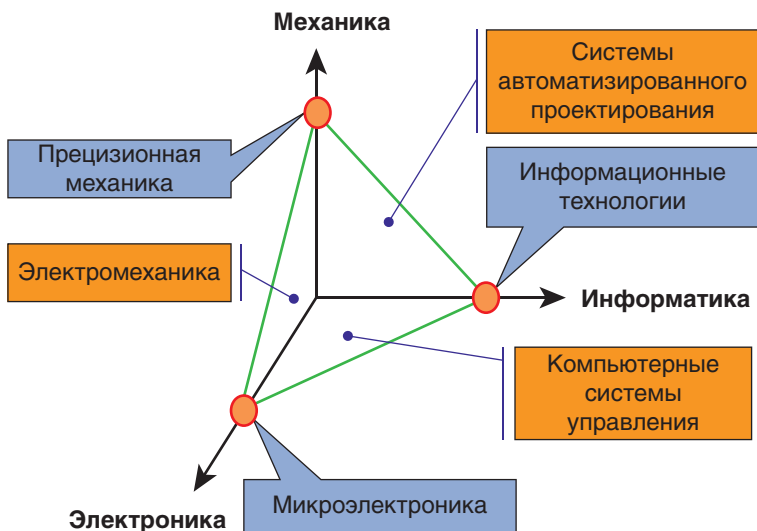


Рис. 1.2. Структурная модель «Пирамида мехатроники»

На первом этапе формирования МР происходил поиск точек взаимодействия между тремя базовыми направлениями (координатные оси на рис. 1.1), как правило, в инициативном порядке. В первую очередь это относится к фундаментальной науке и образованию, когда ведущие ученые и затем и практики все чаще стали применять решения, полученные в других предметных областях. В медицине этот процесс активно стимулировался разработкой и внедрением в клиническую практику нового поколения медицинских устройств, построенных на базе новой информационной и компьютерной техники.

Второй этап становления медицинской робототехники — это появление дуальных технологических областей, которые графически показаны как три боковые грани модели «Пирамида медицинской робототехники» (см. рис. 1.1). Данными гранями являются роботомедицинские, биомедицинские и биороботизированные технологии. Отметим, что все перечисленные дуальные технологические области базируются на современных цифровых и интеллектуальных технологиях получения, обработки и хранения информации.

Главным содержанием второго этапа развития является появление международных и национальных проектов по медико-технологической тематике и открытие ведущими университетами междисциплинарных образовательных программ. Практическая реализация научно-исследо-

вательских проектов и появление нового поколения специалистов способствуют активному внедрению МР в клиническую практику. На этом этапе, начиная с 2000-х гг., на мировом рынке появились серийно выпускаемые модели медицинских роботов.

Мы предполагаем, что технологический прорыв в области медицинской робототехники произойдет на третьей решающей стадии ее развития. На этом этапе в научной, образовательной и организационной сферах путем синергетической интеграции трех дуальных направлений будут созданы медико-технологические платформы, которые позволят расширить спектр прикладных систем для конкретных медицинских областей. Подробно вопросы о состоянии медицинской робототехники в мире и примеры современных роботомедицинских систем, разработанных и внедренных в отечественные клинические центры, рассмотрены в главах 2 и 3.

1.2. АКТУАЛЬНЫЕ ТRENДЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМАТИКА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОВ

В этом разделе мы рассмотрим тренды развития современной робототехники, которые формируют актуальные проблемы и задачи в том числе и для медицинских роботов. Каждый из приведенных ниже трендов придает роботам принципиально новые свойства и модели поведения.

Выделим пять ключевых трендов развития современной робототехники.

1. Рекордные темпы развития сервисной робототехники в мире по сравнению с традиционной промышленной роботизацией производства.
2. Интенсивная разработка роботов для медицинских и биотехнологических применений.
3. Появление принципиально новой области медицинской робототехники и мехатроники, которая направлена на встраивание интеллектуальных киберфизических устройств в живые органы животных и человека.
4. Создание интеллектуальных роботов на базе методов искусственного интеллекта, интеллектуальных программных и аппаратных мехатронных решений.
5. Становление новой научной и образовательной дисциплины — роботэтики, предметом исследований которой является проблема коллаборации людей и интеллектуальных роботов.