

NUOVE
TECNOLOGIE

ROBOT E INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Nuove frontiere nella chirurgia del cancro ginecologico

Un'analisi dettagliata su come le tecnologie avanzate stanno trasformando le procedure chirurgiche ginecologiche



CARLO SBIROLI

Già direttore Uoc di Ginecologica Oncologia Istituto Nazionale dei Tumori "Regina Elena-IFO", Roma



ENRICO VIZZA

Direttore Dipartimento Clinica e Ricerca Oncologica. Direttore UOC Ginecologica Oncologia Istituto Nazionale dei Tumori "Regina Elena-IFO", Roma. Direttore Banca del Tessuto Ovarico delle Cellule Germinali Regione Lazio

NEI PRIMI ANNI 2000, quando la robotica cominciò ad entrare nelle nostre sale operatorie, ci chiedevamo se un giorno queste apparecchiature sarebbero state in grado di cambiare il mondo della chirurgia oncologica. In verità, allora il nostro grande sogno non era quello di avere a disposizione un robot in grado di operare in modo autonomo. Anzi, questa idea suscitava qualche perplessità perché avrebbe potuto rendere superfluo il ruolo del chirurgo. Il vero obiettivo era quello di ottenere assistenza nelle fasi più critiche dell'intervento, spesso rese difficili da un'anatomia alterata dalla presenza di cancro o da anomalie anatomiche. Ventiquattro anni dopo si deve constatare che i risultati sono stati superiori alle nostre aspettative.

Con il nuovo millennio il settore della chirurgia ha accelerato il suo rinnovamento. Siamo entrati in una fase straordinaria dell'evoluzione dell'assistenza sanitaria, guidata dai rapidi progressi della tecnologia digitale e della biologia molecolare. In appena 25 anni siamo passati da una chirurgia minimamente invasiva, che già nell'ultima decade del secolo scorso sembrava una grande conquista a beneficio del paziente, a un'era caratterizzata da procedure assistite da robot, nanotecnologia, genomica, analisi avanzata dei dati, Intelligenza Artificiale (IA), realtà aumentata e virtuale.

Nel campo della chirurgia si deve riconoscere che la robotica ha già trasformato il modo in cui vengono eseguiti molti interventi. E l'integrazione dell'IA negli ultimi anni rappresenta "un grande passo nell'evoluzione della chirurgia", soprattutto nel trattamento del cancro. Questa combinazione di tecnologie promette non solo di migliorare i risultati clinici, ma anche di rendere le procedure più sicure e meno invasive per i pazienti.

