

بررسی سیستم های جراحی رباتیک مبتنی بر هوش مصنوعی (مزایا، محدودیت ها و چشم انداز آینده)

مهسا صادقی گرمارودی^{۱*}، سوده رفیعی راد^۲

۱- دانشجوی دکترای پرستاری داخلی جراحی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، استان تهران، ایران.

۲- دکترای مدیریت دولتی (رفتار سازمانی)، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، استان مازندران، ایران.

چکیده

جراحی رباتیک یک فناوری پیشرفته در حوزه جراحی است که از ربات ها و دستگاه های الکترونیکی برای انجام عمل جراحی استفاده می کند. در این نوع جراحی، ربات ها توسط جراح کنترل می شوند و به او کمک می کنند تا عمل جراحی را با دقت بالا و به صورت دقیق تر انجام دهد. جراحی رباتیک که به دلیل تکنیک های کم تهاجمی^۱ و بازوهای رباتیک کنترل شده توسط کامپیوتر^۲ شناخته می شود، با ارائه بهبود مهارت، تجسم و کاهش لرزش^۳ در مقایسه با روش های سنتی، پزشکی مدرن را متحول کرده است. ادغام هوش مصنوعی (AI) در جراحی رباتیک، دقت، کارایی و دسترسی را بیشتر کرده است. این مقاله به بررسی چشم انداز فعلی سیستم های جراحی رباتیک مبتنی بر هوش مصنوعی می پردازد، مزایا، محدودیت ها و چشم انداز آینده آن ها را به تفصیل شرح می دهد. در ابتدا، کاربردهای هوش مصنوعی در جراحی رباتیک بر خودکارسازی وظایفی مانند بخیه زدن و کالبد شکافی بافت برای افزایش قوام^۴ و کاهش بار کاری جراح^۵ متمرکز بود. سیستم های مبتنی بر هوش مصنوعی فعلی دارای قابلیت هایی مانند تشخیص تصویر، کنترل حرکت و بازخورد لمسی^۶ هستند که امکان تجزیه و تحلیل بی درنگ تصاویر میدان جراحی و بهینه سازی حرکات ابزار را برای جراحان فراهم می کنند. از مزایای یکپارچه سازی هوش مصنوعی می توان به دقت بیشتر، کاهش خستگی جراح و بهبود ایمنی اشاره کرد. با این حال، چالش هایی مانند هزینه های بالای توسعه، تکیه بر کیفیت داده ها، و نگرانی های اخلاقی در مورد استقلال و مسئولیت، مانع پذیرش گسترده می شوند. موانع نظارتی و ادغام جریان کار نیز موانعی را ایجاد می کنند. مسیرهای آینده برای ادغام هوش مصنوعی در جراحی رباتیک شامل افزایش استقلال، شخصی سازی رویکردهای جراحی و اصلاح آموزش جراحی از طریق شبیه سازی های مبتنی بر هوش مصنوعی و واقعیت مجازی است. به طور کلی، ادغام هوش مصنوعی نویدبخش پیشرفت مراقبت های جراحی با مزایای بالقوه از جمله بهبود نتایج بیمار و افزایش دسترسی به تخصص ویژه است. پرداختن به چالش ها و ترویج پذیرش مسئولانه برای تحقق پتانسیل کامل جراحی رباتیک مبتنی بر هوش مصنوعی ضروری است.

کلمات کلیدی: هوش مصنوعی، کامپیوتر، فناوری لمسی، روش های جراحی رباتیک، جراحان

^۱ minimally invasive techniques

^۲ computer-controlled robotic arms

^۳ tremor reduction

^۴ enhance consistency

^۵ reduce surgeon workload

^۶ haptic feedback

مقدمه

جراحی رباتیک، یک تکنیک جراحی کم تهاجمی با استفاده از بازوهای رباتیک با کنترل کامپیوتر، پزشکی مدرن را متحول کرده است. در مقایسه با جراحی لاپاراسکوپی سنتی، این روش باعث افزایش مهارت، دید بهبود یافته و کاهش لرزش می شود که منجر به مزایای متعددی برای بیماران می شود. این موارد شامل برش های کوچک تر، از دست دادن خون کمتر، زمان بهبودی سریع تر و کاهش درد است [۱]. هوش مصنوعی (AI) طیفی از فناوری های هوشمند را در بر می گیرد که می توانند بدون برنامه نویسی صریح یاد بگیرند، استدلال کنند و تصمیم بگیرند. در زمینه پزشکی، هوش مصنوعی کاربردهای فزاینده ای در زمینه های مختلف پیدا می کند، از جمله تجزیه و تحلیل و تشخیص تصویربرداری پزشکی [۲]، کشف و توسعه دارو [۳] و جراحی به کمک ربات [۴].

ادغام هوش مصنوعی در جراحی رباتیک نویدبخشی برای افزایش بیشتر دقت، کارایی و دسترسی آن است. این مقاله به بررسی وضعیت فعلی سیستم های جراحی رباتیک مبتنی بر هوش مصنوعی، مزایا و محدودیت های آنها و جهت گیری های آینده برای این فناوری تحول آفرین می پردازد. توسعه جراحی رباتیک را می توان به دهه ۱۹۸۰ با معرفی ربات PUMA [۵] ردیابی کرد. سیستم های جراحی رباتیک اولیه عمدتاً برای دستکاری از راه دور مورد استفاده قرار می گرفتند و به جراحان اجازه می دادند از راه دور عمل کنند. پیشرفت های بعدی منجر به ایجاد بازوهای رباتیک پیچیده تر با مهارت و کنترل بهتر شد. تایید برجسته FDA سیستم جراحی داوینچی در سال ۲۰۰۰ نقطه عطف قابل توجهی در این زمینه بود [۶].

استفاده از هوش مصنوعی در مراقبت های بهداشتی در سال های اخیر شاهد رشد قابل توجهی بوده است که به دلیل پیشرفت در الگوریتم های یادگیری ماشین و در دسترس بودن حجم وسیعی از داده های پزشکی بوده است. برنامه های اولیه بر روی کارهایی مانند تجزیه و تحلیل تصاویر پزشکی برای تشخیص سرطان یا پیش بینی نتایج بیمار متمرکز بودند [۷-۹]. ادغام اولیه هوش مصنوعی در جراحی رباتیک بر خودکار کردن وظایف جراحی خاص، مانند بخیه زدن یا تشریح بافت متمرکز بود. هدف این برنامه ها بهبود ثبات و کاهش حجم کاری جراح بود [۱۰، ۴]. سیستم های جراحی رباتیک مبتنی بر هوش مصنوعی فعلی دارای عملکردهای مختلفی از جمله تشخیص و تقسیم بندی تصویر هستند: الگوریتم های هوش مصنوعی می توانند تصاویر میدان جراحی را در زمان واقعی تجزیه و تحلیل کنند تا ساختارهای حیاتی، رگ های خونی و تومورها را شناسایی کنند و به جراحان در تصمیم گیری کمک کنند [۱۱، ۱۲]. با کنترل حرکت و برنامه ریزی مسیر: هوش مصنوعی می تواند به برنامه ریزی و بهینه سازی حرکات ابزار جراحی کمک کند و منجر به روش های نرم تر و دقیق تر شود [۱۳]. با بازخورد لمسی: هوش مصنوعی می تواند حس لامسه تجربه شده توسط جراح را از طریق رابط رباتیک افزایش دهد، و بازخورد ارزشمندی را در مورد بافت و مقاومت بافت ارائه دهد [۱۴، ۱۵].

روش ها

یک جستجوی ادبیات جامع برای این بررسی روایی با استفاده از پایگاه های اطلاعاتی PubMed، Embase و Google Scholar انجام شد که بر روی انتشارات بررسی شده از ژانویه ۲۰۱۰ تا مه ۲۰۲۴ تمرکز داشت تا از گنجاندن آخرین پیشرفت ها در این زمینه اطمینان حاصل شود. این جستجو از عبارات زیر استفاده کرد: هوش مصنوعی و اصطلاحات مرتبط، یادگیری ماشین و اصطلاحات مرتبط، و جراحی رباتیک یا به کمک ربات و اصطلاحات مرتبط.

فرآیند انتخاب از دستورالعمل های PRISMA پیروی می کند، همانطور که در شکل نشان داده شده است. در ابتدا، ۴۸۳ رکورد منحصر به فرد شناسایی شد. پس از غربالگری، ۴۵۷ مقاله تمام متن از نظر مرتبط بودن مورد ارزیابی قرار گرفتند و ۱۰۳ مقاله به عنوان نماینده جدیدترین پیشرفت ها در این زمینه انتخاب شدند تا در این بررسی روایی گنجانده شوند. عبارات جستجو توسط دو نویسنده بررسی و مورد بررسی قرار گرفت. هر گونه اختلاف از طریق مشارکت نویسنده سوم مستقل حل شد. روش مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

مرور

پیشرفت کنترل خودکار در سکوها رباتیک جراحی نویدبخش دستیابی به دقت بیشتر، مانورهای هوشمند و جلوگیری از آسیب بافتی است. اگرچه بسیاری از سیستم های رباتیک خودمختار آزمایشی هستند، برخی از آنها قبلاً راه خود را به عمل بالینی باز کرده اند. تحقیقات در حال انجام با هدف توسعه سیستم های جراحی کاملاً خودمختار قادر به انجام وظایف پیچیده بر روی بافت های نرم تغییر شکل پذیر، مانند بخیه زدن و آناستوموز روده، در محیط های جراحی باز است. یافته های اولیه نشان می دهد که روش های خودمختار تحت نظارت می توانند از نظر اثربخشی و سازگاری هم از جراحی های انجام شده توسط جراح متخصص و هم از روش های به کمک ربات پیشی بگیرند. این گام ها در جراحی رباتیک خودمختار پتانسیل افزایش نتایج جراحی و گسترش دسترسی به تکنیک های بهینه را دارند [۱۶، ۱۷]. علیرغم شک و تردید اولیه در میان برخی جراحان، پیشرفت در هوش مصنوعی و روباتیک راه را برای افزایش استقلال در روش های جراحی هموار می کند. در حالی که فقدان هاپتیک ها به طور سنتی مانع پذیرش گسترده جراحی رباتیک شده است، شناخت رو به رشدی در جامعه جراحی از پتانسیل واقعی رباتیک وجود دارد. در نتیجه، ادغام هوش مصنوعی به طور فزاینده ای حیاتی می شود و راه های جدیدی را برای افزایش دقت و نتایج جراحی ارائه می دهد [۱۷-۱۹]. سطوح خودمختاری در جراحی رباتیک چارچوبی پیشرو برای درک قابلیت های در حال تکامل روبات های جراحی ارائه می دهد. طبق طبقه بندی یانگ و همکاران [۲۰] از سطح خودمختاری نشان داده شده در شکل، در سطح ۰، که نمونه آن سیستم داوینچی است، جراحان مستقیماً حرکات رباتیک را بدون هیچ گونه کمک یا محدودیت کنترل می کنند [۲۱]. با حرکت به سطح ۱، ربات ها شروع به کمک به جراحان با ارائه وسایل مجازی یا محدودیت های فعال برای هدایت اقدامات آن ها می کنند، که توسط فناوری هایی مانند حسگر رابط بافت و ردیابی چشم تسهیل می شود [۲۱].

