

Роботы в краниальной нейрохирургии, эволюция за 35 лет

А.Ю. Дмитриев^{1,2} ✉, В.Г. Дашьян^{1,2}

Нейрохирургическое отделение для лечения больных с сосудистыми заболеваниями головного мозга

¹ ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»

Российская Федерация, 129010, Москва, Большая Сухаревская пл., 3.

² ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова» МЗ РФ

Российская Федерация, 127473, Москва, ул. Делегатская, 20, стр. 1.

✉ Контактная информация: Дмитриев Александр Юрьевич, кандидат медицинских наук, врач-нейрохирург, нейрохирургическое отделение для лечения больных с сосудистыми заболеваниями головного мозга ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ». Email: dmitriev@neurosklif.ru

РЕЗЮМЕ

В обзоре литературы описан 35-летний опыт работы с роботами в краниальной нейрохирургии. Представлен краткий исторический очерк и указаны предпосылки развития робототехники. Перечислены наиболее известные устройства, используемые для позиционирования хирургических инструментов и дистанционных манипуляций. Указаны ключевые особенности роботов, основные результаты их применения, представлены преимущества, недостатки и пути решения некоторых проблем. Показана точность роботизированных систем в сравнении с рамным стереотаксисом. В завершение приведены основные тенденции роботостроения в будущем.

Ключевые слова:

робот, краниальная нейрохирургия, *NeuroMate*, *Rosa*, *Renaissance*, *NeuroArm*

Ссылка для цитирования

Дмитриев А.Ю., Дашьян В.Г. Роботы в краниальной нейрохирургии, эволюция за 35 лет. *Журнал им. Н.В. Склифосовского неотложная медицинская помощь*. 2022;11(2):355–363. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2022-11-2-355-363>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Благодарность, финансирование

Исследование не имеет спонсорской поддержки

КТ — компьютерная томография
МРТ — магнитно-резонансная томография
США — Соединенные Штаты Америки

FDA — *Food and Drug Administration* (Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов в Соединенных Штатах Америки)

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нейрохирургии следует в двух направлениях. Во-первых, современные методы диагностики и новые хирургические инструменты расширяют показания к операциям при заболеваниях, ранее считавшихся некурабельными. Во-вторых, технические новшества позволяют выполнять вмешательства через минимально инвазивные доступы. Микрососудистый анастомоз, периневральный шов в глубине раны, удаление опухоли через узкий коридор требуют от хирурга большого опыта и физической выдержки. Манипуляции на миллиметровом уровне возможны с применением оптического увеличения. Но передвижения на субмиллиметровом уровне ограничены сопоставимым по амплитуде физиологическим тремором. Длительные высокоточные операции приводят к усталости рук хирурга. Узкая и глубокая рана часто бывает плохо освещена. Все эти факторы предрасполагают к развитию роботизированных систем, облегчающих выполнение таких операций.

Другим направлением медицинской робототехники является создание устройств для точного позиционирования хирургических инструментов. В краниальной хирургии это важно при взятии биопсии, локализации небольших глубинных опухолей и каверном, для уда-

ления гипертензивных гематом и установки внутри-мозговых электродов. Существующие навигационные системы также предназначены для решения подобных задач. Но погрешность безрамной навигации составляет 2–4 мм [1]. Рамный стереотаксис более точный (ошибка в пределах 1 мм) неудобен для использования [2]. Сочетание миллиметровой точности с комфортом работы является целью разработки роботов для точного позиционирования.

ИСТОРИЯ

Многие первые медицинские роботы разрабатывались с участием Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) и агентства обороны Соединенных Штатов Америки (США). Первая операция с использованием роботоассистенции была выполнена в 1985 году *Kwoh Y.S.* Использовали промышленный робот *Puma 560 (Programmable universal machine for assembly)*, разработанный компанией *General Motors* для немедицинских целей. Робот имел 6 степеней свободы, выполнял рамное стереотаксическое позиционирование биопсийной иглы. Аппарат быстрее человека вычислял точное расположение мишени и направлял на нее

хирургический инструмент [3, 4]. Первый робот, сертифицированный в США для стереотаксических процедур в нейрохирургии, был описан в 1987 году и носил название *NeuroMate* [5]. По точности он был сравним с рамным стереотаксисом, и его применяли на операциях по поводу двигательных нарушений.

Сложность нейрохирургических операций тормозила быстрое развитие робототехники [6]. В 1990 году *Adler J.R.* описал применение робота для радиохирургии, который позиционировал линейный ускоритель, подстраиваясь под незначительные движения пациента. Позднее данный аппарат стал известен как кибернож [7]. В 1991 году *Drake J.M.* использовал промышленный робот *Puma* для удаления 6 таламических астроцитом у детей [8]. Развитие данных роботов было основано на методе навигации. В 1991 году *Davies B.* применял активно двигающийся аппарат в хирургии мягких тканей. Он явился пророботом под названием "*Probot*", который затем использовали в урологии для трансуретральной простатэктомии [9]. Четырехосевой робот впервые был описан в 1992 году *Benabid A.L.* [10].

Первый телехирургический робот *SRI International* для открытой хирургии на органах брюшной полости был апробирован *Hill J.W.* в 1994 году. Затем он был модифицирован для лапароскопической абдоминальной хирургии [11]. Далее были разработаны роботы *The Zeus* и *daVinci*, изначально предназначенные для кардиохирургии. В 2001 году была выполнена дистанционная операция при помощи управляемого робота — лапароскопическая холецистэктомия, во время которой хирург находился на расстоянии 14 000 км от пациента. Операция продолжалась 54 минуты и закончилась хорошим исходом [12]. В нейрохирургии такие операции изначально проводили только на лабораторных животных и трупах. Обычно накладывали сосудистый шов [13].

NeuroBot был первым роботом в нейрохирургии, работающим по принципу удаленного управления ("*master-slave*"), который использовали для имитации нейрохирургической операции на трупе. С его помощью в 2002 году выполнили эндоскопическую тривентрикуломию и диссекцию латеральной щели [14]. В 2003 году *Goto T. et al.* впервые применили его в операционной, удалив часть атипичической менингиомы [15].

Все медицинские роботы можно классифицировать на четыре типа: активные устройства для определения расположения цели, пассивные аппараты для выполнения удаленных манипуляций, автономные приборы и вспомогательные роботизированные системы.

РОБОТЫ ДЛЯ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Данные устройства выполняют точное позиционирование хирургического или диагностического инструмента в операционной ране. Механизм их работы аналогичен нейронавигации. Перед операцией проводят загрузку в рабочую станцию робота предоперационных снимков с данными нейровизуализации. После этого компьютерная программа формирует виртуальную модель головы пациента. Интраоперационно после укладки пациента и жесткой фиксации его головы происходит сопоставление реальной поверхности головы пациента и ее виртуальной модели. Для этих целей часто применяют рентгенконтрастные маркеры, закрепленные на голове. Зная координаты головы пациента и расположенной в ней цели, робот при

помощи электродвигателей подводит к ней рабочий инструмент [4].

Для этих целей в краниальной нейрохирургии применяют 8 роботов. Шесть из них используют на основном этапе операции, два — для выполнения краниотомии.

NeuroMate представляет собой роботизированную руку с 6 степенями свободы. Был разработан компанией *Integrated Surgical Systems* в 1987 году [4]. После одобрения *Food and Drug Administration (FDA)* в нейрохирургии впервые был применен в 1997 году. Точность его установки в клинической практике — 0,86–1,77 мм, что сопоставимо с результатами рамного стереотаксиса. Аппарат использовали для выполнения биопсий с точностью 86%, установки электродов для инвазивной кортикографии и глубинной подкорковой стимуляции. Описано его применение для проведения прицельной химиотерапии. Недостатками робота являются большой размер, высокая стоимость и сложность обучения работе с ним [16–19]. При установке электродов для стереоэлектроэнцефалографии в сочетании с безрамной системой *Neurolocate* робот продемонстрировал субмиллиметровую точность, превысившую результаты рамного стереотаксиса (0,67 мм против 0,76 мм) [20].