TECNOLOGIE ATTUALI

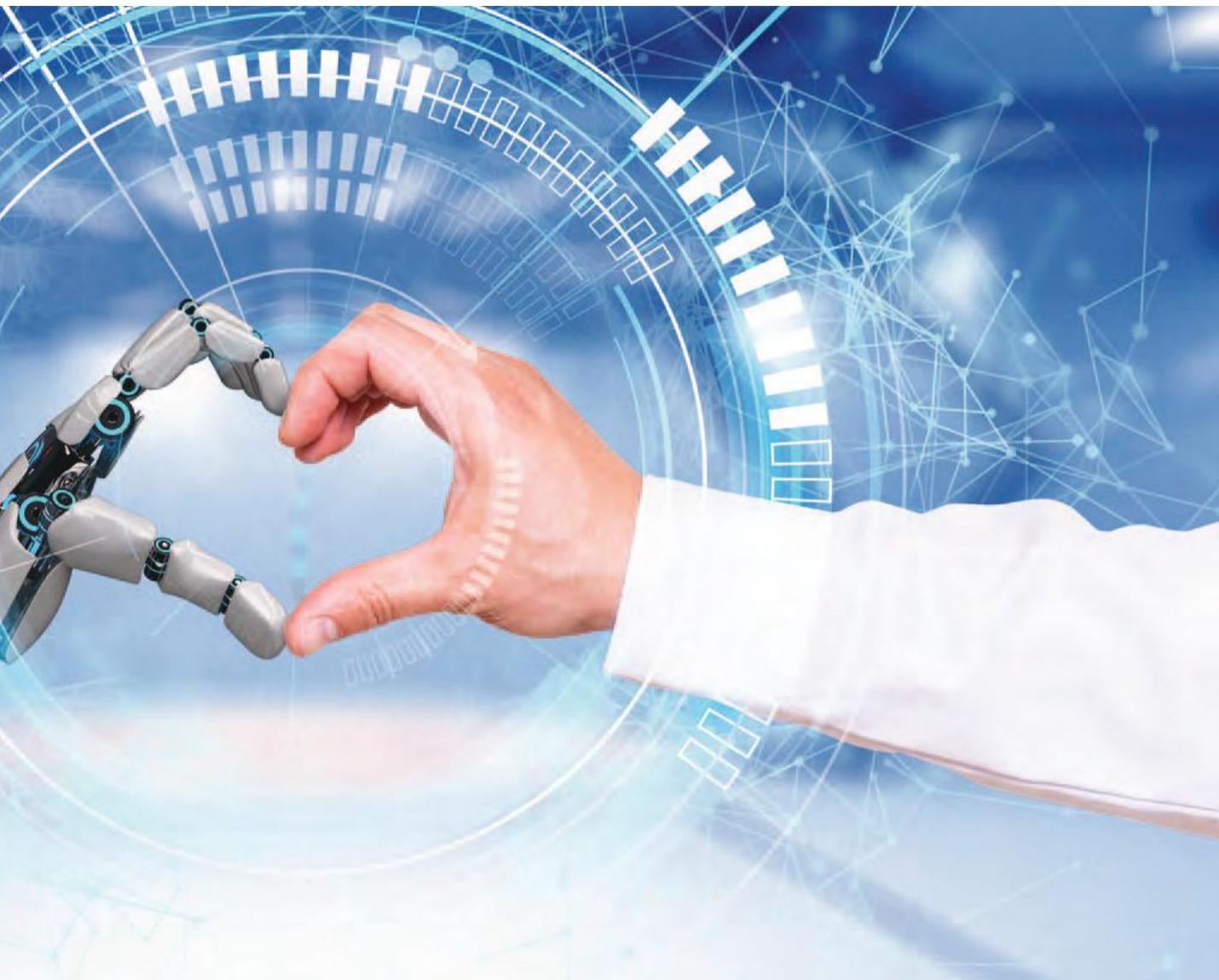
NEL PRIMO QUARTO di questo secolo, la tecnologia robotica, applicata alla chirurgia, ha raggiunto risultati straordinari. Con l'integrazione dell'IA nella robotica, in particolare attraverso tecnologie come la Visione Artificiale (VA) e la Realtà Aumentata (RA), si sta aprendo un nuovo capitolo in questo settore della chirurgia. Grazie all'IA, i sistemi robotici stanno acquisendo capacità di creatività e adattabilità paragonabili a quelle umane, migliorando in modo significativo l'efficacia e la precisione degli interventi chirurgici. Questo progresso rappresenta l'inizio di un processo promettente che vede l'IA come fattore chiave per il futuro della chirurgia robotica.

Al momento non esistono sistemi in grado di eseguire interventi chirurgici in modo completamente autonomo con la sola supervisione umana. Le aspettative avanzate nel 2018 del *Future of Surgery Report* – un documento redatto dalla Commissione del Royal College of Surgeons in Inghilterra – prevedevano che i robot del 2024 sarebbero stati in grado di eseguire "un piccolo numero di compiti semplici e automatizzati, come la sutura o biopsie semplici, superficiali: tali previsioni si sono rilevate troppo ottimistiche". A tutt'oggi non sono stati raggiunti questi livelli di autonomia. Comunque i progressi continuano, specialmente sui modelli animali. Recentemente, un robot ha eseguito la prima anastomosi laparoscopica su intestino di un maiale senza aiuto umano. *Ginecoogoi* (no.2, 2022, p.28) ha riportato un'ampia sintesi di questo intervento. Axel Krieger del Johns Hopkins University di Baltimora e autore senior dell'articolo ha sottolineato che "questi risultati preliminari dimostrano che è possibile automatizzare uno dei compiti più intricati e delicati in chirurgia: la riconnessione di due estremità di un