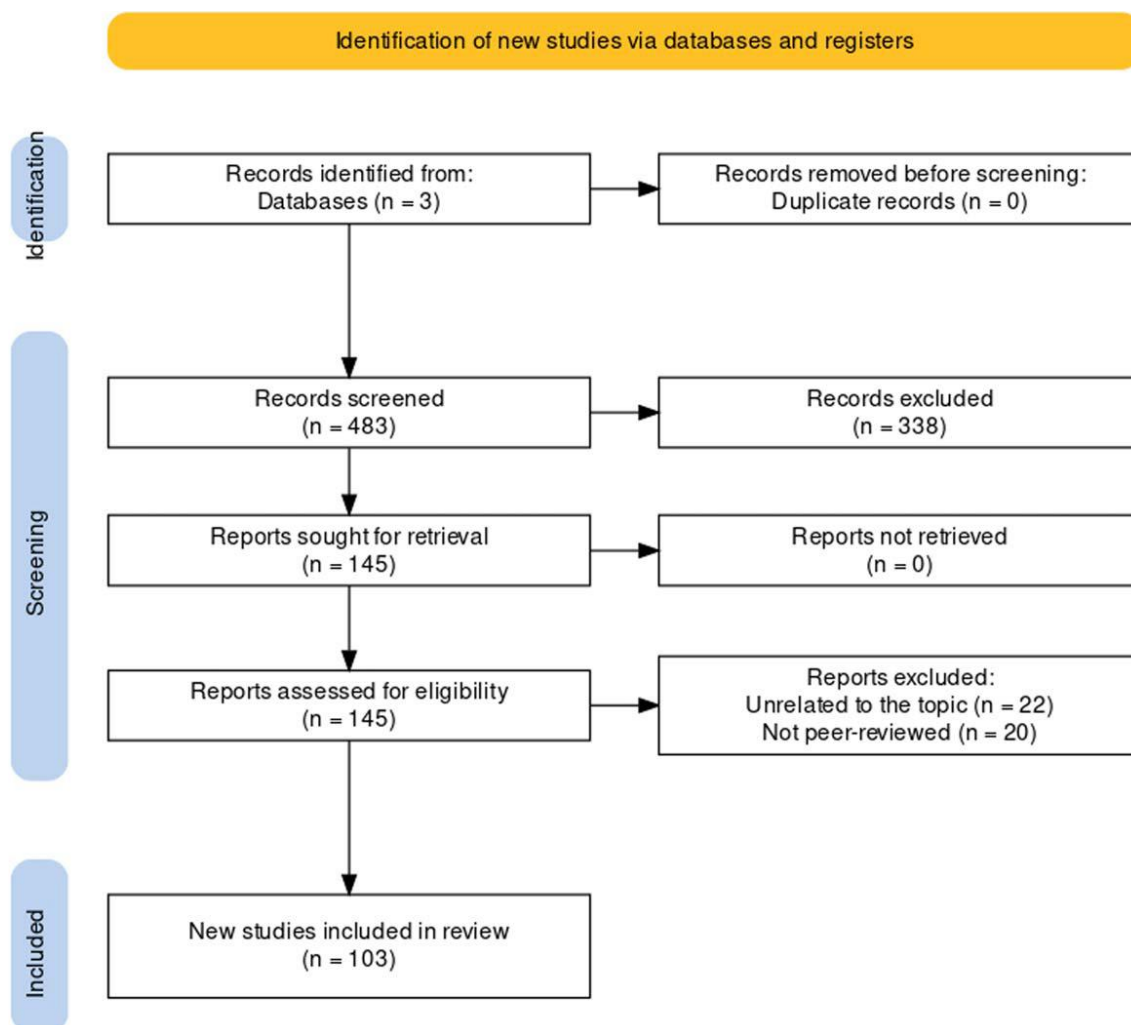
سطح ۲ استقلال به ربات ها توانایی انجام وظایف جراحی خاص بر اساس دستورالعمل های ارائه شده توسط پزشک را می دهد، با تغییر کنترل از اپراتورهای انسانی به ماشین ها در طول اجرای کار [۲۱]. مثال ها شامل الگوریتم های مستقل

برای کارهایی مانند بازتاب نوک در کولونوسکوپی مغناطیسی و سیستم های پس کشی بافت با استفاده از نشانگرهای بصری و منطق فازی است [۱۹،۲۲]. پیشرفت های سطح ۳ توانایی های ادراکی را به روبات ها معرفی می کند و آنها را قادر می سازد تا وظایف را به طور مستقل در محیط جراحی برنامه ریزی و اجرا کنند. مثال ها شامل ربات های آندوسکوپی منعطف است که به طور مستقل در محیط های بدون ساختار در طی روش هایی مانند کولونوسکوپی پیمایش می کنند [۱۷،۲۲،۲۳]. سطح ۴ استقلال یک جهش قابل توجه را نشان می دهد، جایی که ربات ها داده های قبل از عمل و حین عمل را برای ایجاد برنامه های مداخله، اجرای اقدامات و تطبیق در زمان واقعی تفسیر می کنند. در حالی که نمونه های خاص محدود هستند، کاربردهای بالقوه شامل برداشتن بافت هوشمند در جراحی سرطان، با هدف به حداقل رساندن آسیب به بافت سالم در حالی که مناطق سرطانی را هدف قرار می دهد، می باشد.

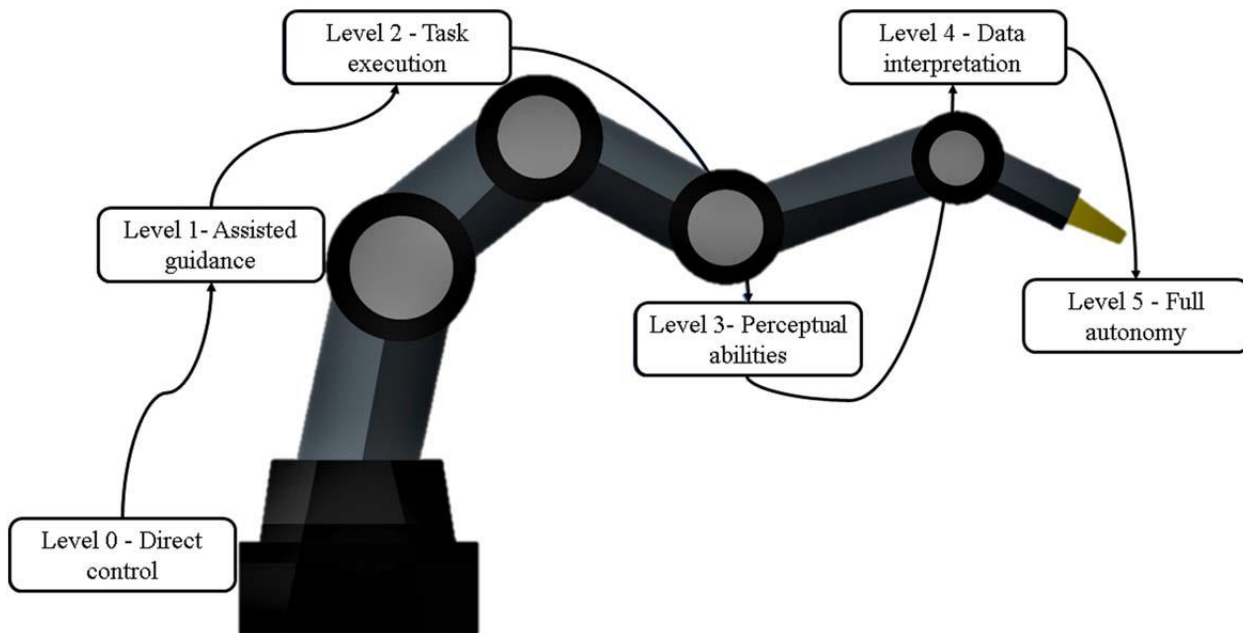
سطح ۵ خودمختاری، جایی که روبات ها بدون دخالت انسان عمل جراحی را انجام می دهند، همچنان آرزویی است و هنوز به دست نیامده است. با این حال، پیشرفت ها در سطوح پایین تر استقلال نشان دهنده یک مسیر امیدوارکننده به سمت سیستم های جراحی رباتیک پیچیده تر و مستقل تر است [۲۱].

سطوح خودمختاری جراحی در شکل ۲ نشان داده شده است. چندین مثال وضعیت فعلی مداخلات جراحی رباتیک خودمختار، به ویژه در سطح ۳ را نشان می دهد.

