

Робот-ассистированная хирургия: прошлое, настоящее и будущее

Robot-assisted surgery: past, present and future

На протяжении веков человечество стремилось облегчить физический труд, увеличить производительность, усовершенствовать орудия производства. Процесс не был быстрым и легким: от каменных скребков до колеса, от простейших механизмов до космических кораблей – дистанция в тысячелетия. И с каждым новым открытием появляются новые горизонты, еще недавно казавшиеся плодом воображения фантастов.

For centuries, mankind has sought to facilitate physical labor, increase productivity, and improve production tools. The process was not quick and easy: from stone scrapers to a wheel, from the simplest mechanisms to spaceships – a distance of millennia. And with each new discovery, new horizons appear, which until recently seemed like a figment of the imagination of science fiction writers.

Сегодня человечество переживает эру «информационного возраста», при котором все новейшие технологические «чудеса» максимально быстро внедряются в повседневную жизнь.

В эпоху телекоммуникаций и компьютерных технологий произошли серьезные изменения во всех аспектах профессиональной и бытовой жизнедеятельности. Новейшие концепции автоматизированных и роботических решений нашли свое применение во многих отраслях промышленности. С недавнего времени роботы в медицине в целом и в хирургии в частности стали неотъемлемой частью врачебной практики.

По данным Американского института по изучению роботической техники (The Robot Institute of America), робот представляет собой репрограммируемый мультифункциональный манипулятор, предназначенный для перемещения/передвижения материалов, предметов, их частей или иных специализированных устройств с целью выполнения различных задач. В словаре Вебстера (Websters' English Dictionary) робот определяется как «автономный аппарат или устройство, которое осуществляет различные действия, свойственные человеку, и выполняет их как будто под контролем человеческого разума». Вышеуказанные определения робота объединяют три основных способности робота: выполнять определенные действия, решать различные задачи на запрограммированной основе, а также интерпретировать и модифицировать ответы на команды оператора.

ПРОШЛОЕ

Великий итальянский ученый, анатом, естествоиспытатель, художник и архитектор Леонардо да Винчи (1452–1519) создал несколько так называемых манекенов, способных выполнять запрограммированные действия. В его коллекции нашлось место механическим птице и льву, способному ходить, подниматься



Автопортрет Леонардо да Винчи (1452–1519)
Self-portrait of Leonardo da Vinci (1452–1519)

¹ URL: <https://www.wga.hu/frames-e.html?/html/l/%2Fleonardo%2F08heads%2F12selfpo.html>



Робот Леонардо. Реконструкция по схемам Леонардо да Винчи²
Leonardo's robot. Reconstruction according to Leonardo da Vinci's schemes²



Карел Чапек (1890–1938), придумавший слово «робот»³
Karel Čapek (1890–1938), who coined the word "robot"³

на задние лапы и даже преподнести букет лилий королю Франции. Однако самым интересным экспонатом стал созданный в 1495 г. механический манекен в форме вооруженного рыцаря, получивший название «робот Леонардо».

Однако в современной истории впервые слово «робот» применил чешский писатель Карел Чапек в своей научно-популярной пьесе «R. U. R.» в 1923 г. Слово «робот» происходит от чешского слова *robota*, обозначающего тяжелый физический труд.

Знаменитый фантаст Айзек Азимов в романе «Хоровод» в 1942 г. предложил слово «робототехника» и сформулировал так называемые законы робототехники, которые стали непреложными для многих писателей:

1. Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинен вред.
2. Робот должен повиноваться всем приказам, которые дает человек, кроме тех случаев, когда эти приказы противоречат Первому Закону.
3. Робот должен заботиться о своей безопасности в той мере, в которой это не противоречит Первому или Второму Закону.



Айзек Азимов (1920–1992), автор «трех законов робототехники»⁴
Isaac Asimov (1920–1992), author of the Three Laws of Robotics⁴

² URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Leonardo%27s_robot&utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera

³ URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Portal:The_arts/Selected_quote/19?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera

Позже автор добавил еще один закон, назвав его Нулевым, который гласил, что робот должен действовать в интересах всего человечества, а не только отдельного человека.

К настоящему времени роботизированные технологии приобретают все большую популярность в медицинской отрасли. Многочисленные роботические системы были предложены для помощи инвалидам и пожилым людям. Автоматические программируемые инвалидные кресла облегчают жизнь пациентам с частичной или полной утратой способности к передвижению.