intestino". Questi sviluppi della robotica chirurgica dimostrano il potenziale delle tecnologie avanzate nel migliorare le pratiche chirurgiche. Il vero progresso però risiede nell'attuale processo d'integrazione graduale dell'IA con la robotica. Questa combinazione ha aperto nuove possibilità per aumentare l'automazione e la precisione in sala operatoria. Tuttavia, è importante precisare che robotica e intelligenza artificiale (IA) sono due aree della tecnologia avanzata che, pur avendo la possibilità di essere interconnesse, hanno scopi, metodi e applicazioni distinti. Nel contesto della chirurgia, la robotica si occupa della creazione di sistemi che assistono i chirurghi negli interventi, migliorando la precisione e riducendo l'invasività. L'IA, invece, si focalizza sullo sviluppo di algoritmi che permettono a questi sistemi di prendere decisioni e risolvere problemi in modo autonomo, contribuendo a un ulteriore avanzamento delle capacità chirurgiche.

ROBOT CHIRURGICI

IL REPORT A ROBOTIC SURGERY REVIEW dell'azienda Alira Health, esperta nel settore, prevede che il mercato della chirurgia assistita dalla robotica, valutato 7 miliardi di dollari, sia destinato a crescere fino a 30 miliardi entro il 2030. Attualmente, sono in fase di avanzata sperimentazione oltre 150 sistemi robotici per diverse applicazioni cliniche. Gli Stati Uniti dominano il mercato con oltre 580.000 procedure eseguite nel 2020 (ultimi dati disponibili). Questi cifre dimostrano chiaramente l'enorme investimento globale che si è avuto in questa tecnologia, che evidenzia quanto si stia puntando su un futuro dominato dalla chirurgia robotica. Il sistema chirurgico *Da Vinci*, sviluppato da In-



tuitive Surgical, è presente sul mercato dal 2000 ed è il più usato nella chirurgia ginecologica. Questo robot chirurgico è particolarmente apprezzato per la sua precisione e versatilità. I bracci robotici sono dotati di articolazioni multiple che permettono una gamma di movimenti molto più ampia rispetto alla mano umana, consentendo ai chirurghi di operare con una precisione straordinaria anche in spazi ristretti come quelli pelvici. Inoltre, la visione tridimensionale ad alta definizione offre un'accurata visualizzazione del campo operatorio. Il Da Vinci è utilizzato in ginecologia oltre che nei casi di cancro anche per trattare condizioni complesse di endometriosi profonda e per interventi uroginecologici. Recentemente, nel gennaio scorso, è diventato commerciabile in Europa il *Da Vinci SP* (Single Port) che rappresenta l'ultima generazione di robot chirurgici, progettato per eseguire interventi complessi attraverso un'unica piccola incisione. Questo sistema è dotato di bracci flessibili e strumenti miniaturizzati che consentono una precisione chirurgica senza precedenti, riducendo al minimo il trauma per il paziente. Può essere utilizzato per una vasta gamma di procedure ginecologiche tra cui l'endometriosi profonda, interventi uroginecologici oltre che le normali isterectomie.

Altro robot utilizzato in ginecologia è *Hugo*, sviluppato da Medtronic. Dotato di bracci robotici indipendenti, Hugo migliora significativamente la precisione e il controllo durante le operazioni. Si tratta, inoltre, di un sistema robotico modulare che offre flessibilità e integrazione con altre tecnologie ospedaliere, rendendolo particolarmente utile in interventi urologici e ginecologici.

INTERVISTA A ENRICO VIZZA

Il futuro della chirurgia robotica? **Rendere semplice la complessità**

Prof. Vizza, la sua esperienza in chirurgia robotica risale a più di 10 anni fa, dopo una lunga pratica in chirurgia mininvasiva laparoscopica. Quanto quest'ultima pratica l'ha aiutata nella chirurgia robotica?

La mia attività chirurgica in verità è iniziata nel 2010 e ho effettuato da allora 1.250 procedure come primo operatore utilizzando la piattaforma robotica DaVinci Si prima e Xi poi. Durante questo periodo la chirurgia robotica non ha sostituito nella mia attività completamente, ossia la chirurgia laparoscopica e la chirurgia addominale, bensì nella mia esperienza professionale la chirurgia robotica ha rappresentato uno strumento con indicazioni particolari laddove la complessità della patologia rendeva l'utilizzo della chirurgia minimamente invasiva difficile.