یکی از سیستم های قابل توجه، ربات خودگردان بافت هوشمند (STAR) است که توسط اکسل کریگر طراحی شده است، که توانایی مطابقت یا حتی پیشی گرفتن از جراحان انسانی را در آناستوموز روده نشان داده است [۲۴]. STAR به طور مستقل با تایید انسان از طرح جراحی عمل می کند و کارایی قابل توجهی را در کاهش خطاها و دستیابی به بازسازی بافت نرم تر نشان می دهد. این سیستم ضخامت و ساختار بافت را ارزیابی می کند تا طرحی برای قرار دادن بخیه ایجاد کند، سپس پس از دریافت تاییدیه انسانی، به طور مستقل به دوخت ادامه می دهد. ارتباط مستمر با جراح، سازگاری با تغییر شکل بافت یا تغییرات غیرمنتظره در طول عمل را تضمین می کند [۲۴]. در حالی که پیشرفت ها در بخیه های خودمختار امیدوارکننده است، اما در حال حاضر به فانتوم های آناتومیک یا مدل های ex-vivo محدود شده اند، با استقلال کامل در بخیه زنی هنوز چشم انداز دوری وجود دارد [۲۱]. یک سیستم خودمختار دیگر، TSolution One، متخصص در کنده کاری استخوان طبق یک برنامه از پیش تعیین شده، به ویژه در جراحی های تعویض مفصل ران و زانو است [۲۵]. اگرچه در حفاری استخوان موثر است، اما ناتوانی آن در تمایز بین انواع بافت ها، جابجایی دستی بافت های نرم را برای جلوگیری از آسیب ضروری می کند. با این حال، داده های بلندمدت در مورد بقا و پیامدها وجود ندارد، که مانع از ارزیابی مقرون به صرفه بودن آن می شود [۲۵].



شکل ۱. نمودار جریان روش شناسی مطالعه.



شکل ۲. سطوح استقلال رباتیک.

Veebot سیستم خودکار دیگری را به طور خاص برای جمع آوری نمونه خون نشان می دهد. Veebot با استفاده از نور مادون قرمز و سونوگرافی، وریدهای مناسب برای جمع آوری خون را با میزان موفقیت قابل مقایسه با عملکرد انسان شناسایی می کند [۲۶،۲۷]. به طور مشابه، سیستم ARTAS، یک دستگاه برداشت رباتیک پیوند، جراحی ترمیم مو را از طریق استخراج واحد فولیکولی بهبود می بخشد و از دقت رباتیک برای برداشت بهینه استفاده می کند [۲۸]. ربات CyberKnife قابلیت های پیشرفته خود را در انجام جراحی رادیویی برای بدخیمی های مغز و ستون فقرات تحت نظارت انسان به نمایش می گذارد. با استفاده از اصول استریوتاکتیک و تصویربرداری بلادرنگ، این سیستم به طور مداوم تغییرات جزئی وضعیت بدن بیمار را در طول درمان تنظیم می کند و از ارسال دقیق و موثر پرتو اطمینان حاصل می کند [۲۹]. این مثال ها بر چشم انداز در حال تکامل جراحی رباتیک خودمختار تأکید می کنند و هم دستاوردها و هم چالش های مداوم در ادغام هوش مصنوعی در عمل جراحی را برجسته می کنند. چندین الگوریتم هوش مصنوعی برای استفاده در جراحی رباتیک در حال بررسی هستند، از جمله:

- یادگیری عمیق: این تکنیک به ویژه در تشخیص تصویر ماهر است و می تواند برای شناسایی ساختارهای تشریحی، پیش بینی خطرات خونریزی، و حتی هدایت مسیرهای ابزار جراحی استفاده شود [۳۰-۳۴].
 - یادگیری تقویتی: این رویکرد به سیستم های هوش مصنوعی اجازه می دهد تا از طریق آزمون و خطا یاد بگیرند و به طور بالقوه آنها را قادر می سازد تا وظایف جراحی پیچیده را به طور مستقل در آینده انجام دهند [۳۵].
- ادغام هوش مصنوعی در جراحی رباتیک یک زمینه به سرعت در حال تکامل با پیشرفت های مداوم متعدد

است. در اینجا برخی از مطالعات موردی و نمونه های قانع کننده در تخصص های مختلف جراحی آورده شده است.

جراحی قلب کم تهاجمی

پیوند بای پس عروق کرونر رباتیک با کمک هوش مصنوعی (CABG): مطالعات پتانسیل هوش مصنوعی را برای بهبود نتایج در جراحی قلب کم تهاجمی نشان می دهند. یک مطالعه چند مرکزی و گذشته نگر که در مجله جراحی قفسه سینه و قلب و عروق (JTCVS) توسط کوارتاس و همکاران و کائو و همکاران [۳۶،۳۷] منتشر شد، استفاده از CABG رباتیک کم تهاجمی با کمک هوش مصنوعی را بررسی کرد. نتایج نتایج امیدوارکننده ای را با زمان های عمل کوتاه تر، کاهش از دست دادن خون و عوارض کمتر در مقایسه با تکنیک های سنتی نشان داد. تحقیقات برای استفاده از هوش مصنوعی برای طبقه بندی خطر در زمان واقعی در طول جراحی قلب ادامه دارد. این می تواند شامل تجزیه و تحلیل پارامترهای فیزیولوژیکی مختلف برای پیش بینی عوارض بالقوه و راهنمایی جراحان در تصمیم گیری آگاهانه باشد. Bonatti و همکاران و Ralf و همکاران [۳۸،۳۹] کاربردهای بالقوه هوش مصنوعی در این زمینه را برجسته می کنند.

روش های عصبی

راهنمای تصویری مبتنی بر هوش مصنوعی برای برداشتن تومور مغزی: مطالعات متعدد [۴۰-۴۲] پتانسیل هوش مصنوعی را برای کمک به جراحی های پیچیده تومور مغزی نشان دادند. این مطالعه موردی را تشریح کرد که در آن راهنمایی تصویری مبتنی بر هوش مصنوعی به جراحان کمک کرد تا در طی جراحی ظریف مغز به برداشتن کامل تر تومور دست یابند که به طور بالقوه منجر به بهبود نتایج بیمار می شود. هوش مصنوعی در کمک به روش های عصبی ظریف مانند برداشتن تومور مغزی نویدبخش است. یک مقاله اخیر در Nature Medicine موردی را برجسته کرده است که در آن راهنمایی تصویری مبتنی بر هوش مصنوعی به جراحان کمک می کند در طی یک جراحی مغز پیچیده تر به برداشتن تومور کامل تر دست یابند [۴۰-۴۲] الگوریتم های هوش مصنوعی برای برنامه ریزی قبل از جراحی و ناوبری حین عمل در روش های عصبی در حال بررسی هستند. این می تواند شامل ایجاد مدل های سه بعدی مغز بر اساس اسکن های بیمار و استفاده از هوش مصنوعی برای تجسم در زمان واقعی ساختارهای حیاتی در طول جراحی باشد.

جراحی ارتوپدی

در جراحی ارتوپدی، کاربرد اولیه هوش مصنوعی بر روی روش های مفصل ران و زانو متمرکز بود و از داده های مربوط به مراحل قبل، حین و بعد از عمل استفاده می کرد. استفاده از هوش مصنوعی در جراحی شانه جدیدتر است، با تعداد گزارش های فزاینده ای اما مطالعات جامع محدود [۴۳]. ابزار دقیق بیمار (PSI) که در مدت طولانی توسعه یافته است و

اکنون معمولاً در جراحی های شانه مانند آرتروپلاستی شانه استفاده می شود، با اطمینان از قرار دادن دقیق ایمپلنت به نتایج موفقیت آمیز کمک می کند. ایمن سازی و تراز کردن صحیح جزء گلوئید یک چالش بزرگ در آرتروپلاستی کامل شانه (TSA) است و PSI با تسهیل برنامه ریزی قبل از عمل از جراحان حمایت می کند. متاآنالیز ۱۲ مطالعه شامل ۲۲۷ شرکت کننده نشان داد که PSI موقعیت یابی گلوئید را تا حد زیادی افزایش می دهد و در مقایسه با روش های سنتی از ۶۸.۶ به ۱۵.۳ درصد کاهش می دهد. به طور همزمان، جراحی با کمک رباتیک پیشرفت قابل توجهی داشته است، به ویژه در آرتروپلاستی کامل زانو (TKA) و آرتروپلاستی کامل هیپ (THA). پلتفرم هایی مانند سیستم رباتیک مسلح MAKO ارزیابی های قبل از عمل را از طریق سی تی اسکن بهبود می بخشد و یک چشم انداز سه بعدی از مفصل را ارائه می دهد که به قرار دادن دقیق ایمپلنت و تنظیمات مجازی برای رباط های متعادل زانو کمک می کند [۴۵]. تحقیقات نشان می دهد که سیستم MAKO دقت قرارگیری اجزا را افزایش می دهد، درد پس از عمل و بستری شدن در بیمارستان را کاهش می دهد و نتایج عملکردی را بهبود می بخشد [۴۵،۴۶]. برای THA، سیستم MAKO نتایج بهتری با میزان عوارض قابل مقایسه با روش های مرسوم نشان داده است، و بیماران نتایج بهتر و موارد کمتری از قرارگیری نامناسب ایمپلنت را گزارش می کنند [۴۷،۴۸].

در جراحی شانه، هوش مصنوعی در تشخیص و درمان شرایطی مانند پارگی روتاتور کاف (RCT) نیز در حال پیشرفت است. به طور سنتی، ارتوپدها RCT را با تفسیر داده های MRI تشخیص می دهند، اما سیستم های یادگیری عمیق با استفاده از شبکه های عصبی کانولوشنال سه بعدی (CNN) برای تشخیص خودکار و دقیق ایجاد شده اند. این سیستم ها می توانند RCT را شناسایی کنند، اندازه پارگی را تعیین کنند و محل پارگی را تجسم کنند. علاوه بر این، الگوریتم های هوش مصنوعی می توانند آتروفی عضلانی را برای پیش بینی قابلیت ترمیم RCT های گسترده ارزیابی کنند، کارایی تشخیصی و عینی بودن را با اندازه گیری عواملی مانند نسبت اشغال عضله فوق خاری بهبود می بخشند [۴۹،۵۰]. تحقیقات نشان می دهد که هوش مصنوعی می تواند موقعیت ایمپلنت را بهبود بخشد و به طور بالقوه عوارض طولانی مدت در جراحی ارتوپدی را کاهش دهد.