Существует целый ряд роботических решений для применения в системе здравоохранения без непосредственного контакта с пациентами. Роботизированные лабораторные комплексы способны обеспечить бесперебойное функционирование многопрофильного учреждения с минимальной затратой человеческих ресурсов, что, несомненно, является экономически выгодным.

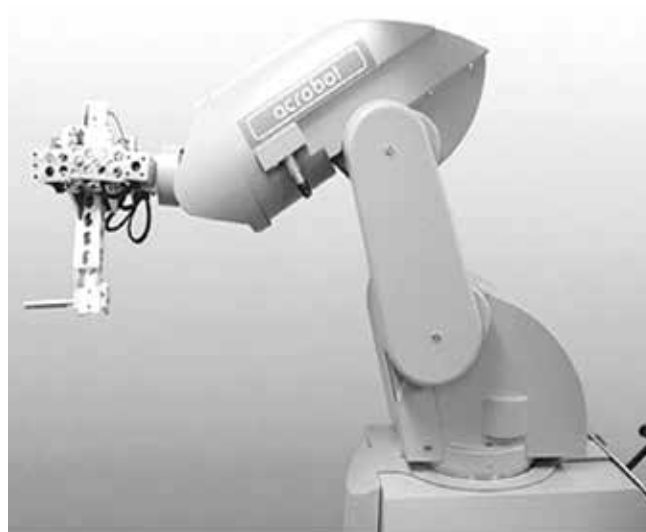
История развития хирургических роботических систем начинается с использования в 1985 г. в нейрохирургической операции системы PUMA-560 для выполнения точной биопсии головного мозга под компьютерно-томографическим наведением.

В 1988 г. для выполнения автоматизированной трансуретральной резекции предстательной железы была разработана роботическая система Probot. В том же году была выполнена первая резекция. Для этого в предоперационном периоде была сконструирована 3D-модель предстательной железы, края резекции были очерчены хирургом, а траектории движения резектоскопа рассчитаны роботической системой.

Robodoc (IBM) стал первой роботической системой для применения в ортопедии при протезировании тазобедренных суставов. В последующем появлялись усовершенствованные модели, обладающие способностью в автоматическом режиме выполнять необходимые манипуляции для завершения процедуры замещения тазобедренного сустава (Caspar system, Acrobot).

К 1995 г. была разработана нейрохирургическая роботическая система Minerva, использующая данные динамической компьютерной томографии, что позволяло вносить коррективы в ход процедуры в режиме реального времени.

В 1994 г. компания Computer Motion изготовила первого робота-хирурга, получившего сертификат US FDA — Automated Endoscopic System for Optimal Positioning (AESOP). Изначально система разрабаты-



Роботическая система Acrobot⁵
Acrobot Robot System⁵

валась NASA для космической программы. Это была механическая рука, предназначенная для автоматического изменения положения эндоскопа. Двумя годами позже AESOP «приобрел» слух и смог выполнять голосовые команды хирурга.

Следующим шагом в эволюции роботической хирургии стало развитие дистанционной телероботической хирургии. Концепция данного проекта состояла в том, что хирург находится у консоли, а компьютер транслирует его движения на манипуляторы, расположенные в организме пациента. Непосредственно теле-робот должен находиться у операционного стола и быть способным манипулировать не только камерой, но и несколькими «руками» с инструментами. Разработки в области роботической дистанционной телемедицины были одновременно начаты тремя государственными организациями в США, что привело к созданию военного прототипа, способного обеспечить помощь раненым непосредственно на поле боя. При этом хирург находился глубоко в тылу и осуществлял манипуляции дистанционно при помощи телевизионной трансляции.

Компании Intuitive Inc. (Sunnyvale, CA, США) удалось выкупить создаваемый военными организациями прототип роботической системы для применения в гражданских целях. Результатом стало появление хирургической роботической системы da Vinci, основанной на принципах дистанционной телемедицины и являющейся неоспоримым лидером в области роботической хирургии.

⁴ URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Isaac_Asimov&utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera

⁵ URL: https://www.clave-orthopedie-nice.com/rappel-historique-des-protheses-totales-de-genou/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera

В настоящее время доступны для использования две роботические хирургические системы: система ZEUS и система da Vinci.