Ora utilizza il nuovo Da Vinci SP. Quali sono stati i principali cambiamenti che ha osservato nel passaggio al nuovo sistema?

La nuova piattaforma robotica da Vinci SP permette di effettuare interventi ad alta complessità utilizzando un unico accesso attraverso la parete addominale di 2,5-3 cm. Attraverso questa piccola incisione entrano 3 strumenti ed una ottica flessibile rendendo possibile raggiungere qualsiasi parte della cavità addominale ed effettuare in pre-

cisione dissezioni chirurgiche su strutture delicate. Inoltre una futura applicazione del Da Vinci SP sarà la chirurgia robotica attraverso gli orifici naturali e quindi per noi i ginecologi l'effettuazione di interventi robotici attraverso il canale vaginale.

Può spiegare ai giovani ginecologi, che ora si affacciano alla specializzazione, quali sono i principali vantaggi della chirurgia robotica per i pazienti con cancro ginecologico?

Precisione nei movimenti, assenza di un affaticamento del chirurgo per interventi complessi, ma soprattutto la possibilità di poter utilizzare nel prossimo futuro tutte le risorse della IA. Il grande vantaggio che si aprirà per i giovani medici in formazione sarà quello dei simulatori chirurgici su piattaforma robotica che permetteranno un addestramento rapido e puntuale così come avviene attualmente per i piloti di Jet.

Quali sono le competenze principali che ritiene fondamentali per i ginecologi che desiderano specializzarsi in chirurgia robotica?

Il primo consiglio è quello di approfondire le proprie conoscenze tecniche e tecnologiche delle macchine che andranno ad utilizzare e capire come funzionano. Il secondo consiglio è quello di formarsi, nello stesso tempo, nelle tecniche di chirurgia convenzionale sia vaginale che addominale, in quanto solo dalla integrazione delle diverse tecniche il chirurgo potrà utilizzare al massimo le potenzialità della piattaforme robotiche. Insomma cultura e addestramento.

Come vede il futuro della chirurgia robotica nei prossimi 10 anni, in particolare nella chirurgia oncologica ginecologica?

La chirurgia robotica renderà semplice la complessità, renderà gli interventi complessi più facilmente riproducibili, e ridurrà quindi i percorsi di apprendimento (learning curve) più rapidi. Inoltre, grazie alla IA il chirurgo potrà effettuare procedure di estrema precisione al di là delle capacità umane.

Qual è il feedback più comune che riceve dai pazienti dopo un intervento di chirurgia robotica?

Molto è cambiato dall'inizio dell'era della chirurgia robotica. All'inizio i primi pazienti erano disorientati dall'idea che una macchina potesse operare sostituendo il chirurgo e chiedevano sempre se fossi stato io ad effettuare l'intervento: della macchina non si fidavano mentre si sentivano tranquilli dell'uomo-chirurgo su cui riponevano la loro fiducia. Questa diffidenza dei primi anni è completamente scomparsa ed attualmente i pazienti quando giungono alla mia osservazione sono già ben informati su cosa significa la chirurgia robotica e sul ruolo centrale del fattore umano, cioè del chirurgo, e sempre più spesso sono gli stessi pazienti a chiedere di essere operati attraverso la piattaforma robotica. **E.M.**

