



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

“EVOLUZIONE DELLA CHIRURGIA ROBOTICA: OPPORTUNITÀ E SVILUPPI FUTURI”

Relatore: Prof. GAUDENZIO MENEGHESSO

Laureanda: MARTINA VENTURA

ANNO ACCADEMICO 2023 – 2024

Data di laurea 26-09-2024

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: Evoluzione della chirurgia robotica	3
1.1 Definizione	3
1.2 Storia.....	3
1.3 Prime piattaforme robotiche	5
CAPITOLO 2: Sistemi robotici.....	8
2.1 Tipologie di sistemi robotici.....	8
2.2 Componenti principali	10
2.3 Sistema robotico più diffuso: il sistema da Vinci.....	12
2.3.1 Precursori del sistema da Vinci.....	12
2.3.2 Evoluzione del sistema da Vinci	13
2.3.3 Ultima versione del sistema da Vinci: da Vinci 5	17
CAPITOLO 3: Vantaggi e applicazioni della chirurgia robotica	19
3.1 Vantaggi della chirurgia robotica	19
3.1.1 Vantaggi per il paziente.....	19
3.1.2 Costo-efficacia.....	20
3.1.3 Vantaggi per il chirurgo	21
3.2 Principali applicazioni	21
3.2.1 Testa e collo.....	22
3.2.2 Torace.....	22
3.2.3 Addome	23
3.2.4 Arti.....	24
3.2.5 Altre applicazioni	25
CAPITOLO 4: Futuro della chirurgia robotica	26
4.1 Tecnologie avanzate	26
4.1.1 Intelligenza Artificiale	26
4.1.2 Chirurgia a distanza	28
4.2 Sistemi robotici.....	29
4.2.1 Miniaturizzazione dei sistemi robotici.....	29
4.2.2 Soft robotics	30
CONCLUSIONI	32
BIBLIOGRAFIA	34

INTRODUZIONE

La chirurgia (dal greco *cheir, cheiros*: mano e *ergon*: opera) è uno dei rami della medicina più antico, ma anche più dinamico, in costante evoluzione grazie al progresso tecnologico e scientifico. Il concetto di chirurgia, fin dall'antichità, nasce per il trattamento di malattie, lesioni traumatiche o malformazioni attraverso interventi manuali o operazioni strumentali, con l'obiettivo di salvare la vita del paziente e/o di migliorarne la qualità di vita. Inizialmente basata su incisioni di grandi dimensioni, che potessero esporre completamente al chirurgo il sito chirurgico, così da permettergli una visione migliore e diretta, ben presto la chirurgia aperta, oggi denominata tradizionale, è stata progressivamente sostituita quasi totalmente da interventi che vengono definiti minimamente invasivi.

La chirurgia minimamente invasiva (*Minimally Invasive Surgery, MIS*) nasce grazie all'evoluzione scientifica e tecnologica, come un nuovo approccio più sicuro alle operazioni chirurgiche. Essa si basa su piccole incisioni, attraverso le quali il chirurgo è in grado di operare grazie a strumenti di dimensioni ridotte, aiutato anche da una telecamera, endoscopio, per poter vedere in video il sito chirurgico. La chirurgia minimamente invasiva ha fin da subito riportato vantaggi al paziente, a partire da un miglioramento nel risultato estetico, ma anche una maggiore sicurezza generale durante l'intervento, in quanto, proprio grazie alle piccole incisioni, vi era una netta diminuzione delle perdite di sangue, come anche una minore esposizione a eventuali contaminazioni esterne; motivi per cui gli interventi riportavano un minore tasso di complicanze.

Negli ultimi decenni, la chirurgia, e in particolare la chirurgia minimamente invasiva, ha visto un'evoluzione radicale grazie all'introduzione di sistemi robotici durante le operazioni chirurgiche, grazie ai quali vi è stato un ampliamento delle capacità del chirurgo, come una migliore precisione e accuratezza nei movimenti durante gli interventi, che risultano in una sicurezza maggiore e in un migliore benessere generale del paziente.