SurgiScope создан компанией *Intelligent Surgical Instruments and Systems (ISIS)*, Франция [19]. Является операционным микроскопом с потолочным креплением на рельсах для точного позиционирования. Имеет 7 степеней свободы. Ошибка прибора — 1,5–1,6 мм. Первое применение описано в 2003 году. Его точность при взятии биопсий составляет 98% [21], а при вентрикуломиях — 100% [22]. Робот применяли при установке электродов для стереоэлектроэнцефалографии. Его недостатком является большой размер [17].

ROVOT-m создан фирмой *Synaptive Medical* (Канада). Представляет собой систему автоматического позиционирования экзоскопа под контролем нейронавигации. Аппарат применяли для удаления интратимозговых гематом, опухолей, сосудистых мальформаций, клипирования аневризм и лечения невроаскулярного конфликта с хорошими функциональными исходами [23].

Rosa спроектирован компанией *MedTech* (Франция). Является роботизированной рукой с 6 степенями свободы и имитацией осязания. Был одобрен *FDA* в 2009 году [24]. Базируется на мобильной платформе, жестко фиксированной к черепу пациента. Используют в рамном и безрамном режимах. Первое описание применения в нейрохирургии датировано 2012 годом. Робот использовали для установки электродов при паркинсонизме (положительный эффект описан в 55%), взятии биопсий (информативность 100%, точность 97%), с целью установки электродов для инвазивной кортикографии, стереотаксической радиочастотной термоабляции, в эндоскопической вентрикулярной и трансназальной хирургии, а также при краниофациальных реконструктивных операциях. В зависимости от способа регистрации и места установки устройства по отношению к цели ошибка позиционирования варьирует от 0,52 до 1,75 мм [25–27]. Точность операций с применением робота *Rosa* выше, чем с использованием рамного стереотаксиса (0,76 мм против 1,11 мм). При установке электродов в подкорковые ядра максимальная погрешность составила 1,52 мм, тогда как при механической навигации

в 9% превысила 2 мм. Роботоассистенция уменьшает продолжительность хирургического вмешательства в сравнении с рамным стереотаксисом. Наиболее отчетливо данное различие прослеживается при локации нескольких целей, так как перемещение робота между ними происходит очень быстро без необходимости перемонтажа системы [24]. Недостатками агрегата являются большие размеры, необходимость расположения рядом с головой пациента, высокая стоимость и сложность освоения [17].

Renaissance (*SpineAssist*, *Mazor X*) разработаны фирмой *Mazor Robotics Ltd.* (Израиль). Робот первого поколения называется *SpineAssist*, второго — *Renaissance*, третьего — *Mazor X*. Первые два устройства представляют собой миниатюрные приборы с 6 степенями свободы, жестко фиксируемые к черепу, *Mazor X* является роботизированной рукой. При операциях на головном мозге робот начали применять в 2015 году. Погрешность работы не превышает 1,0–1,5 мм. При выполнении биопсий с его помощью точность составляет 89%. Его главным преимуществом является компактность. Особенно удобно использовать робот для взятия нескольких рядом расположенных биопсий. Недостатки агрегата — небольшая рабочая площадь, при смещении с которой требуется ручной перемонтаж, а также необходимость выполнения компьютерной томографии (КТ) для предоперационной регистрации (референтная рамка несовместима с магнитно-резонансной томографией (МРТ)) [17, 28]. Робот *Renaissance* наиболее часто применяют в нейрохирургии, с его помощью выполнено около 10 000 операций [29].

iSYS1 создан в *iSYS Medizintechnik* (Австрия). Это миниатюрный робот с 4 степенями свободы. Изначально был использован в инвазивной рентгенологии, позже получил применение в нейрохирургии, при взятии биопсий, вентрикулостомии [30] и имплантации электродов при эпилепсии [31]. Первая публикация о его использовании вышла в 2016 году. Погрешность устройства в экспериментах на фантоме и трупах составляет 0,6–0,8 мм. Точность прибора *in vivo* — 1–2 мм. Преимущества робота — малые размеры, низкая стоимость и простота использования, а недостаток — необходимость ручной переустановки при изменении области манипуляций (например, при взятии нескольких биопсий или установке глубинных электродов) [30–32].

Робот на основе технологии CAD-CAM (*computer-aided design/computer-aided manufacturing*) — программно-аппаратный комплекс, разработанный для выполнения сложных краниотомий. При помощи бора способен накладывать фрезевые отверстия и стачивать кость. Прибор имеет 2 важные функции. Первая предусматривает наличие обратной связи в зависимости от данных электронейромиографии: аппарат автоматически останавливается рядом с лицевым нервом. Вторая опция предусматривает концепцию безопасной зоны: робот не способен пересечь защищенную границу, выделенную до операции. Устройство испытывали на трупах при выполнении транслабиринтного доступа. Точность позиционирования робота составила 1 мм, а длительность краниотомии — 2,5 минуты [33].

Craniobot представлен фирмой *LabMaker* (Германия). Является экспериментальным трехосевым роботом для выполнения краниотомий. Разработан на основе аппарата для резки дерева, применяемого для выполнения кустарных поделок. Позиционируя

сверло в нужной точке, робот определяет ее координаты при КТ, рассчитывает толщину кости в этом месте, после чего накладывает фрезевое отверстие при помощи бора. Высокая точность аппарата предотвращает повреждение твердой мозговой оболочки и структур головного мозга. В экспериментах на мышах в 97% опытов ошибка позиционирования составила менее 6 мкм. Наложение 40 мини-отверстий в черепе занимало 4 минуты 40 секунд, а выполнение краниотомии диаметром 3 мм — 50 секунд. Преимуществами устройства является его невысокая стоимость и возможность программирования при помощи *G-code* скриптов. Робот пока не применяли в клинической практике [34].

Все современные роботы имеют точность позиционирования, сопоставимую или выше в сравнении с другими стереотаксическими устройствами. Однако их применение чаще приводит к осложнениям (8–10%) [17, 35–39]. Большое количество шарниров повышает число степеней свободы и точность устройства, но это увеличивает численность двигателей, усложняет конструкцию и алгоритм позиционирования прибора [4]. Постоянное применение роботов для точного позиционирования приводит к потере навыков нейрохирургом. Это не имеет клинического значения при наличии роботизированных систем. Но при потере возможности их использования качество хирургических вмешательств может снижаться [40].

Другие роботы (*PUMA*, *Minerva*, *Zeiss MKM*, *Telerobot*, *Acubot*, *Evolution 1*, *RobaCKa*, *NeuroMaster*, *PathFinder*, *LWR-II*, *NISS*, *STIN*, *CRANIO*) представляют больше исторический интерес, в настоящий момент сняты с производства, и в нейрохирургии их не применяют [17].

РОБОТЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННЫХ МАНИПУЛЯЦИЙ

Данные программно-аппаратные комплексы, работающие по типу “*master-slave*”, являются промежуточным звеном между хирургом и манипуляторами. При их использовании оператор работает исключительно компьютерными джойстиком на основании изображения с видеокamer, выводимых на монитор, и не касается операционной раны. Все хирургические манипуляции выполняет непосредственно робот при помощи микроманипуляторов [4].

Эти роботы имеют следующие преимущества.

1) Позволяют выполнять манипуляции хирургом, находящимся на большом расстоянии. Опытный хирург может оперировать пациентов в разных госпиталях, расположенных за тысячи километров [12].

2) Могут работать в опасных условиях, например, в условиях рентгеновского излучения [41].

3) Исключают тремор рук, повышают точность движений за счет того, что амплитуда перемещений рук хирурга многократно масштабируется в более тонкие манипуляции [41, 42].

4) Дают возможность одновременно жестко удерживать несколько инструментов (более двух), например, камеру эндоскопа, ирригатор, аспиратор, зажим, иглодержатель [43].

5) Позволяют перемещать инструмент лишь в разрешенной зоне, даже при приложении усилия [42].

Основные недостатки таких роботов:

1) требуют много времени для освоения;

2) значительно увеличивают продолжительность манипуляций;

3) не способны точно передать чувство осязания тканей пациента;

4) высокая стоимость;

5) имеют большие размеры и неудобны в использовании [44].

Для выполнения удаленных нейрохирургических манипуляций разработаны следующие роботы.