INTERVISTA

ROBOT E INTELLIGENZA ARTIFICIALE

L'IA IN CHIRURGIA

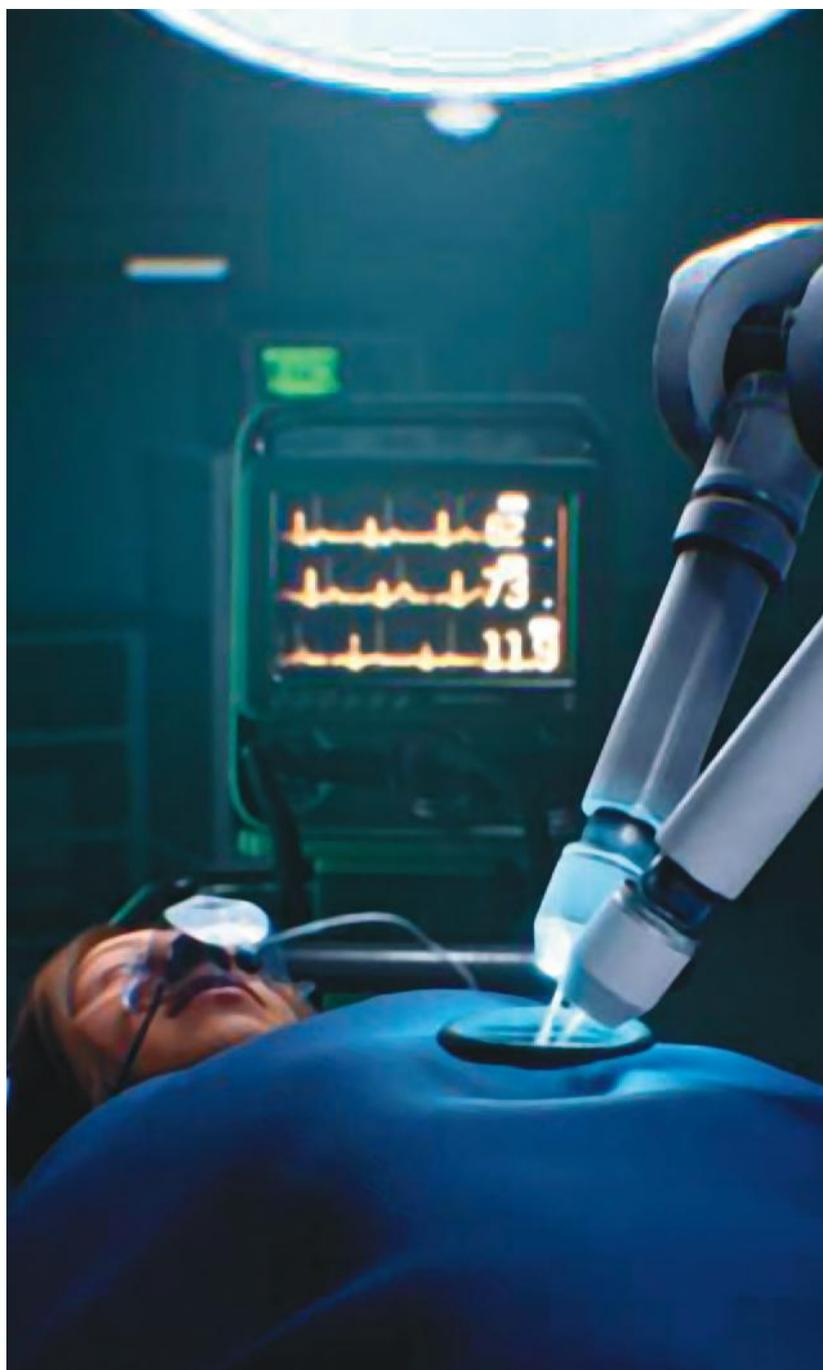
“I FUTURI CHIRURGI probabilmente si meraviglieranno che fino a pochi anni fa si è operato in condizioni di sostanziale cecità”, scrive Andrew Gumbs, accademico di Francia e direttore di Artificial Intelligence Surgery. “Questo è facilmente comprensibile per i chirurghi più anziani che ricordano i tempi in cui si accedeva alla pelvi alla cieca”. Si preparava, ad esempio, il parametrio sotto la guida delle dita più che della vista e la dissezione ureterale richiedeva grande attenzione e abilità da parte del chirurgo per garantire la sicurezza e l'efficacia dell'intervento. Oggi i sistemi robotici integrati con IA, vale a dire di visione artificiale e realtà aumentata stanno facilitando notevolmente queste procedure.

LA VISIONE ARTIFICIALE (VA) rappresenta una delle innovazioni più significative nella chirurgia robotica perché offre una visione dettagliata e in tempo reale delle strutture anatomiche. Grazie alle tecniche deep learning, gli algoritmi di VA possono revisionare milioni di video chirurgici, creando in questo modo ampi set di dati. Ahmad Guni, chirurgo dell'Imperial College di Londra, precisa che “l'applicazione della VA in questo campo non ha avuto lo stesso successo dell'imaging e della patologia, perché i video chirurgici sono più dinamici con oggetti in costante movimento e contengono piani chirurgici vari e oscurati”. Inoltre, si deve tener presente che realizzare un set di video chirurgici per l'addestramento è un lavoro impegnativo per gli esperti e non sempre esiste un consenso chiaro su come vengono eseguiti alcuni passaggi chirurgici.