La chirurgia robotica, o chirurgia assistita da robot, nasce in principio per la necessità di intervenire tempestivamente su feriti in luoghi difficili e poco accessibili, quali le zone di guerra, ma anche per il bisogno di avere un piano preventivo di intervento rapido nello spazio; solo successivamente si sono riscontrati i molteplici vantaggi che questo approccio avrebbe portato per qualsiasi tipo di intervento. L'utilizzo di sistemi robotici in chirurgia, infatti, comporta sia i vantaggi che erano già stati riscontrati nella chirurgia minimamente invasiva, sia ulteriori benefici, come il minor affaticamento per il chirurgo, oltre ad una visione migliorata del campo operatorio. Le piattaforme robotiche chirurgiche hanno subito, nel corso degli anni, diversi miglioramenti, con l'integrazione di tecnologie sempre più all'avanguardia,

portandole a diffondersi sempre di più in tutto il mondo, oltre a portare ad una standardizzazione di alcuni interventi che oggi vengono eseguiti solamente con l'ausilio di sistemi robotici.

Lo scopo di questa tesi è quello di esplorare le tappe storiche che hanno portato alla nascita della chirurgia robotica, andando anche ad analizzare le tipologie e la struttura dei sistemi robotici, in particolare del sistema da Vinci, per poi soffermarsi sui vantaggi e applicazioni principali della chirurgia robotica. Infine, vengono riportati i principali obiettivi futuri della chirurgia assistita da robot, in modo particolare soffermandosi sull'attuale applicazione di tecnologie all'avanguardia, che potrebbero portare ulteriori evoluzioni nella chirurgia robotica.

La tesi è articolata in quattro capitoli:

Il primo capitolo si concentra sugli eventi fondamentali che hanno portato alla nascita della chirurgia robotica, facendo anche riferimento ai primi prototipi robotici sviluppati.

Il secondo capitolo tratta l'architettura e la tipologia dei sistemi robotici, in particolare viene descritto il sistema da Vinci, dai primi prototipi, fino all'uscita dell'ultimo modello, il da Vinci 5.

Il terzo capitolo presenta i principali vantaggi e applicazioni dei sistemi robotici nelle varie discipline chirurgiche.

Infine, il quarto capitolo indaga i possibili sviluppi futuri della chirurgia robotica, a partire da applicazioni attuali, sia in ambito tecnologico, sia per quanto riguarda le tecniche di costruzione dei sistemi robotici.

CAPITOLO 1: Evoluzione della chirurgia robotica

1.1 Definizione

La chirurgia robotica rappresenta un'evoluzione della chirurgia minimamente invasiva che unisce medicina, robotica e ingegneria. Conosciuta anche come chirurgia assistita da robot, essa rappresenta una tecnica avanzata che utilizza piattaforme robotiche altamente specializzate durante le operazioni chirurgiche, con l'obiettivo di migliorare la precisione e la destrezza dei chirurghi in procedure complesse e spazi anatomici ridotti. Uno dei principali vantaggi della chirurgia robotica è la capacità dei sistemi robotici di filtrare i tremori fisiologici delle mani dei chirurghi, aumentando la flessibilità e riducendo gli errori dovuti a imprecisioni involontarie. Questo porta a una riduzione delle complicazioni chirurgiche come minor perdita di sangue e minori infezioni nel sito operatorio, ma anche miglioramenti per quanto riguarda il benessere del paziente come minor dolore post-operatorio, tempi di degenza ospedaliera minori, tempi di recupero più rapidi e migliori risultati estetici con cicatrici meno evidenti. Questi risultati si dimostrano di gran lunga migliori e superiori rispetto a quelli riportati con la tradizionale chirurgia 'a cielo aperto' e/o laparoscopia. I sistemi robotici, impiegati nelle operazioni chirurgiche, sono costituiti da bracci robotici, dotati di strumenti chirurgici, da una console chirurgica, che serve al chirurgo per manovrare gli strumenti e da un sistema di visione tridimensionale ad alta definizione, che permette di osservare un ingrandimento del campo operatorio. [1][2]