NeuroRobot разработан в медицинском университете Синсю (Япония) для выполнения минимально инвазивных операций. Это управляемый робот, все манипуляции с пациентом осуществляются через цилиндрическую трубку диаметром 10 мм. Через нее проводят стереоэндоскоп диаметром 4 мм, 2–3 микроманипулятора, трубка имеет каналы для ирригации и аспирации. Рабочие инструменты диаметром 1 мм имеют 3 степени свободы, включают микрозажимы, микрокрючок, микроиглу, биполярный коагулятор, аспиратор и лазер. Точность манипуляций достигает 20 мкм. Робот опробовали при выполнении диссекции латеральной и межполушарной щелей, вентрикулоцистерностомии на трупe, энцефалотомии, вазотомии и гемостаза на крысах (расстояние между микроманипулятором и блоком управления составило 40 км), а также при удалении части менигиомы намета мозжечка у пациента с продолженным ростом опухоли (часть опухоли резецировали лазером). В настоящий момент усилия разработчиков направлены на повышение быстродействия сети для снижения задержки при применении робота [14, 15, 19, 45].

Роботизированная платформа ММ-3 разработана *Akio Morito's group* в университете Токио. Представляет собой 2 микроманипулятора с динамической масштабируемостью амплитуды движений и стереомикроскоп. Система предназначена для выполнения микрососудистых манипуляций на субмиллиметровом уровне под контролем микроскопа, к примеру, наложения микрососудистого шва. Размер таких объектов сопоставим с амплитудой физиологического тремора рук хирурга. Масштабируемость движений и отсечение тремора делают такие процедуры возможными. Первоначально аппарат применили для наложения соустьев на искусственных сосудах. Для анастомоза «конец в конец» использовали микротрубочки диаметром 0,3 мм, а «конец в бок» — 0,5 мм. Затем систему применили для наложения 20 анастомозов на крысах и для выполнения различных доступов на трупах. Применение робота уменьшило погрешность в 2 раза (с 80 до 44 мкм). Система имеет высокую точность, но ее использование значительно удлиняет операцию в сравнении с затратами времени опытным хирургом. Это касается как всей процедуры, так и отдельных микроманипуляций. Опыт работы способен решить данную проблему [46, 47]. Главным отличием платформы ММ-3 от других роботизированных систем является возможность настройки взаимодействия между оператором и исполняемым устройством. Выделяют 4 режима работы. При фиксированном режиме масштабируемость движений не изменяется на протяжении всей манипуляции, при целевом — возрастает при уменьшении расстояния между кончиками манипулятора и целью, при исполняемом — увеличивается при меньшем расстоянии между кончиками манипулятора, в скоростном — зависит от темпа работы хирурга (уменьшается с возрастанием). В ходе экспериментального тестирования наиболее комфортным и быстрым оказался исполняемый режим в диапазо-

не 0,2–0,5 (амплитуда перемещения микроманипуляторов в 2–5 раз короче движений рук оператора). В настоящий момент ведутся работы по автоматизации выбора режима масштабирования на основании опыта хирурга [48].

NeuroArm является наиболее усовершенствованной роботизированной управляемой системой. Была разработана в Университете Калгари (Канада) в 2001 году [4]. Состоит из двух рук-манипуляторов, соединенных с рабочей станцией посредством контроллера. Каждый манипулятор имеет 7 степеней свободы и датчики давления на рабочих концах. Аппарат позволяет выполнять стереотаксические и микрохирургические манипуляции в магнитном поле с индукцией до 3,0 Тл. Система обеспечивает бинокулярное зрение посредством двух видеокамер и поляризационных очков. Микрофон позволяет хирургу слышать звуки в операционной. Тактильное чувство обратной связи достигается прикреплением к манипуляторам робота 2 датчиков давления, оценивающих прикладываемые усилия в 3 проекциях, хотя полученное чувство осязания и не является идеальным [19]. Робот содержит фильтр тремора с возможностью выставлять разную частоту его отсека. Скорость движения руки робота варьирует от 1 до 200 мм/с. Масштабируемая шкала позволяет изменять амплитуду его движений от 1/1 до 1/20. Специальная опция позволяет роботу проводить прямую линию, даже если рука хирурга не движется строго по прямой. Точность *NeuroArm* составляет 50 мкм, что близко к хирургии на клеточном уровне. Робот устойчиво удерживает хирургические инструменты и позволяет выполнять хирургические манипуляции через узкий анатомический коридор. Хирург располагается за рабочей станцией. На несколько мониторов выводится изображение интраоперационной МРТ и операционной раны. Имеется возможность подключения к Интернету для получения справочной информации. При отклонении движения манипулятора от запланированной траектории включается автостоп. Также хирург произвольно может заблокировать движение манипулятора, нажав на педаль. Интересной опцией является возможность проектирования при МРТ виртуального хирургического коридора, после чего все манипуляции робота будут разрешены лишь в его пределах. Даже при приложении хирургом усилия манипулятор не пересечет ограничительную линию. Аппарат был опробован на фантомах, лабораторных животных и трупах. С одинаковой точностью выполняли спленэктомию, нефрэктомия и удаление поднижнечелюстной железы на крысах с роботом и без него. В клинической практике впервые прибор был использован в 2008 году для удаления образования головного мозга у 21-летнего пациента. После одобрения FDA при помощи робота прооперировали 35 больных с опухолями, каверномами и абсцессом мозга. Хирург находился вне операционной, ассистент — напротив *NeuroArm*. Лишь в одном наблюдении приходилось прекращать операцию с применением робота и переходить на обычную хирургию из-за узкого коридора, ограничивающего одновременный обзор хирурга и ассистента. Средняя продолжительность операций составила 4,5 часа, что сопоставимо с обычной хирургией. Применение телеробота требует длительного обучения: хирург получает уверенность при работе с ним после проведения 20 операций [41, 43, 49–51]. Всего с помощью робота было осуществлено более

1000 операций: удаляли гематомы, ушивали раны, брали биопсии и выполняли цистернальную диссекцию [19].

ROBOCAST разработан фирмой *KUKA Roboter GmbH* (Германия). Представляет собой комбинацию двух ранее созданных роботов *KUKA LWR 4*. Это 2 манипулятора, работающие в двух режимах. В автономном варианте робот применяют для точного позиционирования инструментов в хирургическом поле. В дистанционном режиме периферийные устройства повторяют действия хирурга, компенсируя любые движения черепа [29].

Robot-assisted microsurgery system (RAMS) был разработан в совместной программе Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института и компании *Microdexterity Systems Inc* (США). Представляет собой телеуправляемую систему с 6 степенями свободы. Аппарат совместим с МРТ, предназначен для микрохирургии, включая нейрохирургию, офтальмологию и пластическую хирургию. Робот применяли при экспериментальной эндуартерэктомии на крысах, но использование устройства значительно увеличивало продолжительность операции [19].

Робот **Da Vinci** — продукт компании *Intuitive Surgical* (США), предназначен для выполнения эндоскопических операций из мини-доступов. Состоит из 2 камер для стереоскопического зрения и 2–3 манипуляторов для фиксации рабочих инструментов. Имеет функцию фильтрации тремора и масштабирования движений. Изначально прибор был разработан для кардиохирургии, однако не нашел в ней широкого применения, так как кардиохирурги без робота могут выполнить все те же манипуляции с той же точностью, но быстрее. Робот *Da Vinci* применяют в лапароскопической хирургии, урологии и гинекологии. В нейрохирургии этот робот применяли для трансназального эндоскопического закрытия дефектов твердой мозговой оболочки на трупах [52], арахноидальной диссекции и наложения сосудистого шва на М1-сегмент средней мозговой артерии в кавернозных экспериментах [53]. Прибор использовали в спинальной нейрохирургии при удалении зубовидного отростка 2-го шейного позвонка, спинальной невриноме, выполнении переднего межтелового спондилодеза и внутриутробной пластики менингоцеле [4]. Робот *Da Vinci* громоздкий, неудобный, имеет несколько искусственных держателей инструментов, загораживающих обзор. Его применение в *key-hole* нейрохирургии возможно лишь при глубине раны до 2 см. Далее инструменты мешают друг другу и не позволяют погружать эндоскоп. Аппарат изначально не предназначен для применения в нейрохирургии и не нашел в ней широкого распространения [35, 44, 54]. Одним из путей решения проблемы могло бы стать уменьшение диаметра рабочих инструментов. Но длинные узкие манипуляторы под воздействием внешних сил способны отклоняться от намеченной траектории, что снижает точность манипуляций [4].