Finora gli studi si sono concentrati principalmente nel tentativo di precisare l'anatomia delle procedure chirurgiche più comuni. Nel cancro ginecologico gli interventi che hanno ricevuto maggiore attenzione sono quelle con una “visione critica della sicurezza”. Ciò significa che la VA permette ai chirurghi di vedere le strutture anatomiche con maggiore precisione e di conseguenza migliora la sicurezza dell'operatore. Questo è particolarmente importante nei casi di cancro ginecologico, dove le strutture anatomiche pelviche profonde possono essere di difficile identificazione per la presenza di cancro. Per esempio, interventi su spazi parametriali o strutture delicate come gli ureteri e i vasi sanguigni richiedono un'estrema accuratezza per ridurre il rischio di lesioni accidentali.

La **REALTÀ AUMENTATA (RA)** sta migliorando significativamente la precisione e la sicurezza degli interventi. Dopo oltre un decennio di sviluppo e perfezionamento, dispositivi commerciali dotati di RA, come il Da Vinci, sono finalmente diventati disponibili sul mercato.

“La RA è una tecnologia che permette di visualizzare immagini mediche, come TAC o RM, di-



“La RA è una tecnologia che permette di visualizzare immagini mediche, come TAC o RM, direttamente sul campo visivo del chirurgo”

rettamente sul campo visivo del chirurgo”, spiega Daniel Hashimoto del Massachusetts General Hospital di Boston. “In pratica, il chirurgo indossa un visore o utilizza schermi speciali che combinano l'immagine reale del campo operatorio con dati digitali aggiuntivi generati da computer”. Questi dati possono includere mappe tridimensionali delle strutture anatomiche, indicatori di posizionamento degli strumenti chirurgici, percorsi operativi suggeriti, e altre informazioni importanti.

La RA utilizza un software specifico per integrare e sincronizzare questi dati digitali con le immagini intraoperatorie fornite dalla telecamera robotica. Questo permette di sovrapporre virtualmente l'organo da operare alla parte reale, consentendo al chirurgo di visualizzare l'intero tumore in tempo reale e in tre dimensioni. Ciò migliora la coordinazione tra occhio e mano del chirurgo, eliminando la necessità di guardare un monitor esterno per le immagini digitali.

Ad esempio, durante l'intervento la RA può evidenziare in tempo reale i vasi sanguigni, i nervi il decorso dell'uretere e altri elementi critici, guidando i chirurghi con precisione millimetrica in modo da evitare lesioni accidentali a nervi, vasi sanguigni o altre strutture delicate.

Solo recentemente la RA ha iniziato ad essere applicata nella chirurgia oncologica ginecologica. In procedure, come le isterectomie radicali, la RA aiuta molto l'operatore a visualizzare meglio i confini del tumore e le strutture circostanti, migliorando l'accuratezza della rimozione del tumore e riducendo il rischio di danneggiare i tessuti sani.



Il futuro della chirurgia robotica e dell'intelligenza artificiale (IA) promette sviluppi rivoluzionari. Le tendenze attuali indicano una crescente integrazione tra sistemi robotici e algoritmi di IA avanzati, che potrebbero portare a interventi chirurgici completamente automatizzati e personalizzati

I primi dati sulla chirurgia dell'ovaio confermano questi vantaggi. Scrive Brian Park dell'Università della Pennsylvania: “la RA aiuta molto gli operatori a identificare e rimuovere completamente le masse tumorali ovariche presenti in addome, navigando attraverso le complesse strutture pelviche con maggiore sicurezza e precisione, riducendo in questo modo il rischio di complicazioni”.

LA SEGMENTAZIONE DELLE IMMAGINI è un altro aspetto meno noto, ma fondamentale dell'innovazione tecnologica legata alla chirurgia robotica. Il concetto è il seguente: le immagini mediche vengono suddivise in parti importanti, ad esempio in singoli organi o tessuti, per facilitare l'analisi e la pianificazione preoperatoria.