Batailler و همکاران و Kayani و همکاران [۵۱،۵۲] TKA رباتیک به کمک AI را بررسی کردند. نتایج نشان دهنده بهبود موقعیت و تراز اجزا در مقایسه با تکنیک های مرسوم است که به طور بالقوه منجر به طول عمر بهتر ایمپلنت و نتایج بهتر بیمار می شود. سیستم های رباتیک مجهز به هوش مصنوعی برای جراحی های پیچیده ارتوپدی مانند تعویض مفصل ران و زانو مورد استفاده قرار می گیرند. تحقیقات منتشر شده در The Bone & Joint Journal نشان داد که جراحی رباتیک با کمک هوش مصنوعی برای آرتروپلاستی کامل زانو منجر به بهبود موقعیت ایمپلنت و کاهش بالقوه عوارض طولانی مدت می شود [۵۱-۵۳]. ادغام فناوری های هوش مصنوعی و رباتیک در جراحی ارتوپدی انقلابی در برنامه ریزی قبل از عمل، دقت حین عمل و نتایج بعد از عمل در طیف وسیعی از جراحی ها از جمله جراحی های لگن، زانو و شانه ایجاد کرده است. هوش مصنوعی پتانسیل شخصی سازی رویکردهای جراحی در ارتوپدی را بر اساس عواملی مانند آناتومی بیمار و سابقه پزشکی دارد. این می تواند شامل بهینه سازی انتخاب ایمپلنت و تکنیک های جراحی برای هر بیمار باشد.

اورولوژی

پروستاتکتومی لاپاروسکوپی با کمک رباتیک برای سرطان پروستات با هوش مصنوعی برای بهبود شناسایی بافت و حفظ عصب [۵۴]. پذیرش جراحی رباتیک کم تهاجمی افزایش قابل توجهی داشته است، به ویژه برای روش های قابل توجه uro-oncological. این نوآوری چشم انداز جراحی را عمیقاً متحول کرده است و نشان دهنده یک پیشرفت بزرگ به سمت مؤثرترین و کم تهاجمی ترین گزینه های درمانی برای بیماران است. سیستم های جراحی رباتیک مدرن معمولاً از مدل «رابط-برده» استفاده می کنند که در آن جراحان بازوهای رباتیک را از راه دور از یک کنسول پیشرفته کنترل می کنند. این همکاری بین تخصص انسانی و دقت ماشین، امکان نظارت دقیق و افزایش اقدامات جراحی را از طریق هوش مصنوعی فراهم می کند [۵۵]. یادگیری ماشینی (ML) به طور گسترده در حوزه های مختلف پزشکی استفاده شده است، دقت تشخیص بیماری را بهبود می بخشد، به انتخاب درمان کمک می کند، نظارت بر بیمار را تسهیل می کند و به ارزیابی خطر پیشگیری اولیه کمک می کند. تکنیک های ML برای تقویت سیستم های جراحی، به ویژه از طریق تجزیه و تحلیل خودکار تصویربرداری از بیمار و ردیابی دقیق آناتومی و ابزار جراحی در طول دوره بعد از عمل، بسیار مهم هستند [۵۵، ۵۶]. اگرچه هنوز هیچ سیستم جراحی نمی تواند به طور کاملاً مستقل عمل کند، ربات ها نتایج امیدوارکننده ای را در کارهایی مانند ردیابی آناتومیک، بخیه زدن و نمونه برداری بیوپسی نشان داده اند [۵۷].

زمینه اورولوژی با افزایش استفاده از سیستم های جراحی نیمه مستقل مانند Aquablation، با مطالعاتی که مزایای کمک رباتیک را در روش های درمانی نشان می دهد، افزایش یافته است [۵۸]. پیشرفت در انتخاب نامزدهای جراحی و توسعه سیستم های رباتیک جراحی خودکار می تواند به طور قابل توجهی دقت جراحی و نتایج بیمار را بهبود بخشد [۵۵]. جراحی رباتیک از تجسم سه بعدی پیشرفته برای تقویت مهارت ها و دقت جراح استفاده می کند. با این حال، عدم وجود بازخورد لمسی می تواند بر نتایج جراحی تأثیر منفی بگذارد [۵۹]. نشانه های بصری به تنهایی بر اعمالی مانند تشریح، اعمال فشار و ارزیابی پاسخ بافت نظارت می کنند، که می تواند منجر به مسائلی مانند نیروی بیش از حد بر بافت های ظریف یا نیروی ناکافی در حین گره زدن شود. برای مثال، نیروی بیش از حد در طول پروستاتکتومی رادیکال رباتیک (RARP) می تواند به بسته های عصبی عروقی آسیب برساند، باعث نوروپراکسی و تأخیر در بهبود عملکرد جنسی شود، در حالی که نیروی ناکافی ممکن است منجر به احتباس ضعیف بخیه شود [۵۵، ۵۹]. برای رسیدگی به این مسائل، دای و همکاران [۵۹] یک سیستم هشدار پیشرفته را برای تشخیص شکستگی بخیه ایجاد کردند که شامل تشخیص برش دو محوره و بازخورد لمسی برای هشدار به جراح قبل از پارگی بالقوه بخیه است. این سیستم که با سیستم جراحی داونچی ادغام شده است، با نزدیک شدن تنش بخیه به حد خود، بازخورد ارتعاشی را ارائه می دهد که منجر به کاهش قابل توجه شکستگی بخیه و لغزش گره و بهبود سازگاری کار در بین جراحان بی تجربه می شود [۵۹].

علاوه بر این، پیانا و همکاران [۶۰] استفاده از راهنمایی واقعیت افزوده سه بعدی (AR) را در طول پیوند کلیه (KT) برای افزایش ناوبری جراحی و ایمنی برای بیماران مبتلا به بیماری عروقی آتروماتیک نشان دادند. این فناوری که نیازی به

ورودی لمسی ندارد، از تصویربرداری سی تی اسکن با دقت بالا برای ایجاد مدل های مجازی سه بعدی استفاده می کند که در طول پیوند کلیه به کمک ربات (RAKT) با استفاده از کنسول داوینچی بر روی عروق قرار می گیرند [۶۰]. بینایی کامپیوتری (CV)، زیرمجموعه ای از یادگیری ماشینی که بر تجزیه و تحلیل تصویر تمرکز دارد، همچنین نویدبخش بهبود تشخیص و شناسایی شرایط اورولوژیک است [۶۱]. به عنوان مثال، الگوریتم های CV اعمال شده بر روی داده های تصویربرداری CT شکم می توانند به طور دقیق سنگ های کلیه را شناسایی کنند، به لطف پردازش سیگنال تصویری پیشرفته که به الگوریتم ها اجازه می دهد حتی کوچک ترین تفاوت های بصری را بین ساختارهای آناتومیک غیرطبیعی و سالم تشخیص دهند [۵۵،۶۱،۶۲].

جراحی دستگاه گوارش

جراحی کولورکتال کم تهاجمی با کمک رباتیک با هوش مصنوعی برای افزایش تجسم و بهبود دقت جراحی مورد مطالعه قرار گرفته است [۶۳]. سیستم های رباتیک اثربخشی قابل توجهی در جراحی های سرطان کولورکتال، به ویژه در روش های پیچیده مانند برداشتن مزورکتال کامل و برداشتن کامل مزوکولون نشان داده اند. پلتفرم رباتیک به جراحان در انجام تشریح عروق، آناستوموزهای داخل بدنی و لنفادنکتومی، به ویژه در نواحی چالش برانگیز آناتومیکی مانند مناطق نزدیک به ساختارهای عروقی بحرانی یا دیواره های جانبی لگن، به جراحان کمک می کند [۶۴]. بسیاری از مراکز پزشکی در حال حاضر استفاده از کمک رباتیک را برای برداشتن رکتوم استاندارد کرده اند، که منعکس کننده افزایش موفقیت و مزایای جراحی رباتیک در این روش های تکنیکی سخت کولورکتال است [۱،۶۵]. یکی از نگرانی های اصلی در مورد پذیرش گسترده کمک رباتیک در جراحی کولورکتال، هزینه بالا بوده است. با این وجود، شواهد قابل توجهی به طور مداوم مزایای غیرقابل انکار جراحی رباتیک را نشان می دهد، به ویژه در کولکتومی چپ و روش های مختلف رکتوم، که اغلب از قابلیت های سیستم های لاپاراسکوپی سه بعدی پیشرفته پیشی می گیرد [۱۵،۶۶]. جراحی با کمک رباتیک می تواند بر محدودیت های لاپاراسکوپی سنتی غلبه کند و مزایایی مانند کاهش از دست دادن خون، اقامت کوتاه تر در بیمارستان، ترمیم سریع تر عملکرد روده، نتایج انکولوژیکی مطلوب، و نرخ تبدیل کمتر به جراحی باز ارائه می دهد.