АВТОНОМНЫЕ РОБОТЫ

Разработать робота, самостоятельно принимающего решения, возможно двумя способами. Первый (явный) основан на программировании последовательности действий. В основе второго (неявного) лежит машинное обучение. Учитывая множество разных факторов, которые необходимо учесть при разработке алгоритма работы системы, наиболее актуальным представля-

ется второй способ. В настоящий момент автономно работающие роботы в нейрохирургии не созданы [55]. В абдоминальной хирургии описано устройство *STAR (Smart Tissue Autonomous Robot)*, предназначенное для наложения анастомоза. Аппарат способен работать в двух режимах: ручном и автоматическом. При автономном варианте компьютер самостоятельно выбирает место наложения шва в зависимости от контура разреза. При наложении анастомоза на кишечнике свиньи в автоматическом режиме робот выполнил эксперимент точнее и в 4 раза быстрее человека [56].

Процесс автономизации роботов может быть реализован в разной степени, от частичной до полной. При частичной автономности хирург контролирует работу автомата. Создание устройства, самостоятельно принимающего решения, основано на развитии компьютерных технологий, в частности, методов глубинного обучения. Применение таких аппаратов особенно актуально при невозможности вмешательства человека (опасные условия, боевые действия, большая удаленность). Их изготовление для медицины прогнозируют лишь через 50–100 лет [55].

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ РОБОТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Это аппарат **iArmS**, представляющий собой роботизированный подлокотник для поддержки руки хирурга. Разработан в университете Синсю (Япония). Является усовершенствованным вариантом ранее представленного прототипа *EXPERT*. Не имея двигателя, прибор не выполняет точного позиционирования хирургического инструмента. Его задача направлена на автоматическое следование за предплечьем оператора. Технически это осуществляется посредством магнитного поля между устройством и электромагнитным браслетом на руке хирурга. Робот снимает усталость, купирует тремор, повышает комфорт работы и уменьшает ее продолжительность [19, 57]. Устройство апробировали в краниальной микрохирургии и при эндоскопических трансназальных операциях. В отличие от пассивных подлокотников, робот автоматически следует за рукой хирурга, не отвлекая его от операции. Существуют варианты для правой и левой руки. Усилие более 10 кг останавливает систему. Дополнительно существует кнопка аварийной иммобилизации. Недостатками робота являются большие размеры и высокая стоимость [58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на весомые успехи, современная медицинская робототехника находится лишь на начальной стадии своего развития. Если роботы для точного позиционирования уже прошли клинические испытания, то устройства для дистантных манипуляций большей частью применялись лишь на фантомах, трупах и лабораторных животных. Развитие новых технологий, компьютерных систем, сетевых протоколов и технические идеи, поступающие, в том числе и от практикующих хирургов, являются основой для прогресса в этом направлении. Без учета стоимости оборудования главным недостатком роботов на текущем этапе их развития является удлинение хирургического вмешательства. Это связано с неестественностью управления автоматом в сравнении с прямыми хирургическими манипуляциями. Освоение робота требует длительного обучения, но, в конечном итоге, окупается уменьшением инвазивности операций.

С широким развитием машинного обучения наиболее перспективным является создание автономных роботов, способных самостоятельно принимать решения. Крупные информационные компании создали и постоянно обновляют программные продукты, облегчающие процесс глубокого обучения. В медицине их внедрение наиболее представлено в рентгенологии, активно ведется разработка компьютерных программ, облегчающих постановку диагноза и построения плана лечения. Совмещение искусственного интеллект