La segmentazione è parte integrante della robotica e riveste un ruolo sempre più importante. Grazie all'uso di algoritmi avanzati e IA, le immagini diagnostiche, come TAC o RM, possono essere elaborate per creare modelli tridimensionali estremamente dettagliati delle aree operative. Questi modelli permettono ai chirurghi di visualizzare con precisione le strutture anatomiche, pianificare accuratamente ogni fase dell'intervento e minimizzare i rischi associati a errori umani. Durante l'operazione, ad esempio, la segmentazione può essere utilizzata per distinguere nettamente tra tessuti maligni e sani quando si rimuovono i tumori. Il risultato è che l'intervento risulta il meno invasivo possibile e che vengano preservate le funzioni vitali.

Hao Ding del Dipartimento d'Informatica del Johns Hopkins Hospital di Baltimora, precisa che “durante l'intervento la segmentazione dell'immagine aggiorna continuamente la mappa visiva, adattando i movimenti degli strumenti in base ai cambiamenti anatomici del paziente”. Questo livello di precisione è particolarmente importante in procedure complesse e delicate, come quelle che spesso s'incontrano in casi di cancro ovarico avanzato o di neoplasia uterina progredita nel distretto pelvico. Alcuni sistemi robotici avanzati, come il Da Vinci, stanno integrando funzionalità di navigazione intraoperatoria. Questo permette di guidare i bracci robotici con una precisione ancora maggiore, migliorando l'efficacia e la sicurezza degli interventi chirurgici.

LA CHIRURGIA ASSISTITA DA COMPUTER (CAS) E LA NAVIGAZIONE CHIRURGICA sono due tecnologie all'avanguardia che stanno rivoluzionando il modo in cui vengono eseguite le operazioni chirurgiche con tecnologia robotica, migliorando la precisione, la sicurezza e l'efficacia degli interventi.

La CAS è soprattutto utilizzata in fase preoperatoria per una pianificazione meticolosa dell'intervento. JG Gerbers dell'Università di Gronigen descrive questo processo, abbastanza complesso, in modo preciso: “i chirurghi utilizzano software sofisticati per analizzare le immagini diagnostiche ottenute da TC, RM ed ecografie. Queste immagini vengono poi trasformate in modelli 3D del-



ROBOT E INTELLIGENZA ARTIFICIALE

le strutture anatomiche del paziente, permettendo una pianificazione dettagliata dell'operazione". Si può dire in definitiva che la CAS è essenzialmente uno strumento preparatorio che aiuta a mappare la chirurgia prima che avvenga, garantendo un alto livello di precisione e preparazione.

La Navigazione Chirurgica è utilizzata durante la chirurgia vera e propria. Fornisce una guida in tempo reale sovrapponendo immagini digitali alle strutture anatomiche reali del paziente tramite realtà aumentata o realtà virtuale. Questa tecnologia aiuta i chirurghi a navigare nel campo operativo con maggiore accuratezza, riducendo il rischio di danneggiare strutture critiche come nervi e vasi sanguigni: "è come avere un sistema GPS per la sala operatoria, che guida il chirurgo passo dopo passo durante l'intervento".

Grazie alla navigazione chirurgica, è possibile ridurre significativamente i rischi di errori, migliorare i risultati chirurgici e ridurre il tempo di recupero per i pazienti. L'integrazione con la chirurgia robotica rappresenta un ulteriore passo avanti, combinando la precisione robotica con la guida visiva avanzata. Alcuni sistemi robotici avanzati, come il Da Vinci, integrano già la funzionalità di navigazione intraoperatoria. Questo permette di guidare i bracci robotici con una precisione ancora maggiore, migliorando l'efficacia e la sicurezza degli interventi chirurgici.

Attualmente la navigazione intraoperatoria è già utilizzata in alcune procedure chirurgiche pelviche complesse, come la chirurgia oncologica e la riparazione di prolapsi. Ad esempio, l'uso di marcatori e sistemi di tracciamento può aiutare i chirurghi a evitare strutture critiche e a rimuovere completamente i tumori.

Recentemente Iori Kisu ginecologo nell'Ospedale Tachikawa di Tokyo, ha messo a punto l'uso di imaging fluorescente a infrarossi per visualizzare in tempo reale gli ureteri durante la chirurgia ginecologica. Questo metodo, che include l'uso di cateteri fluorescenti, permette ai chirurghi di identificare chiaramente gli ureteri e prevenire lesioni durante interventi complessi come l'istectomia per il cancro avanzato.