یک متاآنالیز توسط تراستولی و همکاران [۶۷] تأیید کرد که جراحی های کولورکتال رباتیک در مقایسه با روش های لاپاراسکوپی منجر به عوارض بعد از عمل و عفونت های محل جراحی کمتری می شود [۶۷]. یک نوآوری امیدوارکننده در برداشتن رکتوم رباتیک، ادغام فناوری Firefly است، که به ویژه در طول بستن پایین ساقه شریان مزانتريک تحتانی (IMA) سودمند است [۶۸]. دقت ارائه شده توسط روبات ها در دیسکسیون خلفی صفاقی و لگنی برای لنفادنکتومی دقیق در اطراف IMA بسیار مهم است [۶۸]. از زمانی که Cadierre و همکاران [۶۹] اولین موردی را در سال ۱۹۹۹ گزارش کردند، استفاده از رباتیک در جراحی چاقی در حال پیشرفت است. بای پس معده Roux-en-Y به طور گسترده ای به عنوان موثرترین روش جراحی برای چاقی شدید در نظر گرفته می شود و جراحی رباتیک به دلیل مزایای مستند آن به عنوان یک فناوری امیدوارکننده برای بهبود این روش ظاهر شده است [۷۰]. این روش گسترده ترین روش چاقی

رباتیک مورد مطالعه است [۷۰]. اسلیو گاسترکتومی نیز به دلیل خطر کم عوارض، نتایج عالی و سادگی فنی درک شده محبوبیت پیدا کرده است [۷۱]. با این حال، شامل چالش های خاصی مانند خطر نشت در امتداد خط اصلی و نیاز به تشریح دقیق در قسمت چپ و ناحیه هیاتوس برای به حرکت درآوردن فوندوس است [۷۱]. جراحی رباتیک مزایایی نسبت به جراحی لاپاراسکوپی دارد، از جمله قابلیت های اندو مچ دست که تشریح دقیق و بخیه زدن خط اصلی را تسهیل می کند [۷۱].

یک بررسی سیستماتیک توسط Cirocchi و همکاران [۷۲] نشان داد که جراحی چاقی رباتیک به طور فزاینده ای نه تنها در موارد تکراری بلکه در روش های اولیه، مانند ایجاد آناستوموزهای داخل بدن در طی بای پس معده Roux-en-Y یا مدیریت برش های پیچیده در گاسترکتومی اسلیو استفاده می شود [۷۲]. فناوری رباتیک همچنین کارایی بستن انتروتومی یا گاستروتومی را حتی زمانی که از منگنه برای آناستوموز استفاده می شود، بهبود می بخشد [۷۲]. در جراحی لوزالمعده، مطالعه ۲۵۰ رزکسیون رباتیک پانکراس نشان داد که جراحی با کمک رباتیک هم برای شرایط انکولوژیک و هم برای شرایط خوش خیم، با نرخ تبدیل کم به جراحی باز امکان پذیر است [۷۳]. با این حال، بسیار مهم است که به یاد داشته باشیم که فناوری رباتیک ابزاری است که در نهایت به تخصص جراح متکی است [۷۴]. پلت فرم رباتیک جراحان را قادر می سازد تا بر محدودیت های لاپاراسکوپی، به ویژه در روش هایی مانند لنفادنکتومی D۲ غلبه کنند [۷۵].

کاربرد ربات جراحی در کارهایی مانند انجام آناستوموزهای دوخته شده با روباتیک و پیمایش کالبد شکافی دشوار در نزدیکی محل اتصال معده به مری و ناحیه پیلور مشهود است، که به ویژه در کل گاسترکتومی سودمند است [۷۶].

مطالعه ای که توسط Oliveira و همکاران [۷۷] در جراحی سر و گردن انجام شد، همچنین سیستم های رباتیک مجهز به هوش مصنوعی را برای مهارت بیشتر و کاهش بالقوه عوارض پس از عمل در جراحی سر و گردن نشان داد [۷۷]. این مثال ها کاربردهای متنوع هوش مصنوعی در جراحی رباتیک و پتانسیل آن برای متحول کردن مراقبت های جراحی در رشته های مختلف را نشان می دهد. با ادامه تحقیق و توسعه، می توان انتظار پیشرفت های بیشتری را در این زمینه هیجان انگیز داشت.

جدول ۱ ویژگی های هوش مصنوعی مربوط به جراحی رباتیک

| ویژگی | توضیحات | مزایای بالقوه |
|-----------------------------------|--|--|
| دقت پیشرفته با پیش بینی حرکت [۸۲] | هوش مصنوعی می تواند حرکات جراح را تجزیه و تحلیل کند و اقدامات بعدی آنها را پیش بینی کند، و به ابزارهای رباتیک اجازه می دهد تا یکپارچه پیش بینی کنند و دنبال کنند | - زمان واکنش به حداقل می رسد - بهبود دقت جراحی - کاهش آسیب بافتی |

| | | |
|---|--|---|
| تشخیص بافت حین عمل با بینایی مجهز به [۸۳]AI | الگوریتم های هوش مصنوعی می توانند ویدیوی جراحی را در زمان واقعی برای شناسایی ساختارهای آناتومیک حیاتی و عوارض احتمالی آنالیز کنند. | - بهبود ناوبری جراحی - کاهش خطر آسیب تصادفی |
| بخیه زدن و گره زدن خودکار [۳۵] | پیشرفت در هوش مصنوعی و رباتیک منجر به توسعه سیستم های بخیه زنی و گره بندی خودکار شده است. | - کاهش خستگی جراح - بهبود ثبات بخیه ها - بالقوه کوتاه تر شدن زمان جراحی شده است. |
| برنامه ریزی جراحی شخصی با هوش مصنوعی [۷۸] | هوش مصنوعی می تواند داده های بیمار (اسکن ها، سابقه پزشکی) را برای ایجاد طرح های جراحی فردی و پیش بینی نتایج بالقوه تجزیه و تحلیل کند. | - رویکردهای جراحی بهینه - بهبود انتخاب بیمار برای جراحی رباتیک - نتایج بلند مدت بالقوه بهتر |

مزایا و محدودیت های ادغام هوش مصنوعی در جراحی های رباتیک

مزایا

- دقت و صحت افزایش یافته: هوش مصنوعی می تواند به جراحان در دستیابی به دقت بیشتر در طول روش های ظریف کمک کند، که به طور بالقوه منجر به بهبود نتایج جراحی می شود [۷۸].
- کاهش خستگی جراح: هوش مصنوعی می تواند کارهای تکراری را خودکار کند، خستگی جراح را به حداقل برساند و به طور بالقوه تمرکز را در طول جنبه های مهم جراحی بهبود بخشد [۷۹].
- ایمنی بهبود یافته: سیستم های مبتنی بر هوش مصنوعی می توانند بازخورد بلادرنگ در مورد عوارض احتمالی، مانند خونریزی یا برخورد ابزار، ارائه دهند، و به جلوگیری از خطاهای جراحی کمک می کنند [۸۰، ۸۱]. برخی از ویژگی های هوش مصنوعی با مزایای آنها در جدول ۱ خلاصه شده است.

محدودیت ها

- هزینه های بالای توسعه و پیاده سازی: توسعه و اجرای سیستم های جراحی رباتیک مبتنی بر هوش مصنوعی گران است، از جمله هزینه خرید اولیه، تعمیر و نگهداری مداوم، و ارتقاء زیرساخت. این می تواند دسترسی آنها را محدود کند، به ویژه برای بیمارستان های کوچکتر و موسسات مراقبت های بهداشتی در محیط های محدود به منابع [۸۴، ۸۵].

- تکیه بر کیفیت داده ها: اثربخشی الگوریتم های هوش مصنوعی به شدت به کیفیت و کمیت داده های آموزشی بستگی دارد. سوگیری در داده های آموزشی می تواند منجر به تصمیم گیری مغرضانه توسط سیستم هوش مصنوعی شود و به طور بالقوه نابرابری های موجود در مراقبت های بهداشتی را تشدید کند [۸۶].
- ملاحظات اخلاقی: افزایش استقلال هوش مصنوعی در جراحی نگرانی های اخلاقی را در مورد مسئولیت و مسئولیت در صورت بروز حوادث نامطلوب ایجاد می کند. برای اطمینان از ایمنی بیمار و رسیدگی به مسائل پزشکی-حقوقی، دستورالعمل ها و مقررات واضحی مورد نیاز است [۸۷].

چالش های پیش روی پیاده سازی هوش مصنوعی در جراحی های رباتیک

- موانع نظارتی: دریافت تاییدیه های نظارتی برای سیستم های جراحی رباتیک Aldriven می تواند یک فرآیند پیچیده و زمان بر باشد و مانع پذیرش گسترده تر آنها شود [۸۸، ۸۹]. نهادهای نظارتی باید دستورالعمل های روشنی را برای ارزیابی ایمنی و کارایی این سیستم ها و در عین حال پرورش نوآوری ایجاد کنند.
- ادغام با گردش کار موجود: ادغام سیستم های رباتیک مبتنی بر هوش مصنوعی در جریان کار جراحی موجود می تواند چالش برانگیز باشد. این ممکن است به تغییراتی در پویایی تیم جراحی نیاز داشته باشد و نیاز به آموزش اضافی برای جراحان و کارکنان جراحی برای انطباق با فناوری جدید داشته باشد [۹۰، ۹۱].
- نگرانی های امنیت سایبری: اتکای فزاینده به سیستم های هوش مصنوعی در جراحی، نگرانی های امنیت سایبری را در رابطه با هک شدن احتمالی یا نقص هایی که می تواند ایمنی بیمار را به خطر بیندازد، ایجاد می کند. اقدامات امنیتی قوی برای اطمینان از یکپارچگی و قابلیت اطمینان این سیستم ها ضروری است [۹۲، ۹۳].

جهت های آینده

- ادغام هوش مصنوعی در جراحی رباتیک یک زمینه به سرعت در حال تکامل با پتانسیل بسیار زیاد برای تغییر مراقبت های جراحی است. در اینجا برخی از مسیرهای هیجان انگیز آینده وجود دارد که باید در نظر بگیرید:
- خودمختاری پیشرفته: پیشرفت های هوش مصنوعی می تواند منجر به توسعه سیستم های جراحی رباتیک مستقل تر شود که به طور بالقوه جراحان را قادر می سازد تا روش های پیچیده را از راه دور یا با حداقل کمک انجام دهند [۹۴، ۹۵]. با این حال، بررسی دقیق پیامدهای اخلاقی و اطمینان از نظارت جراح بسیار مهم است.
- جراحی شخصی: هوش مصنوعی می تواند برای تجزیه و تحلیل داده های بیمار و تطبیق رویکردهای جراحی با نیازهای فردی استفاده شود که منجر به درمان های شخصی تر و مؤثرتر می شود [۹۶، ۹۷]. این می تواند شامل عواملی مانند آناتومی بیمار، تاریخچه پزشکی و تغییرات ژنتیکی باشد.
- بهبود آموزش جراحی: شبیه سازی های مبتنی بر هوش مصنوعی می توانند محیط های آموزشی واقعی را برای جراحان فراهم کنند تا روش های پیچیده را تمرین کرده و مهارت های خود را اصلاح کنند، که به طور بالقوه

منجر به بهبود نتایج جراحی می شود [۹۸،۹۹]. واقعیت مجازی (VR) ادغام شده با هوش مصنوعی می تواند تجربه آموزشی را بیشتر کند.