та с машиностроением является основой для создания автономных роботов нового поколения. Наибольшей сложностью при обучении таких систем является отсутствие крупных баз данных. Совершенствование алгоритмов проектирования нейронных сетей в сочетании с накоплением массивов хирургической информации позволит в будущем создать роботов, не уступающих опытному нейрохирургу в качестве и скорости выполнения хирургических вмешательств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Mascott CR, Sol JC, Bousquet P, Lagarrigue J, Lazorthes Y, Lauwers-Cances V. Quantification of true in vivo (application) accuracy in cranial image-guided surgery: influence of mode of patient registration. *Neurosurgery*. 2006;59(1 Suppl 1):146–156. PMID: 16888546 <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000220089.39533.4E>
- Landi A, Marina R, DeGrandi C, Crespi A, Montanari G, Sganzerla EP, Gaini SM. Accuracy of stereotactic localisation with magnetic resonance compared to CT scan: experimental findings. *Acta Neurochir*. 2001;143(6):593–601. PMID: 11534676 <https://doi.org/10.1007/s007010170064>
- Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayathi S. A robot with improved absolute positioning accuracy for stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1988;35(2):153–160. PMID: 3280462 <https://doi.org/10.1109/10.1354>
- Doulgeris JJ, Gonzalez-Blohm SA, Filis AK, Shea TM, Aghayev K, Vrionis FD. Robotics in neurosurgery: evolution, current challenges, and compromises. *Cancer Control*. 2015;22(3):352–359. PMID: 26351892 <https://doi.org/10.1177/107327481502200314>
- Benabid AL, Cinquin P, Lavallee S, Le Bas JF, Demongeot J, Rougemont J. Computer driven robot for stereotactic surgery connected to CT scan and magnetic resonance imaging: technological design and preliminary results. *Appl Neurophysiol*. 1987;50(1–6):153–154. PMID: 3329838 <https://doi.org/10.1159/000100701>
- Wang MY, Goto T, Tessitore E, Veeravagu A. Robotics in neurosurgery. *Neurosurg Focus*. 2017;42(5):E1. PMID: 28463607 <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS1785>
- Adler JR Jr, Murphy MJ, Chang SD, Hancock SL. Image-guided robotic radiosurgery. *Neurosurgery*. 1999;44(6):1299–1307. PMID: 10371630
- Drake JM, Joy M, Goldenberg A, Kreindler D. Computer and robot-assisted resection of thalamic astrocytomas in children. *Neurosurgery*. 1991;29(1):27–33. PMID: 1870684 <https://doi.org/10.1097/00006123-199107000-00005>
- Davies B. A review of robotics in surgery. *Proc Inst Mech Eng H*. 2000;214(1):129–140. PMID: 10718057 <https://doi.org/10.1243/0954411001535309>
- Benabid AL, Lavallee S, Hoffmann D, Cinquin P, Demongeot J, Danel F. Potential use of robots in endoscopic neurosurgery. *Acta Neurochir Suppl (Wien)*. 1992;54:93–97. PMID: 1595416 https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6687-1_14
- Hill JW, Jensen JF. Advanced telepresence surgery system development. *Stud Health Technol Inform*. 1996;29:107–117. PMID: 10163743
- Marescaux J, Leroy J, Rubino F. Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications. *Ann Surg*. 2002;235(4):487–492. PMID: 11923603 <https://doi.org/10.1097/0000658-200204000-00005>
- Le Roux PD, Das H, Esquenazi S, Kelly PJ. Robot-assisted microsurgery: a feasibility study in the rat. *Neurosurgery*. 2001;48(3):584–589. PMID: 11270549 <https://doi.org/10.1097/00006123-200103000-00026>
- Hongo K, Kobayashi S, Kakizawa Y, Koyama J, Goto T, Okudera H, et al. NeuRobot: telecontrolled micromanipulator system for minimally invasive microneurosurgery – preliminary results. *Neurosurgery*. 2002;51(4):985–988. PMID: 12234407 <https://doi.org/10.1097/00006123-200210000-00024>
- Goto T, Hongo K, Kakizawa Y, Muraoka H, Miyairi Y, Tanaka Y, et al. Clinical application of robotic telemanipulation system in neurosurgery. *J Neurosurg*. 2003;99(6):1082–1084. PMID: 17986838 <https://doi.org/10.3171/jns.2003.99.6.1082>
- Von Langsdorff D, Paquis P, Fontaine D. In vivo measurement of the frame-based application accuracy of the Neuromate neurosurgical robot. *J Neurosurg*. 2015;122(1):191–194. PMID: 25361490 <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS14256>
- Fomenko A, Serletis D. Robotic stereotaxy in cranial neurosurgery: a qualitative systematic review. *Neurosurgery*. 2018;83(4):642–650. PMID: 29253265 <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx576>
- Barua NU, Lewis SP, Woolley M, O'Sullivan S, Harrison R, Gill SS. Robot-guided convection-enhanced delivery of carboplatin for advanced brainstem glioma. *Acta Neurochir (Wien)*. 2013;155(8):1459–1465. PMID: 23595829 <https://doi.org/10.1007/s00701-013-1700-6>
- Mattei TA, Rodriguez AH, Sambhara D, Mendel E. Current state-of-the-art and future perspectives of robotic technology in neurosurgery. *Neurosurg Rev*. 2014;37(3):357–366. PMID: 24729137 <https://doi.org/10.1007/s10143-014-0540-z>
- Cardinale F, Rizzi M, d'Orto P, Casaceli G, Arnulfo G, Narizzano M, et al. A new tool for touch-free patient registration for robot-assisted intracranial surgery: application accuracy from a phantom study and a retrospective surgical series. *Neurosurg Focus*. 2017;42(5):E8. PMID: 28463615 <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS16539>
- Bekelis K, Radwan TA, Desai A, Roberts DW. Frameless robotically targeted stereotactic brain biopsy: feasibility, diagnostic yield, and safety. *J Neurosurg*. 2012;116(5):1002–1006. PMID: 22404667 <https://doi.org/10.3171/2012.1.JNS111746>
- Lollis SS, Roberts DW. Robotic catheter ventriculostomy: feasibility, efficacy, and implications. *J Neurosurg*. 2008;108(2):269–274. PMID: 18240921 <https://doi.org/10.3171/JNS/2008/108/2/0269>
- Gonen L, Chakravarthi SS, Monroy-Sosa A, Celix JM, Kojis N, Singh M, et al. Initial experience with a robotically operated video optical telescopic-microscope in cranial neurosurgery: feasibility, safety, and clinical applications. *Neurosurg Focus*. 2017;42(5):E9. PMID: 28463622 <https://doi.org/10.3171/2017.3.FOCUS1712>
- Neudorfer C, Hunsche S, Hellmich M, Majdoub FE, Maarouf M. Comparative study of robot-assisted versus conventional frame-based deep brain stimulation stereotactic neurosurgery. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2018;96(5):327–334. PMID: 30481770 <https://doi.org/10.1159/000494736>
- Pillai A, Ratnathankom A, Ramachandran SN, Udayakumaran S, Subhash P, Krishnadas A. Expanding the spectrum of robotic assistance in cranial neurosurgery. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*. 2019; 17(2):164–173. PMID: 30203040 <https://doi.org/10.1093/ons/opy229>
- Lefranc M, Capel C, Pruvot-Ocean AS, Fichten A, Desenclos C, Toussaint P, et al. Frameless robotic stereotactic biopsies: a consecutive series of 100 cases. *J Neurosurg*. 2015; 122(2):342–352. PMID: 25380111 <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS14107>
- Terrier L, Gilard V, Marguet F, Fontanilles M, Derrey S. Stereotactic brain biopsy: evaluation of robot-assisted procedure in 60 patients. *Acta Neurochir (Wien)*. 2019;161(3):545–552. PMID: 30675655 <https://doi.org/10.1007/s00701-019-03808-5>
- Grimm F, Naros G, Gutenberg A, Keric N, Giese A, Gharabaghi A. Blurring the boundaries between frame-based and frameless stereotaxy: feasibility study for brain biopsies performed with the use of a head-mounted robot. *J Neurosurg*. 2015;123(3):737–742. PMID: 26067616 <https://doi.org/10.3171/2014.12.JNS141781>
- Smith JA, Jivraj J, Wong R, Yang V. 30 years of neurosurgical robots: review and trends for manipulators and associated navigational systems. *Ann Biomed Eng*. 2016;44(4):836–846. PMID: 26467553 <https://doi.org/10.1007/s10439-015-1475-4>
- Minchev G, Kronreif G, Martinez-Moreno M, Dorfer C, Micko A, Mert A, et al. A novel miniature robotic guidance device for stereotactic neurosurgical interventions: preliminary experience with the iSYS1 robot. *J Neurosurg*. 2011;126(3):985–996. PMID: 27104847 <https://doi.org/10.3171/2016.1.JNS152005>
- Dorfer C, Minchev G, Czech T, Stefanits H, Feucht M, Pataraiia E, et al. A novel miniature robotic device for frameless implantation of depth electrodes in refractory epilepsy. *J Neurosurg*. 2017;126(5):1622–1628. PMID: 27494814 <https://doi.org/10.3171/2016.5.JNS16388>
- Legnani FG, Franzini A, Mattei L, Saladino A, Casali C, Prada F, et al. Image-guided biopsy of intracranial lesions with a small robotic device (iSYS1): a prospective, exploratory pilot study. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*. 2019;17(4):403–412. PMID: 30690491 <https://doi.org/10.1093/ons/opy411>
- Couldwell WT, MacDonald JD, Thomas CL, Hansen BC, Lalaplikar A, Thakkar B, et al. Computer-aided design/computer-aided manufacturing skull base drill. *Neurosurg Focus*. 2017;42(5):E6. PMID: 28463621 <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS16561>
- Ghanbari L, Rynes ML, Hu J, Schulman DS, Johnson GW, Laroque M, et al. Craniobot: a computer numerical controlled robot for cranial microsurgery. *Sci Rep*. 2019;9(1):1023. PMID: 30705287 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37073-w>
- Marcus HJ, Seneci CA, Payne CJ, Nandi D, Darzi A, Yang GZ. Robotics in keyhole transcranial endoscope-assisted microsurgery: a critical review of existing systems and proposed specifications for new robotic