Компания Computer Motion разработала и представила роботическую систему ZEUS в 1990 г. Основана система на базе AESOP и имеет две подсистемы — хирурга и пациента. Подсистема хирурга состоит из консоли с видеомонитором и двумя рукоятками, контролирующими работу манипуляторов. Манипуляторы удерживают инструменты. Консоль хирурга может быть расположена в любом месте в пределах операционной. Подсистема пациента состоит из трех роботических рук, прикрепленных к операционному столу.

Изначально хирургическая система ZEUS была создана для кардиохирургических манипуляций, и лишь затем произошла ее валидизация в других областях (общей хирургии, гинекологии и урологии). Несмотря на работы, сообщающие об успешном выполнении серий кардиохирургических операций, система обладает целым рядом ограничений. Ее громоздкость сильно осложняет формирование операционной. Неправильное расположение трокаров полностью блокирует выполнение всего оперативного вмешательства. Отсутствие тактильной чувствительности диктует хирургу необходимость полагаться на собственную интуицию в ряде моментов. При этом сами инструменты обладают лишь шестью степенями свободы. Самым главным ограничением является 3D-визуализация. Необходимость наличия специальных очков для преобразования 2D- в 3D-сигнал резко затрудняет выполнение операций.

Система da Vinci состоит из трех компонентов: консоли хирурга, тележки пациента и оптической системы.

Консоль хирурга является панелью управления всей системы и местом работы оператора, управляющего тремя инструментами-манипуляторами и камерой тележки пациента при помощи двух джойстиков и ножных педалей.

Движения рук хирурга полностью копируются джойстиками и передаются на манипуляторы, нивелируя тремор и обеспечивая возможность прецизионной диссекции. Ножные педали обеспечивают активацию процесса коагуляции (система оснащена моно- и биполярными типами коагуляции), переключение между рабочими манипуляторами и камерой, а также фокусировку оптической системы. При помощи консоли хирург обладает возможностью удаленного управления системой, поэтому консоль может быть расположена за пределами операционной.

Валидизация системы da Vinci была начата кардиохирургами. В 1999 г. опубликовано первое сообщение



Консоль хирурга роботической хирургической системы da Vinci
Surgeon's console of the da Vinci Robotic Surgical System

об успешном выполнении аортокоронарного шунтирования при помощи хирургической системы da Vinci.

НАСТОЯЩЕЕ

Роботохирургия продолжает стремительно развиваться, завоевывая все больше и больше направлений в медицине. Стала реальностью так называемая трансконтинентальная телероботохирургия. В 2001 г. хирурги успешно удалили желчный пузырь с помощью дистанционно управляемой роботической системы, установленной в одном из госпиталей Франции, находясь от пациентки на расстоянии 7000 км, в Нью-Йорке. Современные средства связи обеспечили передачу сигналов в обоих направлениях (от видеокamеры лапароскопа к хирургу и обратно — от станции управления к роботу) по трансатлантическому волоконно-оптическому кабелю. В настоящее время активно развиваются трансоральная роботическая хирургия, хирургия головы и шеи, гинекологическая роботическая хирургия.

Продолжаются работы по созданию новых роботов. Уже доступна однопортовая модель системы



Тележка пациента роботической хирургической системы da Vinci 2000
Patient cart of the da Vinci 2000 Robotic Surgical System

da Vinci — da Vinci SP. Новые возможности манипуляторов и визуального контроля позволят довести до совершенства оперативные вмешательства на бьющемся сердце. «Руки» робота смогут двигаться в такт сокращениям, постоянно оставаясь на одинаковом расстоянии от зоны оперативного вмешательства и как бы нивелируя колебания стенки сердца. При этом операционное поле, которое хирург видит на экране, будет оставаться неподвижным. Уже сегодня возможно внедрение в интерфейс роботической системы данных магнитно-резонансной, компьютерной томографии и трансректального ультразвукового исследования, выполняемых в режиме реального времени.

БУДУЩЕЕ

Некоторые направления медицины с нетерпением ждут появления микророботической хирургии. Одно из таких направлений — стереотаксическая хирургия головного мозга. Футуристической разработкой в этом направлении является система, предложенная Wieneke и Lutze, состоящая из миниатюрных инструментов с размером внешнего тубуса всего 0,63 мм и микроэндоскопической системы трокаров. Посредством электронного управления, при отсутствии кабелей и механических систем управления, устройство направляется непосредственно к точке своего применения — патологическому очагу. Все инструменты выполнены из материалов повышенной эластичности (никель-титановый сплав). Несложно предположить, что роботические инструменты будущего — это устройства крайне малого размера, проводимые в организм человека через миниатюрные трокеры.