فن آوری های به کمک رباتیک به طور اساسی نحوه اجرای وظایف مختلف را متحول کرده است که یکی از مهم ترین پیشرفت ها ادغام هوش مصنوعی (AI) است [۱۰۰].

ادغام الگوریتم های هوش مصنوعی قابلیت های سیستم های رباتیک را با امکان یادگیری، تطبیق و تصمیم گیری در زمان واقعی افزایش می دهد [۱۰۰]. این پیشرفت به ربات ها اجازه می دهد تا کارهای پیچیده را با افزایش کارایی و دقت انجام دهند. الگوریتم های یادگیری ماشین همچنین تعامل انسان ربات ها را بهبود می بخشد و ربات ها را بصری تر و پاسخگو تر به نیازهای کاربر می کنند.

علیرغم این پیشرفت ها، در حال حاضر هیچ مدرکی مبنی بر اینکه هوش مصنوعی بتواند به طور مستقل وظایف حیاتی در جراحی های با کمک رباتیک را که نتایج بیمار را تعیین می کنند، تشخیص دهد، وجود ندارد. بنابراین، مطالعات گسترده ای بر روی مجموعه داده های بزرگ و اعتبار سنجی خارجی برای تایید کارایی الگوریتم های هوش مصنوعی در جراحی های به کمک رباتیک مورد نیاز است [۱۰۰]. افزایش خودمختاری در جراحی رباتیک این پتانسیل را دارد که نتایج جراحی را استاندارد کند و آنها را کمتر به آموزش، تجربه و تغییرات عملکرد روزانه جراح وابسته کند [۲۴].

یک مطالعه بقا نشان داد که یک سیستم روباتیک توسعه یافته می تواند با عملکرد یک جراح متخصص مطابقت داشته باشد [۲۴]. با این حال، جراحی های به کمک رباتیک هنوز در شرایط اورژانسی به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته اند، اگرچه تجربیات اولیه در ادبیات مستند شده است [۱۰۱]. دو حوزه امیدوارکننده از تحقیقات در حال انجام در این زمینه، میکروروباتیک و جراحی از راه دور هستند [۱۰۲،۱۰۳]. تحقیقات میکروروباتیک شامل توسعه آندوسکوپ های کپسولی قابل حمل برای کارهای تشخیصی مختلف، کاربردهای جراحی و تحویل هدفمند دارو می شود [۱۰۲،۱۰۳]. این میکروروبات ها، که اندازه ای میلی متری دارند، می توانند توسط آهنرباهای خارج از بدن برای انجام عملکردهای خاص، مانند استفاده از یک گیره نیتینول برای توقف خونریزی مزمن در طول بیوپسی در مدل های خوک، هدایت شوند [۱۰۲،۱۰۳].

تحقیقات در میکرو رباتیک بر چهار حوزه کلیدی متمرکز است: عملکرد کوچک، پیشراجه محدود، تجسم ثابت، و تله سازی دقیق [۱۰۳]. ادغام هوش مصنوعی در فن آوری های رباتیک با بهبود کارایی، دقت و تعامل کاربر سیستم های رباتیک، زمینه را به پیش می برد. با این حال، تحقیقات بیشتر برای تایید اثربخشی مستقل هوش مصنوعی در وظایف جراحی حیاتی ضروری است. افزایش استقلال در جراحی رباتیک می تواند منجر به نتایج استانداردتر شود و حوزه های نوظهوری مانند میکروروباتیک و جراحی از راه دور نوید قابل توجهی برای کاربردهای آینده دارند.

نتیجه گیری

ادغام هوش مصنوعی در جراحی رباتیک نویدبخش انقلابی در مراقبت های جراحی است. با افزایش دقت، کارایی و دسترسی، هوش مصنوعی پتانسیل بهبود نتایج بیمار، کاهش عوارض و دموکراتیک کردن دسترسی به تخصص جراحی تخصصی را دارد. با این حال، پرداختن به چالش های مربوط به هزینه، کیفیت داده ها، ملاحظات اخلاقی و موانع قانونی برای پذیرش مسئولانه و گسترده این فناوری تحول آفرین بسیار مهم است. همانطور که هوش مصنوعی به تکامل خود ادامه می دهد، آینده جراحی رباتیک حتی قابل توجه تر می شود و راه را برای دوره جدیدی از مراقبت های جراحی شخصی، دقیق و بیمار محور هموار می کند.

منابع

1. Fairag M, Almahdi RH, Siddiqi AA, et al. . Robotic revolution in surgery: diverse applications across specialties and future prospects review article. Cureus ۲۰۲۴;۱۶:e۵۲۱۴۸. - PMC - PubMed
2. B.J. C. “artificial intelligence” [Internet]. [Available from: <https://www.britannica.com/technology/artificial-intelligence>
3. Paul D, Sanap G, Shenoy S, et al. . Artificial intelligence in drug discovery and development. Drug Discov Today ۲۰۲۱;۲۶:۸۰-۹۳. - PMC - PubMed
4. Knudsen JE, Ghaffar U, Ma R, et al. . Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery. J Robot Surg ۲۰۲۴;۱۸:۱۰۲. - PMC - PubMed
5. Theodore N, Arnold PM, Mehta AI. Introduction: the rise of the robots in spinal surgery. Neurosurg Focus ۲۰۱۸;۴۵(VideoSuppl ۱):Intro. doi:۱۰.۳۱۷۱/۲۰۱۸.۷.FocusVid.Intro - DOI - PubMed
6. Da Vinci Robotic System: Food and Drug Administration; [Available from: https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf۲۰/K۲۰۲۸۳۴.pdf.
7. Bi WL, Hosny A, Schabath MB, et al. . Artificial intelligence in cancer imaging: clinical challenges and applications. CA Cancer J Clin ۲۰۱۹;۶۹:۱۲۷-۱۵۷. - PMC - PubMed
8. Midthun DE. Early diagnosis of lung cancer. F۱۰۰۰Prime Rep ۲۰۱۳;۵:۱۲. - PMC - PubMed
9. Shaffie A, Soliman A, Ghazal M, Taher F, Dunlap N, Wang B, et al.. A new framework for incorporating appearance and shape features of lung nodules for precise diagnosis of lung cancer IEEE International Conference on Image Processing (ICIP); ۲۰۱۷.
10. Mansour M, Cumak EN, Kutlu M, et al. . Deep learning based suture training system. Surg Open Sci ۲۰۲۳;۱۵:۱-۱۱. - PMC - PubMed
11. Ryan Yimeng L, Alyssa Imperatore Z, Lauryn U, et al. . Artificial Intelligence in Surgery, Surgical Subspecialties, and Related Disciplines In: Stanislaw PS, editor. Artificial Intelligence in Medicine and Surgery. Rijeka: IntechOpen; ۲۰۲۳.
12. Pierson HA. Deep Learning in Robotics: A Review of Recent Research [Internet]. [Available from: <https://arxiv.org/pdf/۱۷۰۷.۰۷۲۱۷>
13. Liu J, Dong X, Yang Y, et al. . Trajectory tracking control for uncertain robot manipulators with repetitive motions in task space. Math Problems Eng ۲۰۲۱;۲۰۲۱:۸۸۳۸۹۲۷.
14. Okamura AM. Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery. Curr Opin Urol ۲۰۰۹;۱۹:۱۰۷-۱۰۷. - PMC - PubMed