- platforms. *Neurosurgery*. 2014;10(Suppl 1):84–96. PMID: 23921708 <https://doi.org/10.1227/NEU.000000000000123>
36. Каспарова К.А., Древал О.Н. Роботизированные системы в нейрохирургии. *Нейрохирургия*. 2012;(4):88–93.
 37. Zimmermann M, Krishnan R, Raabe A, Seifert V. Robot-assisted navigated endoscopic ventriculostomy: implementation of a new technology and first clinical results. *Acta Neurochir (Wien)*. 2004;146(7):697–704. PMID: 15197613 <https://doi.org/10.1007/s00701-004-0267-7>
 38. Zimmermann M, Krishnan R, Raabe A, Seifert V. Robot-assisted navigated neuroendoscopy. *Neurosurgery*. 2002;51(6):1446–1451. PMID: 12445350 <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000036095.14236.74>
 39. Kaushik A, Dwarakanath TA, Bhutani G, Moiyadi A, Chaudhari P. Validation of high precision robot-assisted methods for intracranial applications: preliminary study. *World Neurosurg*. 2020;137:71–77. PMID: 32032794 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.01.206>
 40. Panesar SS, Kliot M, Parrish R, Fernandez-Miranda J, Cagle Y, Britz GW. Promises and perils of artificial intelligence in neurosurgery. *Neurosurgery*. 2018;87(1):33–44. PMID: 31748800 <https://doi.org/10.1093/neuros/nyz471>
 41. Louw DF, Fielding T, McBeth PB, Gregoris D, Newhook P, Sutherland GR. Surgical robotics: a review and neurosurgical prototype development. *Neurosurgery*. 2004;54(3):525–537. PMID: 15028126 <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000108638.05274.e9>
 42. Nathoo N, Cavusoglu MC, Vogelbaum MA, Barnett GH. In touch with robotics: neurosurgery for the future. *Neurosurgery*. 2005;56(3):421–433. PMID: 15730567 <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000153929.68024.cf>
 43. Sutherland GR, Lama S, Gan LS, Wolfsberger S, Zareinia K. Merging machines with microsurgery: clinical experience with neuroArm. *J Neurosurg*. 2013;118(3):521–529. PMID: 23240694 <https://doi.org/10.3171/2012.11.JNS12877>
 44. Sekhar LN, Tariq F, Kim LJ, Pridgeon J, Hannaford B. Commentary: virtual reality and robotics in neurosurgery. *Neurosurgery*. 2013;72(Suppl 1):1–6. PMID: 23254797 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e31827db647>
 45. Hongo K, Goto T, Miyahara T, Kakizawa Y, Koyama J, Tanaka Y. Telecontrolled micromanipulator system (neurobot) for minimally invasive neurosurgery. *Acta Neurochir Suppl*. 2006;98:63–66. PMID: 17009702 https://doi.org/10.1007/978-3-211-33303-7_9
 46. Mitsuishi M, Morita A, Sugita N, Sora S, Mochizuki R, Tanimoto K, et al. Master-slave robotic platform and its feasibility study for micro-neurosurgery. *Int J Med Robot*. 2013;9(2):180–189. PMID: 22588785 <https://doi.org/10.1002/rcs.1434>
 47. Morita A, Sora S, Mitsuishi M, Warisawa S, Suruman K, Asai D, et al. Microsurgical robotic system for the deep surgical field: development of a prototype and feasibility studies in animal and cadaveric models. *J Neurosurg*. 2005;103(2):320–327. PMID: 16175863 <https://doi.org/10.3171/jns.2005.103.2.0320>
 48. Ko S, Nakazawa A, Kurose Y, Harada K, Mitsuishi M, Sora S, et al. Intelligent control of neurosurgical robot MM-3 using dynamic motion scaling. *Neurosurg Focus*. 2017;42(5):E5. PMID: 28463616 <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS16568>
 49. Sutherland GR, Wolfsberger S, Lama S, Zareinia K. The evolution of neuroArm. *Neurosurgery*. 2013;72(Suppl 1):27–32. PMID: 23254809 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318270da19>
 50. Lang MJ, Greer AD, Sutherland GR. Intra-operative robotics: NeuroArm. *Acta Neurochir Suppl*. 2011;109:231–236. PMID: 20960348 https://doi.org/10.1007/978-3-211-99651-5_36
 51. Sutherland GR, Latour I, Greer AD, Fielding T, Feil G, Newhook P. An image-guided magnetic resonance-compatible surgical robot. *Neurosurgery*. 2008;62(2):286–293. PMID: 18382307 <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000315996.73269.18>
 52. Kupferman ME, Demonte F, Levine N, Hanna E. Feasibility of a robotic surgical approach to reconstruct the skull base. *Skull Base*. 2011;21(2):79–82. PMID: 22451805 <https://doi.org/10.1055/s-0030-1261258>
 53. Hong WC, Tsai JC, Chang SD, Sorger JM. Robotic skull base surgery via supraorbital keyhole approach: a cadaveric study. *Neurosurgery*. 2013;72(Suppl 1):33–38. PMID: 23254810 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318270d9de>
 54. Marcus HJ, Hughes-Hallett A, Cundy TP, Yang GZ, Darzi A, Nandi D. Da Vinci robot-assisted keyhole neurosurgery: a cadaver study on feasibility and safety. *Neurosurg Rev*. 2015;38(2):367–371. PMID: 25516094 <https://doi.org/10.1007/s10143-014-0602-2>
 55. Panesar S, Cagle Y, Chander D, Morey J, Fernandez-Miranda J, Kliot M. Artificial intelligence and the future of surgical robotics. *Ann Surg*. 2019;270(2):223–226. PMID: 30907754 <https://doi.org/10.1097/SLA.00000000000003262>
 56. Leonard S, Wu KL, Kim Y, Krieger A, Kim PCW. Smart tissue anastomosis robot (STAR): a vision-guided robotics system for laparoscopic suturing. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2014;61(4):1305–1317. PMID: 24658254 <https://doi.org/10.1109/TBME.2014.2302385>
 57. Goto T, Hongo K, Yako T, Hara Y, Okamoto J, Toyoda K, et al. The concept and feasibility of EXPERT: intelligent armrest using robotics technology. *Neurosurgery*. 2013;72(Suppl 1):39–42. PMID: 23254811 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318271ee66>
 58. Ogiwara T, Goto T, Nagm A, Hongo K. Endoscopic endonasal transphenoidal surgery using the iArmS operation support robot: initial experience in 43 patients. *Neurosurg Focus*. 2017;42(5):E10. PMID: 28463614 <https://doi.org/10.3171/2017.3.FOCUS16498>
 11. Hill JW, Jensen JF. Advanced telepresence surgery system development. *Stud Health Technol Inform*. 1996;29:107–117. PMID: 10163743
 12. Marescaux J, Leroy J, Rubino F. Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications. *Ann Surg*. 2002;235(4):487–492. PMID: 11923603 <https://doi.org/10.1097/0000658-200204000-00005>
 13. Le Roux PD, Das H, Esquenazi S, Kelly PJ. Robot-assisted microsurgery: a feasibility study in the rat. *Neurosurgery*. 2001;48(3):584–589. PMID: 11270549 <https://doi.org/10.1097/00006123-200103000-00026>
 14. Hongo K, Kobayashi S, Kakizawa Y, Koyama J, Goto T, Okudera H, et al. NeuRobot: telecontrolled micromanipulator system for minimally invasive microneurosurgery – preliminary results. *Neurosurgery*. 2002;51(4):985–988. PMID: 12234407 <https://doi.org/10.1097/00006123-200210000-00024>
 15. Goto T, Hongo K, Kakizawa Y, Muraoka H, Miyairi Y, Tanaka Y, et al. Clinical application of robotic telemanipulation system in neurosurgery. *J Neurosurg*. 2003;99(6):1082–1084. PMID: 17986838 <https://doi.org/10.3171/jns.2003.99.6.1082>
 16. Von Langsdorff D, Paquis P, Fontaine D. In vivo measurement of the frame-based application accuracy of the Neuromate neurosurgical robot. *J Neurosurg*. 2015;122(1):191–194. PMID: 25361490 <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS14256>
 17. Fomenko A, Serletis D. Robotic stereotaxy in cranial neurosurgery: a qualitative systematic review. *Neurosurgery*. 2018;83(4):642–650. PMID: 29253265 <https://doi.org/10.1093/neuros/nyx576>
 18. Barua NU, Lowis SP, Woolley M, O'Sullivan S, Harrison R, Gill SS. Robot-guided convection-enhanced delivery of carboplatin for advanced brainstem glioma. *Acta Neurochir (Wien)*. 2013;155(8):1459–1465. PMID: 23595829 <https://doi.org/10.1007/s00701-013-1700-6>
 19. Mattei TA, Rodriguez AH, Sambhara D, Mendel E. Current state-of-the-art and future perspectives of robotic technology in neurosurgery. *Neurosurg Rev*. 2014;37(3):357–366. PMID: 24729137 <https://doi.org/10.1007/s10143-014-0540-z>
 20. Cardinale F, Rizzi M, d'Orto P, Casaceli G, Arnulfo G, Narizzano M, et al. A new tool for touch-free patient registration for robot-assisted intracranial surgery: application accuracy from a phantom study and a retrospective surgical series. *Neurosurg Focus*. 2017;42(5):E8. PMID: 28463615 <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS16539>