La Navigazione Chirurgica è utilizzata durante la chirurgia vera e propria. Fornisce una guida in tempo reale sovrapponendo immagini digitali alle strutture anatomiche reali del paziente tramite realtà aumentata o realtà virtuale

CONCLUSIONE

NEGLI ULTIMI 25 ANNI i progressi nel campo della robotica chirurgica hanno sorpreso anche i più esperti di noi. Un quarto di secolo fa, l'idea che la robotica potesse permettere ai chirurghi di eseguire procedure complesse con estrema precisione sembrava fantascienza. Oggi questi avanzamenti sono diventati realtà e stanno rivoluzionando il modo in cui vengono eseguite le operazioni chirurgiche.

Nonostante questi progressi, ci sono ancora delle sfide da affrontare per ottimizzare ulteriormente l'efficacia e l'accessibilità di queste tecnologie. Uno dei principali ostacoli è il costo elevato dei sistemi di chirurgia robotica. L'acquisto, la manutenzione, l'aggiornamento delle apparecchiature e lo smaltimento dei materiali utilizzati durante l'intervento richiedono investimenti considerevoli, limitandone l'uso nelle zone meno abbienti del Paese. Tutto questo crea il rischio che la robotica chirurgica diventi una prerogativa dei più ricchi.

Gli elevati costi della chirurgia robotica hanno portato gli ospedali a sviluppare progetti multispecialistici. Questo modello di organizzazione consente di utilizzare la chirurgia robotica anche in specialità come la ginecologia, che di solito ricevono minori rimborsi rispetto alle altre discipline come la chirurgia toracica e l'urologia. Combinando i rimborsi di diverse specialità, i dipartimenti riescono a mantenere un equilibrio economico sostenibile, permettendo così l'accesso alla tecnologia robotica anche per le specialità meno finanziate.

Tuttavia oltre alle questioni economiche, emergono anche sfide tecniche. Una delle maggiori problematiche attuali nella chirurgia robotica riguarda la precisione dei dati di imaging e l'etichettatura durante le procedure chirurgiche. Errori o imprecisioni dei dati di imaging e la mancanza di univocità nei protocolli d'intervento possono compromettere l'efficacia e la sicurezza delle operazioni robotiche. Secondo uno studio del 2023, circa il 20% delle immagini di training presentano etichettature errate, influenzando nega-

tivamente le performance dei sistemi di IA. Inoltre, per garantire un apprendimento efficace e accurato, è fondamentale che la qualità delle immagini e dei video utilizzati per l'addestramento dei sistemi robotici sia elevata. A questo si deve aggiungere che

la disponibilità di data-set sufficientemente ampi e diversificati costituisce un altro importante problema, in quanto limita la capacità dei modelli di IA di generalizzare correttamente. Ad esempio, solo il 30% dei centri chirurgici dispone di data-set che coprono una vasta gamma di casi clinici, secondo un'indagine del 2022. La mancanza di standardizzazione nei protocolli di raccolta dei dati e le variabilità tra i diversi centri chirurgici contribuiscono ulteriormente a questo problema. Questi fattori, uniti alla necessità di continui aggiornamenti tecnologici e alla formazione specifica del personale medico, rendono complesso l'inserimento ottimale della robotica avanzata nella chirurgia ginecologica oncologica.

Il futuro della chirurgia robotica e dell'intelligenza artificiale (IA) promette sviluppi rivoluzionari. Le tendenze attuali indicano una crescente integrazione tra sistemi robotici e algoritmi di IA avanzati, che potrebbero portare a interventi chirurgici completamente automatizzati e personalizzati. La combinazione di machine learning e big data permetterà ai robot chirurgici di analizzare enormi quantità di informazioni in tempo reale, ottimizzando le decisioni intraoperatorie e migliorando ulteriormente la precisione.

Con il costante miglioramento dell'interfaccia uomo-macchina, è probabile che i robot chirurgici diventino strumenti indispensabili in ogni sala operatoria. Questa evoluzione ridurrà al minimo gli errori umani e aprirà nuove frontiere nella medicina personalizzata, migliorando significativamente i risultati a favore dei pazienti.