۱۵. Bergholz M, Ferle M, Weber BM. The benefits of haptic feedback in robot assisted surgery and their moderators: a meta-analysis. Sci Rep ۲۰۲۳;۱۳:۱۹۲۱۵. - PMC - PubMed
۱۶. Shademan A, Decker RS, Opfermann JD, et al. . Supervised autonomous robotic soft tissue surgery. Sci Transl Med ۲۰۱۶;۸:۳۳۷ra۶۴. - PubMed
۱۷. Rivero-Moreno Y, Rodriguez M, Losada-Muñoz P, et al. . Autonomous robotic surgery: has the future arrived? Cureus ۲۰۲۴;۱۶:e۵۲۲۴۳. - PMC - PubMed
۱۸. Gumbs AA, Frigerio I, Spolverato G, et al. . Artificial intelligence surgery: how do we get to autonomous actions in surgery? Sensors ۲۰۲۱;۲۱:۵۵۲۶. - PMC - PubMed
۱۹. Slawinski PR, Taddese AZ, Musto KB, et al. . Autonomous retroflexion of a magnetic flexible endoscope. IEEE Robot Automat Lett ۲۰۱۷;۲:۱۳۵۲-۱۳۵۹. - PMC - PubMed
۲۰. Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al. . Medical robotics—regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. Sci Robot ۲۰۱۷;۲:eaam۸۶۳۸. - PubMed
۲۱. Attanasio A Scaglioni B De Momi E, et al. , Valdastrì PJARoC, Robotics, Systems A. Autonomy in surgical robotics. ۲۰۲۱;۴:۶۵۱-۷۹.
۲۲. Rajnai Z, Kocsis I. Assessing industry ۴.۰ readiness of enterprises. IEEE ۱۶th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI); ۲۰۱۸:۲۲۵-۲۳۰.
۲۳. Martin JW, Slawinski PR, Scaglioni B, et al. . ۳۸۲ Assistive-autonomy in colonoscopy: propulsion of a magnetic flexible endoscope ۲۰۱۹;۸۹:AB۷۶-AB۷۷.
۲۴. Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, et al. . Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis. Sci Robot ۲۰۲۲;۷:eabj۲۹۰۸. - PMC - PubMed
۲۵. Liow MHL, Chin PL, Pang HN, et al. . THINK surgical TSolution-One(®) (Robodoc) total knee arthroplasty. Sicot-j ۲۰۱۷;۳:۶۳. - PMC - PubMed
۲۶. Choi CQJIS. IEEE Spectrum. ۲۰۲۰;۲۱.
۲۷. Strickland E. IEEE Spectrum. Retrieved from Facebook Announces” Typing-by-Brain” Project; ۲۰۱۷: <http://spectrum>
۲۸. Rose PT, Nusbaum B. Robotic hair restoration. Dermatol Clin ۲۰۱۴;۳۲:۹۷-۱۰۷. - PubMed
۲۹. Kilby W, Dooley JR, Kuduvalli G, et al. . The CyberKnife Robotic Radiosurgery System in ۲۰۱۰. Technol Cancer Res Treat ۲۰۱۰;۹:۴۳۳-۴۵۲. - PubMed
۳۰. Li M, Jiang Y, Zhang Y, et al. . Medical image analysis using deep learning algorithms. Front Public Health ۲۰۲۳;۱۱:۱۲۷۳۲۵۳. - PMC - PubMed
۳۱. Madani A, Namazi B, Altieri MS, et al. . Artificial intelligence for intraoperative guidance: using semantic segmentation to identify surgical anatomy during laparoscopic cholecystectomy. Ann Surg ۲۰۲۲;۲۷۶:۳۶۳-۳۶۹. - PMC - PubMed
۳۲. Khalid S, Goldenberg M, Grantcharov T, et al. . Evaluation of deep learning models for identifying surgical actions and measuring performance. JAMA Netw Open ۲۰۲۰;۳:e۲۰۱۶۶۴-e۲۰۱۶۶۴. - PubMed
۳۳. Pedersen JS, Laursen MS, Rajeeth Savarimuthu T, et al. . Deep learning detects and visualizes bleeding events in electronic health records. Res Pract Thromb Haemostasis ۲۰۲۱;۵:e۱۲۵۰۵. - PMC - PubMed
۳۴. Pangal DJ, Kugener G, Zhu Y, et al. . Expert surgeons and deep learning models can predict the outcome of surgical hemorrhage from ۱ min of video. Sci Rep ۲۰۲۲;۱۲:۸۱۳۷. - PMC - PubMed
۳۵. <https://arxiv.org/pdf/۲۳۰۹.۰۰۷۷۳> Ren CQaH. Deep Reinforcement Learning in Surgical Robotics: Enhancing the Automation Level [Available from:

۳۶. Marin-Cuartas M, Sá MP, Torregrossa G, et al. . Minimally invasive coronary artery surgery: Robotic and nonrobotic minimally invasive direct coronary artery bypass techniques. JTCVS Tech ۲۰۲۱;۱۰:۱۷۰-۱۷۷. - PMC - PubMed
۳۷. Cao C, Indraratna P, Doyle M, et al. . A systematic review on robotic coronary artery bypass graft surgery. ۲۰۱۶;۵:۵۳۰-۵۴۳. - PMC - PubMed
۳۸. Bonatti J, Wallner S, Crailsheim I, et al. . Minimally invasive and robotic coronary artery bypass grafting—a ۲۵-year review. J Thorac Dis ۲۰۲۰;۱۳:۱۹۲۲-۱۹۴۴. - PMC - PubMed
۳۹. Sulague RM, Beloy FJ, Medina JR, et al. . Artificial Intelligence in Cardiac Surgery: A Systematic Review. - PubMed
۴۰. Tangsrivimol JA, Schonfeld E, Zhang M, et al. . Artificial intelligence in neurosurgery: a state-of-the-art review from past to future. Diagnostics (Basel, Switzerland) ۲۰۲۳;۱۳:۲۴۲۹. - PMC - PubMed
۴۱. Williams S, Layard Horsfall H, Funnell JP, et al. . Artificial intelligence in brain tumour surgery-an emerging paradigm. Cancers ۲۰۲۱;۱۳:۵۰۱۰. - PMC - PubMed
۴۲. Xu J, Meng Y, Qiu K, et al. . Applications of artificial intelligence based on medical imaging in glioma: current state and future challenges. ۲۰۲۲;۱۲:۸۹۲۰۵۶. doi:۱۰.۳۳۸۹/fonc.۲۰۲۲.۸۹۲۰۵۶ - DOI - PMC - PubMed
۴۳. Lee K-S, Jung SH, Kim D-H, et al. . Artificial intelligence- and computer-assisted navigation for shoulder surgery ۲۰۲۴;۳۲:۱۰۲۲۵۵۳۶۲۴۱۲۴۳۱۶۶. - PubMed
۴۴. Villatte G, Muller AS, Pereira B, et al. . Use of Patient-Specific Instrumentation (PSI) for glenoid component positioning in shoulder arthroplasty. A systematic review and meta-analysis. PLoS ONE ۲۰۱۸;۱۳:e۰۲۰۱۷۵۹. - PMC - PubMed
۴۵. Roche M. The MAKO robotic-arm knee arthroplasty system. Arch Orthop Trauma Surg ۲۰۲۱;۱۴۱:۲۰۴۳-۲۰۴۷. - PubMed
۴۶. Batailler C, Fernandez A, Swan J, et al. . MAKO CT-based robotic arm-assisted system is a reliable procedure for total knee arthroplasty: a systematic review. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc ۲۰۲۱;۲۹:۳۵۸۵-۳۵۹۸. - PubMed
۴۷. St Mart JP, Goh EL, Shah Z. Robotics in total hip arthroplasty: a review of the evolution, application and evidence base. EFORT Open Rev ۲۰۲۰;۵:۸۶۶-۸۷۳. - PMC - PubMed
۴۸. Domb BG, Chen JW, Lall AC, et al. . Minimum ۵-year outcomes of robotic-assisted primary total hip arthroplasty with a nested comparison against manual primary total hip arthroplasty: a propensity score-matched study. J Am Acad Orthop Surg ۲۰۲۰;۲۸:۸۴۷-۸۵۶. - PubMed
۴۹. Shim E, Kim JY, Yoon JP, et al. . Author Correction: Automated rotator cuff tear classification using ۳D convolutional neural network. Sci Rep ۲۰۲۱;۱۱:۱۵۹۹۶. - PMC - PubMed
۵۰. Kim JY, Ro K, You S, et al. . Development of an automatic muscle atrophy measuring algorithm to calculate the ratio of supraspinatus in supraspinous fossa using deep learning. Comput Methods Programs Biomed ۲۰۱۹;۱۸۲:۱۰۵۰۶۳. - PubMed
۵۱. Batailler C, Shatrov J, Sappey-Marini E, et al. . Artificial intelligence in knee arthroplasty: current concept of the available clinical applications. Arthroplasty (London, England) ۲۰۲۲;۴:۱۷. - PMC - PubMed
۵۲. Kayani B, Haddad FS. Robotic total knee arthroplasty: clinical outcomes and directions for future research. Bone Joint Res ۲۰۱۹;۸:۴۳۸-۴۴۲. - PMC - PubMed
۵۳. Lisacek-Kiosoglous AB, Powling AS, Fontalis A, et al. . Artificial intelligence in orthopaedic surgery. ۲۰۲۳;۱۲:۴۴۷-۴۵۴. doi:۱۰.۱۳۰۲/۲۰۴۶-۳۷۵۸,۱۲۷.Bjr-۲۰۲۳-۰۱۱۱.R۱ - DOI - PMC - PubMed

۵۴. Kumar A, Patel VR, Panaiyadiyan S, et al. . Nerve-sparing robot-assisted radical prostatectomy: current perspectives. Asian J Urol ۲۰۲۱;۸:۲-۱۳. - PMC - PubMed
۵۵. Bellos T, Manolitsis I, Katsimperi S, et al. . Artificial intelligence in urologic robotic oncologic surgery: a narrative review. Cancers ۲۰۲۴;۱۶:۱۷۷۵. - PMC - PubMed
۵۶. Yildirim M, Bingol H, Cengil E, et al. . Automatic classification of particles in the urine sediment test with the developed artificial intelligence-based hybrid model. Diagnostics (Basel, Switzerland) ۲۰۲۳;۱۳:۱۲۹۹. - PMC - PubMed
۵۷. Moustris GP, Hiridis SC, Deliparaschos KM, et al. . Evolution of autonomous and semi-autonomous robotic surgical systems: a review of the literature. Int J Med Robot + Computer Assist Surg ۲۰۱۱;۷:۳۷۵-۳۹۲. - PubMed
۵۸. Roehrborn CG, Teplitzky S, Das AK. Aquablation of the prostate: a review and update. Can J Urol ۲۰۱۹;۲۶(Suppl ۱):۲۰-۲۴. - PubMed
۵۹. Dai Y, Abiri A, Pensa J, et al. . Biaxial sensing suture breakage warning system for robotic surgery. Biomed Microdevices ۲۰۱۹;۲۱:۱۰. - PMC - PubMed
۶۰. Piana A, Gallioli A, Amparore D, et al. . Three-dimensional augmented reality-guided robotic-assisted kidney transplantation: breaking the limit of atheromatic plaques. Eur Urol ۲۰۲۲;۸۲:۴۱۹-۴۲۶. - PubMed
۶۱. Liu J, Wang S, Turkbey EB, et al. . Computer-aided detection of renal calculi from noncontrast CT images using TV-flow and MSER features. Med Phys ۲۰۱۵;۴۲:۱۴۴-۱۵۳. - PMC - PubMed
۶۲. Liu J, Wang S, Linguraru MG, et al. . Computer-aided detection of exophytic renal lesions on non-contrast CT images. Med Image Anal ۲۰۱۵;۱۹:۱۵-۲۹. - PMC - PubMed
۶۳. Erozkhan K, Gorgun E. Robotic colorectal surgery and future directions. Am J Surg ۲۰۲۴;۲۳۰:۹۱-۹۸. - PubMed
۶۴. Gómez Ruiz M, Lainez Escribano M, Cagigas Fernández C, et al. . Robotic surgery for colorectal cancer. Ann Gastroenterol Surg ۲۰۲۰;۴:۶۴۶-۶۵۱. - PMC - PubMed
۶۵. Guerrieri M, Campagnacci R, Sperti P, et al. . Totally robotic vs ۳D laparoscopic colectomy: a single centers preliminary experience. World J Gastroenterol ۲۰۱۵;۲۱:۱۳۱۵۲-۱۳۱۵۹. - PMC - PubMed
۶۶. Weaver A, Steele S. Robotics in colorectal surgery. F1۰۰۰Res ۲۰۱۶;۵:۲۳۷۳. - PMC - PubMed
۶۷. Trastulli S, Cirocchi R, Desiderio J, et al. . Robotic versus laparoscopic approach in colonic resections for cancer and benign diseases: systematic review and meta-analysis. PLoS ONE ۲۰۱۵;۱۰:e۰۱۳۴۰۶۲. - PMC - PubMed
۶۸. Bae SU, Min BS, Kim NK. Robotic low ligation of the inferior mesenteric artery for rectal cancer using the firefly technique. Yonsei Med J ۲۰۱۵;۵۶:۱۰۲۸-۱۰۳۵. - PMC - PubMed
۶۹. Cadiere GB, Himpens J, Vertruyen M, et al. . The world's first obesity surgery performed by a surgeon at a distance. Obes Surg ۱۹۹۹;۹:۲۰۶-۲۰۹. - PubMed
۷۰. Kersebaum JN, Möller T, von Schönfels W, et al. . Robotic Roux-en-Y gastric bypass procedure guide. JSLS ۲۰۲۰;۲۴:e۲۰۲۰,۰۰۰۶۲. - PMC - PubMed
۷۱. Bindal V, Bhatia P, Dudeja U, et al. . Review of contemporary role of robotics in bariatric surgery. J Minim Access Surg ۲۰۱۵;۱۱:۱۶-۲۱. - PMC - PubMed
۷۲. Cirocchi R, Boselli C, Santoro A, et al. . Current status of robotic bariatric surgery: a systematic review. BMC Surg ۲۰۱۳;۱۳:۵۳. - PMC - PubMed