REFERENCES

1. Mascott CR, Sol JC, Bousquet P, Lagarrigue J, Lazorthes Y, Lauwers-Cances V. Quantification of true in vivo (application) accuracy in cranial image-guided surgery: influence of mode of patient registration. *Neurosurgery*. 2006;59(1 Suppl 1):146–156. PMID: 16888546 <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000220089.39533.4E>
2. Landi A, Marina R, DeGrandi C, Crespi A, Montanari G, Sganzerla EP, Gaini SM. Accuracy of stereotactic localisation with magnetic resonance compared to CT scan: experimental findings. *Acta Neurochir*. 2001;143(6):593–601. PMID: 11534676 <https://doi.org/10.1007/s007010170064>
3. Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayathi S. A robot with improved absolute positioning accuracy for stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1988;35(2):153–160. PMID: 3280462 <https://doi.org/10.1109/10.1354>
4. Doulgeris JJ, Gonzalez-Blohm SA, Filis AK, Shea TM, Aghayev K, Vrionis FD. Robotics in neurosurgery: evolution, current challenges, and compromises. *Cancer Control*. 2015;22(3):352–359. PMID: 26351892 <https://doi.org/10.1177/107327481502200314>
5. Benabid AL, Cinquin P, Lavalée S, Le Bas JF, Demongeot J, Rougemont J. Computer driven robot for stereotactic surgery connected to CT scan and magnetic resonance imaging: technological design and preliminary results. *Appl Neurophysiol*. 1987;50(1-6):153–154. PMID: 3329838 <https://doi.org/10.1159/000100701>
6. Wang MY, Goto T, Tessitore E, Veeravagu A. Robotics in neurosurgery. *Neurosurg Focus*. 2017;42(5):E1. PMID: 28463607 <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS1783>
7. Adler JR Jr, Murphy MJ, Chang SD, Hancock SL. Image-guided robotic radiosurgery. *Neurosurgery*. 1999;44(6):1299–1307. PMID: 10371630
8. Drake JM, Joy M, Goldenberg A, Kreindler D. Computer and robot-assisted resection of thalamic astrocytomas in children. *Neurosurgery*. 1991;29(1):27–33. PMID: 1870684 <https://doi.org/10.1097/00006123-199107000-00005>
9. Davies B. A review of robotics in surgery. *Proc Inst Mech Eng H*. 2000;214(1):129–140. PMID: 10718057 <https://doi.org/10.1243/0954411001535309>
10. Benabid AL, Lavalée S, Hoffmann D, Cinquin P, Demongeot J, Danel F. Potential use of robots in endoscopic neurosurgery. *Acta Neurochir Suppl (Wien)*. 1992;54:93–97. PMID: 1595416 https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6687-1_14

21. Bekelis K, Radwan TA, Desai A, Roberts DW. Frameless robotically targeted stereotactic brain biopsy: feasibility, diagnostic yield, and safety. *J Neurosurg.* 2012;116(5):1002–1006. PMID: 22404667 <https://doi.org/10.3171/2012.1.JNS111746>
22. Lollis SS, Roberts DW. Robotic catheter ventriculostomy: feasibility, efficacy, and implications. *J Neurosurg.* 2008;108(2):269–274. PMID: 18240921 <https://doi.org/10.3171/JNS/2008/108/2/0269>
23. Gonen L, Chakravarthy SS, Monroy-Sosa A, Celix JM, Kojis N, Singh M, et al. Initial experience with a robotically operated video optical telescopic-microscope in cranial neurosurgery: feasibility, safety, and clinical applications. *Neurosurg Focus.* 2017;42(5):E9. PMID: 28463622 <https://doi.org/10.3171/2017.3.FOCUS1712>
24. Neudorfer C, Hunsche S, Hellmich M, Majdoub FE, Maarouf M. Comparative study of robot-assisted versus conventional frame-based deep brain stimulation stereotactic neurosurgery. *Stereotact Funct Neurosurg.* 2018; 96(5):327–334. PMID: 30481770 <https://doi.org/10.1159/000494736>
25. Pillai A, Ratnathankom A, Ramachandran SN, Udayakumaran S, Subhash P, Krishnadas A. Expanding the spectrum of robotic assistance in cranial neurosurgery. *Oper Neurosurg (Hagerstown).* 2019; 17(2):164–173. PMID: 30203040 <https://doi.org/10.1093/ons/opy229>
26. Lefranc M, Capel C, Pruvot-Ocean AS, Fichten A, Desenclos C, Toussaint P, et al. Frameless robotic stereotactic biopsies: a consecutive series of 100 cases. *J Neurosurg.* 2015; 122(2):342–352. PMID: 25380111 <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS14107>
27. Terrier L, Gilard V, Marguet F, Fontanilles M, Derrey S. Stereotactic brain biopsy: evaluation of robot-assisted procedure in 60 patients. *Acta Neurochir (Wien).* 2019;161(3):545–552. PMID: 30675655 <https://doi.org/10.1007/s00701-019-03808-5>
28. Grimm F, Naros G, Gutenberg A, Keric N, Giese A, Gharabaghi A. Blurring the boundaries between frame-based and frameless stereotaxy: feasibility study for brain biopsies performed with the use of a head-mounted robot. *J Neurosurg.* 2015;123(3):737–742. PMID: 26067616 <https://doi.org/10.3171/2014.12.JNS141781>
29. Smith JA, Jivraj J, Wong R, Yang V. 30 years of neurosurgical robots: review and trends for manipulators and associated navigational systems. *Ann Biomed Eng.* 2016;44(4):836–846. PMID: 26467553 <https://doi.org/10.1007/s10439-015-1475-4>
30. Minchev G, Kronreif G, Martínez-Moreno M, Dorfer C, Micko A, Mert A, et al. A novel miniature robotic guidance device for stereotactic neurosurgical interventions: preliminary experience with the iSYS1 robot. *J Neurosurg.* 2011;126(3):985–996. PMID: 27104847 <https://doi.org/10.3171/2016.1.JNS152005>
31. Dorfer C, Minchev G, Czech T, Stefanits H, Feucht M, Pataraja E, et al. A novel miniature robotic device for frameless implantation of depth electrodes in refractory epilepsy. *J Neurosurg.* 2017;126(5):1622–1628. PMID: 27494814 <https://doi.org/10.3171/2016.5.JNS16388>
32. Legnani FG, Franzini A, Mattei L, Saladino A, Casali C, Prada F, et al. Image-guided biopsy of intracranial lesions with a small robotic device (iSYS1): a prospective, exploratory pilot study. *Oper Neurosurg (Hagerstown).* 2019;17(4):403–412. PMID: 30690491 <https://doi.org/10.1093/ons/opy411>
33. Couldwell WT, MacDonald JD, Thomas CL, Hansen BC, Lalalikar A, Thakkar B, et al. Computer-aided design/computer-aided manufacturing skull base drill. *Neurosurg Focus.* 2017;42(5):E6. PMID: 28463621 <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS16561>
34. Ghanbari L, Rynes ML, Hu J, Schulman DS, Johnson GW, Laroque M, et al. Craniobot: a computer numerical controlled robot for cranial microsurgeries. *Sci Rep.* 2019;9(1):1023. PMID: 30705287 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37073-w>
35. Marcus HJ, Seneci CA, Payne CJ, Nandi D, Darzi A, Yang GZ. Robotics in keyhole transcranial endoscope-assisted microsurgery: a critical review of existing systems and proposed specifications for new robotic platforms. *Neurosurgery.* 2014;10(Suppl 1):84–96. PMID: 23921708 <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000125>
36. Kasparova KA, Dreval ON. Robot systems in neurosurgery. *Russian Journal of Neurosurgery.* 2012;(4):88–93. (in Russ.)
37. Zimmermann M, Krishnan R, Raabe A, Seifert V. Robot-assisted navigated endoscopic ventriculostomy: implementation of a new technology and first clinical results. *Acta Neurochir (Wien).* 2004;146(7):697–704. PMID: 15197613 <https://doi.org/10.1007/s00701-004-0267-7>
38. Zimmermann M, Krishnan R, Raabe A, Seifert V. Robot-assisted navigated neuroendoscopy. *Neurosurgery.* 2002;51(6):1446–1451. PMID: 12445350 <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000036095.14236.74>
39. Kaushik A, Dwarakanath TA, Bhutani G, Moiyadi A, Chaudhari P. Validation of high precision robot-assisted methods for intracranial applications: preliminary study. *World Neurosurg.* 2020;137:71–77. PMID: 32032794 <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.01.206>
40. Panesar SS, Kliot M, Parrish R, Fernandez-Miranda J, Cagle Y, Britz GW. Promises and perils of artificial intelligence in neurosurgery. *Neurosurgery.* 2018;87(1):33–44. PMID: 31748800 <https://doi.org/10.1093/neuros/nyz471>
41. Louw DF, Fielding T, McBeth PB, Gregoris D, Newhook P, Sutherland GR. Surgical robotics: a review and neurosurgical prototype development. *Neurosurgery.* 2004;54(3):525–537. PMID: 15028126 <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000108638.05274.e9>
42. Nathoo N, Cavusoglu MC, Vogelbaum MA, Barnett GH. In touch with robotics: neurosurgery for the future. *Neurosurgery.* 2005;56(3):421–433. PMID: 15730567 <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000153929.68024.cf>
43. Sutherland GR, Lama S, Gan LS, Wolfsberger S, Zareinia K. Merging machines with microsurgery: clinical experience with neuroArm. *J Neurosurg.* 2013;118(3):521–529. PMID: 23240694 <https://doi.org/10.3171/2012.11.JNS12877>
44. Sekhar LN, Tariq F, Kim LJ, Pridgeon J, Hannaford B. Commentary: virtual reality and robotics in neurosurgery. *Neurosurgery.* 2013;72(Suppl 1):1–6. PMID: 23254797 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e31827db647>
45. Hongo K, Goto T, Miyahara T, Kakizawa Y, Koyama J, Tanaka Y. Telecontrolled micromanipulator system (neurobot) for minimally invasive neurosurgery. *Acta Neurochir Suppl.* 2006;98:63–66. PMID: 17009702 https://doi.org/10.1007/978-3-211-33303-7_9
46. Mitsuishi M, Morita A, Sugita N, Sora S, Mochizuki R, Tanimoto K, et al. Master-slave robotic platform and its feasibility study for micro-neurosurgery. *Int J Med Robot.* 2013;9(2):180–189. PMID: 22588785 <https://doi.org/10.1002/rcs.1434>
47. Morita A, Sora S, Mitsuishi M, Warisawa S, Suruman K, Asai D, et al. Microsurgical robotic system for the deep surgical field: development of a prototype and feasibility studies in animal and cadaveric models. *J Neurosurg.* 2005;103(2):320–327. PMID: 16175863 <https://doi.org/10.3171/jns.2005.103.2.0320>
48. Ko S, Nakazawa A, Kurose Y, Harada K, Mitsuishi M, Sora S, et al. Intelligent control of neurosurgical robot MM-3 using dynamic motion scaling. *Neurosurg Focus.* 2017;42(5):E5. PMID: 28463616 <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS16568>
49. Sutherland GR, Wolfsberger S, Lama S, Zareinia K. The evolution of neuroArm. *Neurosurgery.* 2013;72(Suppl 1):27–32. PMID: 23254809 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318270da19>
50. Lang MJ, Greer AD, Sutherland GR. Intra-operative robotics: NeuroArm. *Acta Neurochir Suppl.* 2011;109:231–236. PMID: 20960348 https://doi.org/10.1007/978-3-211-99651-5_36
51. Sutherland GR, Latour I, Greer AD, Fielding T, Feil G, Newhook P. An image-guided magnetic resonance-compatible surgical robot. *Neurosurgery.* 2008;62(2):286–293. PMID: 18382307 <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000315996.73269.18>
52. Kupperman ME, Demonte F, Levine N, Hanna E. Feasibility of a robotic surgical approach to reconstruct the skull base. *Skull Base.* 2011;21(2):79–82. PMID: 22451805 <https://doi.org/10.1055/s-0030-1261258>
53. Hong WC, Tsai JC, Chang SD, Sorger JM. Robotic skull base surgery via supraorbital keyhole approach: a cadaveric study. *Neurosurgery.* 2013;72(Suppl 1):33–38. PMID: 23254810 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318270d9de>
54. Marcus HJ, Hughes-Hallett A, Cundy TP, Yang GZ, Darzi A, Nandi D. Da Vinci robot-assisted keyhole neurosurgery: a cadaver study on feasibility and safety. *Neurosurg Rev.* 2015;38(2):367–371. PMID: 25516094 <https://doi.org/10.1007/s10143-014-0602-2>
55. Panesar S, Cagle Y, Chandler D, Morey J, Fernandez-Miranda J, Kliot M. Artificial intelligence and the future of surgical robotics. *Ann Surg.* 2019;270(2):223–226. PMID: 30907754 <https://doi.org/10.1097/SLA.00000000000003262>
56. Leonard S, Wu KL, Kim Y, Krieger A, Kim PCW. Smart tissue anastomosis robot (STAR): a vision-guided robotics system for laparoscopic suturing. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2014;61(4):1305–1317. PMID: 24658254 <https://doi.org/10.1109/TBME.2014.2302385>
57. Goto T, Hongo K, Yako T, Hara Y, Okamoto J, Toyoda K, et al. The concept and feasibility of EXPERT: intelligent armrest using robotics technology. *Neurosurgery.* 2013;72(Suppl 1):39–42. PMID: 23254811 <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e318271ee66>
58. Ogiwara T, Goto T, Nagm A, Hongo K. Endoscopic endonasal transphenoidal surgery using the iArmS operation support robot: initial experience in 43 patients. *Neurosurg Focus.* 2017;42(5):E10. PMID: 28463614 <https://doi.org/10.3171/2017.3.FOCUS16498>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриев Александр Юрьевич