Лауреат Нобелевской премии физик Ричард Фейнман в своей лекции «Там внизу много места» (Plenty

of Room at the Bottom) в 1959 г. предположил, что существует теоретическая возможность манипуляции субстанциями на молекулярном уровне.

На сегодняшний день в разработке находятся несколько нанотехнологических направлений в медицине, некоторые из них имеют отношение к диагностике патологических состояний. Прежде всего это применение искусственных магнитных кристаллов, способных обнаружить патогены. Другое направление нанотехнологии сосредоточено на полупроводниковых кристаллах — квантовых «точках», способных отражать фотоны только в одной длине волны. Данные субстанции способны прикрепляться к последовательности ДНК и, отражая фотоны, формировать некий «штрихкод», позволяющий выявить недостатки последовательности. Есть данные о разработке наночипов, способных быть внедренными в организм и защищать от воздействия патогенов те или иные клетки.

Применение указанных методик (и не только их) на сегодняшний день кажется чем-то из разряда фантастики, но многие авторы называют их технологиями будущего.

Современное поколение робот-ассистированных систем предоставляет специалистам превосходную стереотаксическую визуализацию. Тем не менее разработка и внедрение в рутинную практику дополнительных интраоперационных способов визуализации и/или совмещение предоперационных методов визуализации с реальной картиной операционного поля позволит повысить аккуратность и прецизионность вмешательств, а также безопасность при их выполнении. Например, отсутствие тактильной чувствительности может быть с лихвой перекрыто улучшенной визуализацией. Большинство исследований в данной области



Робот-ассистированная хирургическая система Amadeus
Amadeus surgical robot

сфокусировано на идентификации нормальных анатомических структур, таких как нервы или артерии, а также патологических тканей (опухолей, лимфатических сосудов, хирургического края с положительным статусом). Сегодня мы находимся на пороге очередной смены парадигмы в сторону совмещения различных технологий и инноваций на поле робот-ассистированной хирургии и реальной интраоперационной картины. Отметим наиболее значимые из них.

Робот-ассистированная радикальная простатэктомия: возможности технологического улучшения

Повсеместное распространение скрининга уровня простатического специфического антигена привело к выявлению не только агрессивных опухолей, но и большого количества клинически незначимых случаев рака предстательной железы, равно как и случаев низкого риска. Для оперативного лечения рака предстательной железы (как низкого, так и высокого риска) в развитых странах часто предлагается робот-ассистированная радикальная простатэктомия. На сегодняшний день доля таких вмешательств превышает 80 % от общего числа случаев оперативного лечения рака предстательной железы в США. В России робот-ассистированная технология продолжает набирать популярность, но ввиду малого количества установленных хирургических систем доля робот-ассистированных операций не столь велика.

Робот-ассистированная парциальная нефрэктомия: возможности технологического улучшения

В последние годы налицо рост частоты почечно-клеточной карциномы по всему миру. Рекомендации всех профессиональных ассоциаций говорят о резекции почки как о методе выбора оперативного лечения

опухолей почки малого размера. Робот-ассистированная парциальная нефрэктомия приобретает повсеместно все большую популярность, доказывая свое превосходство над открытой и лапароскопической техниками.

Системы молекулярной визуализации

Системы молекулярной визуализации играют потенциальную роль при визуализации микроскопических структур и специфических тканей. Инфракрасная флуоресцентная спектроскопия давно известна всем урологам благодаря интегрированной в робот-ассистированную платформу системе FireFly. В настоящее время инфракрасная флуоресцентная спектроскопия используется в основном для идентификации анатомических структур и подтверждения ишемии или перфузии. Однако применение данной системы этим не ограничено. Спектроскопия и конфокальная микроскопия являются наиболее изучаемыми техниками, которые могут быть полезны в урологической робот-ассистированной хирургии. Другие варианты молекулярной визуализации в настоящее время находятся на ранней стадии изучения. К ним относятся когерентная оптическая томография, мультифотонная микроскопия и фотоакустическая визуализация.