۷۳. Zureikat AH, Moser AJ, Boone BA, et al. . 3rd. ۲۰۰ robotic pancreatic resections: safety and feasibility. *Ann Surg* ۲۰۱۳;۲۵۸:۵۵۴-۵۵۹; discussion ۹-۶۲. - PMC - PubMed
۷۴. Wayne M, Steele J, Iskandar M, et al. . Robotic pancreatic surgery is no substitute for experience and clinical judgment: an initial experience and literature review. *World J Surg Oncol* ۲۰۱۳;۱۱:۱۶۰. - PMC - PubMed
۷۵. Caruso S, Patriiti A, Roviello F, et al. . Laparoscopic and robot-assisted gastrectomy for gastric cancer: current considerations. *World J Gastroenterol* ۲۰۱۶;۲۲:۵۶۹۴-۵۷۱۷. - PMC - PubMed
۷۶. Baek SJ, Lee DW, Park SS, et al. . Current status of robot-assisted gastric surgery. *World J Gastrointest Oncol* ۲۰۱۱;۳:۱۳۷-۱۴۳. - PMC - PubMed
۷۷. Oliveira CM, Nguyen HT, Ferraz AR, et al. . Robotic surgery in otolaryngology and head and neck surgery: a review. *Minim Invasive Surg* ۲۰۱۲;۲۰۱۲:۲۸۶۵۶۳. - PMC - PubMed
۷۸. Takeuchi M, Kitagawa Y. Artificial intelligence and surgery. *Ann Gastroenterol Surg* ۲۰۲۴;۸:۴-۵. - PMC - PubMed
۷۹. Rasouli JJ, Shao J, Neifert S, et al. . Artificial intelligence and robotics in spine surgery. *Glob Spine J* ۲۰۲۱;۱۱:۵۵۶-۵۶۴. - PMC - PubMed
۸۰. Choudhury A, Asan O. Role of artificial intelligence in patient safety outcomes: systematic literature review. *JMIR Med Inform* ۲۰۲۰;۸:e۱۸۵۹۹. - PMC - PubMed
۸۱. Rus G, Andras I, Vaida C, et al. . Artificial intelligence-based hazard detection in robotic-assisted single-incision oncologic surgery. *Cancers* ۲۰۲۳;۱۵:۳۳۸۷. - PMC - PubMed
۸۲. Sone K, Tanimoto S, Toyohara Y, et al. . Evolution of a surgical system using deep learning in minimally invasive surgery (Review). *Biomed Rep* ۲۰۲۳;۱۹:۴۵. - PMC - PubMed
۸۳. Yang Liu MB, Luis C. Garcia-Peraza-Herrera, Tom Vercauteren, Prokar Dasgupta, Alejandro Granados, and Sebastien Ourselin LoViT: Long Video Transformer for Surgical Phase Recognition [Available from: <https://arxiv.org/pdf/۲۳۰۵.۰۸۹۸۹>
۸۴. Shen C, Gu D, Klein R, et al. . Factors associated with hospital decisions to purchase robotic surgical systems. *MDM Policy Pract* ۲۰۲۰;۵:۲۳۸۱۴۶۸۳۲۰۹۰۴۳۶۴. - PMC - PubMed
۸۵. Peng Y, Liu Y, Lai S, et al. . Global trends and prospects in health economics of robotic surgery: a bibliometric analysis. *Int J Surg* ۲۰۲۳;۱۰۹:۳۸۹۶-۳۹۰۴. - PMC - PubMed
۸۶. Nazer LH, Zatarah R, Waldrip S, et al. . Bias in artificial intelligence algorithms and recommendations for mitigation. *PLOS Digit Health* ۲۰۲۳;۲:e۰۰۰۰۲۷۸. - PMC - PubMed
۸۷. Pressman SM, Borna S, Gomez-Cabello CA, et al. . AI and ethics: a systematic review of the ethical considerations of large language model use in surgery research. *Healthcare (Basel, Switzerland)* ۲۰۲۴;۱۲:۸۲۵. - PMC - PubMed
۸۸. Mennella C, Maniscalco U, De Pietro G, et al. . Ethical and regulatory challenges of AI technologies in healthcare: a narrative review. *Heliyon* ۲۰۲۴;۱۰:e۲۶۶۹۷. - PMC - PubMed
۸۹. Farhud DD, Zokaei S. Ethical issues of artificial intelligence in medicine and healthcare. *Iran J Public Health* ۲۰۲۱;۵۰:i-v. - PMC - PubMed
۹۰. Mehta A, Cheng Ng J, Andrew Awuah W, et al. . Embracing robotic surgery in low- and middle-income countries: potential benefits, challenges, and scope in the future. *Ann Med Surg* ۲۰۲۲;۸۴:۱۰۴۸۰۳. - PMC - PubMed
۹۱. Elendu C, Amaechi DC, Elendu TC, et al. . Ethical implications of AI and robotics in healthcare: a review. *Medicine* ۲۰۲۳;۱۰۲:e۳۶۶۷۱. - PMC - PubMed

۹۲. Jada I, Mayayise TO. The impact of artificial intelligence on organisational cyber security: an outcome of a systematic literature review. *Data Inform Manag* ۲۰۲۴;۸:۱۰۰۰۶۳.
۹۳. Gordon WJ, Ikoma N, Lyu H, et al. . Protecting procedural care-cybersecurity considerations for robotic surgery. *NPJ Digit Med* ۲۰۲۲;۵:۱۴۸. - PMC - PubMed
۹۴. Fiorini P, Goldberg KY, Liu Y, et al. . Concepts and trends n autonomy for robot-assisted surgery. *Proc IEEE Inst Electric Electr Eng* ۲۰۲۲;۱۱۰:۹۹۳-۱۰۱۱. - PMC - PubMed
۹۵. Reddy K, Gharde P, Tayade H, et al. . Advancements in robotic surgery: a comprehensive overview of current utilizations and upcoming frontiers. *Cureus* ۲۰۲۳;۱۵:e۵۰۴۱۵. - PMC - PubMed
۹۶. Rezayi S, Niakan Kalhori S R, Saeedi S. Effectiveness of artificial intelligence for personalized medicine in neoplasms: a systematic review. *Biomed Res Int* ۲۰۲۲;۲۰۲۲:۷۸۴۲۵۶۶. - PMC - PubMed
۹۷. Khansari N. The Impact of Artificial Intelligence on Personalized Medicine. ۲۰۲۴.
۹۸. Varas J, Coronel BV, Villagrán I, et al. . Innovations in surgical training: exploring the role of artificial intelligence and large language models (LLM). *Revista do Colegio Brasileiro de Cirurgioes* ۲۰۲۳;۵۰:e۲۰۲۳۶۰۵. - PMC - PubMed
۹۹. Rogers MP, DeSantis AJ, Janjua H, et al. . The future surgical training paradigm: virtual reality and machine learning in surgical education. *Surgery* ۲۰۲۱;۱۶۹:۱۲۵۰-۱۲۵۲. - PubMed
۱۰۰. Moglia A, Georgiou K, Georgiou E, et al. . A systematic review on artificial intelligence in robot-assisted surgery. *Int J Surg* ۲۰۲۱;۹۵:۱۰۶۱۵۱. - PubMed
۱۰۱. de'Angelis N, Khan J, Marchegiani F, et al. . Robotic surgery in emergency setting: ۲۰۲۱ WSES position paper. *World J Emerg Surg* ۲۰۲۲;۱۷:۴. - PMC - PubMed
۱۰۲. Probst P. A review of the role of robotics in surgery: to DaVinci and beyond!. *Mo Med* ۲۰۲۳;۱۲۰:۳۸۹-۳۹۶. - PMC - PubMed
۱۰۳. Khandalavala K, Shimon T, Flores L, et al. . Emerging surgical robotic technology: a progression toward microbots. *Ann Laparosc Endosc Surg* ۲۰۲۰;۵:۳.