кандидат медицинских наук, врач-нейрохирург, нейрохирургическое отделение для лечения больных с сосудистыми заболеваниями головного мозга, ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ», ассистент кафедры нейрохирургии и нейрореанимации ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А.И. Евдокимова» МЗ РФ;
<https://orcid.org/0000-0002-7635-9701>, dmitriev@neurosklif.ru;
 70%: разработка дизайна исследования, обзор публикаций по теме статьи, написание текста статьи

Дашьян Владимир Григорьевич

доктор медицинских наук, врач-нейрохирург, нейрохирургическое отделение для лечения больных с сосудистыми заболеваниями головного мозга, ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ», профессор кафедры нейрохирургии и нейрореанимации ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А.И. Евдокимова»;
<https://orcid.org/0000-0002-5847-9435>, v485@bk.ru;
 30%: разработка дизайна исследования, редактирование статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Robotics in Cranial Neurosurgery, 35 Years of Evolution

A.Yu. Dmitriev^{1,2}✉, V.G. Dashyan^{1,2}

Neurosurgical Department for the Treatment of Patients with Cerebral Vascular Diseases

¹ N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine

3 B. Sukharevskaya Sq., Moscow, 129090, Russian Federation

² A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry

20 Bldg. 1, Delegatskaya St., Moscow, 127473, Russian Federation

✉ **Contacts:** Aleksandr Yu. Dmitriev, Candidate of Medical Sciences, Neurosurgeon, Neurosurgical Department for the Treatment of Patients with Cerebral Vascular Diseases, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine. Email: dmitriev@neurosklif.ru

ABSTRACT We reviewed the experience of robotic devices in cranial neurosurgery for 35 years. The brief history is represented, prerequisites for robotics development are specified. The most popular devices are listed, which are used for surgical instruments positioning and remote manipulations. We pointed key robotic features, main results of their application, showed advantages, shortcomings and ways to resolve some problems. The accurateness of robotic systems is shown in comparison with frame-based stereotactic surgery. The main trends in robotic development in the future are described as well.

Keywords: robotic device, cranial neurosurgery, NeuroMate, Rosa, Renaissance, NeuroArm

For citation Dmitriev AYu, Dashyan VG. Robotics in Cranial Neurosurgery, 35 Years of Evolution. *Russian Sklifosovsky Journal of Emergency Medical Care*. 2022;11(2):346–354. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2022-11-2-346-354> (in Russ.)

Conflict of interest Authors declare lack of the conflicts of interests

Acknowledgments, sponsorship The study has no sponsorship

Affiliations

Aleksandr Yu. Dmitriev

Candidate of Medical Sciences, Neurosurgeon, Neurosurgical Department for the Treatment of Patients with Cerebral Vascular Diseases, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Assistant of the Department of Neurosurgery and Neuroresuscitation, A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry;
<https://orcid.org/0000-0002-7635-9701>, dmitriev@neurosklif.ru;
 70%, research design development, review of publications on the topic of the article, writing the text of the article

Vladimir G. Dashyan

Doctor of Medical Sciences, Neurosurgeon, Neurosurgical Department for the Treatment of Patients with Cerebral Vascular Diseases, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Professor of the Department of Neurosurgery and Neuroresuscitation of A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry;
<https://orcid.org/0000-0002-5847-9435>, v485@bk.ru;
 30%, study design, article editing

Received on 01.06.2021

Review completed on 23.03.2022

Accepted on 29.03.2022

Поступила в редакцию 01.06.2021

Рецензирование завершено 23.03.2022

Принята к печати 29.03.2022