Инфракрасная флуоресцентная визуализация

Данная система использует флуорофор в качестве контрастного агента для обеспечения визуализации в режиме реального времени анатомических структур с порогом глубины до нескольких миллиметров. В настоящее время наиболее популярным неспецифическим флуорофором, используемым в урологической практике, является индоцианин зеленый. Этот водорастворимый агент не является радиоактивным,

не оказывает нефротоксического эффекта благодаря тому, что связывается с белками плазмы (альбумином).

Конфокальная лазерная эндомикроскопия

Конфокальная лазерная эндомикроскопия — это микровизуализация в реальном времени, впервые нашедшая применение в гастроэнтерологии. На сегодняшний день в урологии в основном было изучено ее использование для визуализации рака мочевого пузыря. В данной методике контрастным агентом выступает флюоресцеин. Оптоволоконный датчик применяется для визуализации в режиме реального времени. При этом отображается лишь узконаправленный пучок света, проходящий через оптоволокно. Для достижения большей глубины проникновения и более четкого изображения возможно применение более широких датчиков.

Спектроскопия

Спектроскопия — метод визуализации, основанный на взаимодействии светового и другого излучения при прохождении через ткань и биологические среды. Она в режиме реального времени предоставляет данные для дифференцировки злокачественной и доброкачественной ткани при выполнении парциальной нефрэктомии.

Системы органной визуализации

Визуализация органов при помощи компьютерной, магнитно-резонансной томографии и ультразвука является стандартом предоперационного обследования пациентов. Все чаще и чаще специалисты говорят о необходимости выполнения оперативного вмешательства под контролем визуализации в режиме реального времени. Целью является интеграция важнейшей информации непосредственно в операционное поле.

Ультразвук и компьютерная томография

Одним из очевидных недостатков минимально инвазивной хирургии является отсутствие тактильной чувствительности. Детальная визуализация в режиме реального времени позволяет хирургу компенсировать ее отсутствие.

Ультразвук для робот-ассистированной резекции почки

При выполнении робот-ассистированной резекции почки ультразвуковое исследование, проводимое интраоперационно, может быть очень полезно, поскольку оно предоставляет информацию о точной локализации опухоли, даже полностью интрапаренхиматозной, что резко снижает частоту положительного статуса хирургического края.

Ультразвук для робот-ассистированной радикальной простатэктомии

Применение ультразвуковой технологии в ходе выполнения робот-ассистированной радикальной простатэктомии продемонстрировало многообещающие результаты, поскольку облегчает идентификацию ключевых анатомических структур.

Дополненная реальность

Альтернативным томографии и ультразвуку методом, использующим только дооперационные изображения и не требующим наличия дорогостоящего оборудования, является дополненная реальность. Весь процесс ее построения заключается в четырех основных моментах: регистрации, слежении, деформации и выводе на дисплей.

Симуляционные технологии в робот-ассистированной хирургии

Освоение новых навыков — всегда сложная задача. Обычно мы начинаем с наблюдения за кем-то, чтобы собрать как можно больше информации. Затем уточняем детали, чтобы заполнить пробелы в знаниях, и, наконец, сами стараемся повторить.

* * *

Отсутствие эффективных программ хирургической подготовки — это лишь верхушка айсберга, обнаруженная в последнее десятилетие. Действительно, проблема кажется не только качественной, но и количественной, учитывая нехватку врачей, которая предсказывается в глобальном масштабе.

За последние два десятилетия мы пережили невиданные ранее изменения. Беспрецедентное количество «прорывных» технологий стало невероятно популярным: персональные компьютеры, интернет, смартфоны и социальные сети — и это лишь некоторые из них. И с каждым днем горизонты познания будут стремительно расширяться. Именно поэтому так важно обратить особое внимание на такие направления, как стандартизация обучения, разработка симуляторов, моделирование и системный анализ, разработка и внедрение протоколов и многие другие. К сожалению, невозможно вместить в рамки обзорной статьи все аспекты и направления робот-ассистированной хирургии. Но более подробно ознакомиться с аргументацией и фактами можно в новой книге под авторством К.Б. Колонтарева и Д.Ю. Пушкаря «Робот-ассистированная хирургия предстательной железы».

Константин Борисович Колонтарев,

доктор медицинских наук, профессор, заместитель руководителя и заведующий операционным блоком Московского урологического центра ГБУЗ «Московский многопрофильный научно-клинический центр им. С. П. Боткина Департамента здравоохранения г. Москвы»