1.2 Storia

L'idea di creare delle macchine automatiche in grado di svolgere alcuni compiti solitamente svolti da mani umane è molto antica. Per quanto riguarda le applicazioni in chirurgia, il concetto iniziale risale a più di sessant'anni fa in campo militare. Durante i combattimenti militari, infatti, sono frequenti gli ambienti ostili in cui l'accesso al ferito risulta difficile, se non impossibile, portando alla mancanza di un'adeguata assistenza sanitaria. Inoltre, le principali cause di decesso durante i combattimenti sono shock emorragico e politrauma, che richiedono un intervento chirurgico immediato basato sulla chirurgia d'urgenza, una branca della chirurgia che si concentra sul controllo dell'emorragia e sulla minimizzazione della contaminazione. Era, quindi, evidente la necessità di dover cambiare la prospettiva dell'assistenza sanitaria, rendendola più tempestiva. L'idea era quella di voler passare dal

concetto tradizionale di “*Golden Hour*”, dove l’obiettivo primario era intervenire con chirurgia d’urgenza e trasportare il ferito, al concetto di “*Golden Minute*”, ovvero di trasportare la sala operatoria direttamente dal soldato, per aumentarne le possibilità di sopravvivenza.

Un altro importante scenario che ha contribuito allo sviluppo della robotica applicata alla medicina e del concetto di telepresenza è stata la corsa allo spazio degli anni ’60-’70. Come nelle zone di guerra, anche lo spazio è un ambiente difficile e sfavorevole per gli interventi chirurgici, pertanto, vi era la necessità di telemanipolazione degli strumenti a distanza, per poter essere preparati qualora vi fossero state delle emergenze.

La chirurgia robotica, quindi, nasce principalmente dal desiderio dell’uomo di ottenere due cose: la telepresenza e l’esecuzione di compiti precisi e ripetitivi. [3]

È proprio grazie agli studi dei ricercatori alla NASA (National Aeronautics and Space Administration) e al contributo di Scott Fisher, ideatore del primo dispositivo di visualizzazione di realtà virtuale tridimensionale *head-mounted display* (HMD), che i primi prototipi robotici per applicazioni chirurgiche iniziarono ad essere progettati. [4]

Un’altra figura importante che contribuì allo sviluppo di componenti robotiche per la chirurgia in telepresenza fu Philip S. Green, ingegnere biomedico presso la Stanford Research Institute (successivamente SRI International), che negli anni ’80 iniziò a fare esperimenti con l’obiettivo di riuscire ad eseguire un’operazione chirurgica meno invasiva della tradizionale chirurgia. Grazie anche ai suoi precedenti studi sugli ultrasuoni, oggi largamente usati come strumento di diagnostica medica, Green e il suo gruppo riuscirono a sviluppare il prototipo del primo robot chirurgico denominato Green Telepresence System. Il sistema consisteva in due unità distinte: la postazione di lavoro del chirurgo in telepresenza e l’unità chirurgica remota. Progettato per permettere al chirurgo di operare da seduto, esso possedeva un monitor che consentiva un campo visivo di 120 gradi, posizionato all’altezza della testa del chirurgo e puntato verso uno specchio, oltre ai manipolatori degli strumenti che erano collocati poco sotto quest’ultimo, in modo tale da dare l’illusione che i manici degli strumenti fossero collegati all’immagine delle punte degli strumenti che il chirurgo poteva vedere attraverso lo schermo. Inoltre, il sistema forniva una precisione alta e accurata, con conseguente diminuzione degli errori dati da tremori fisiologici, ma anche un sistema di scalatura dei movimenti. Sebbene il Green Telepresence System rappresentasse un sistema innovativo, primo nel suo genere, esso presentava delle limitazioni, tra cui i soli quattro gradi di libertà delle braccia robotiche che muovevano gli strumenti chirurgici, che risultavano non abbastanza da poter replicare alla perfezione i movimenti del polso di una mano umana,

dotata di sette gradi di libertà. Inoltre, il sistema video del monitor su cui veniva mostrato il campo operatorio risultava non ancora all'avanguardia, costringendo il chirurgo ad indossare degli occhiali a lenti polarizzate per poter vedere un'immagine tridimensionale. [5]

Il Green Telepresence System venne successivamente presentato all'Associazione dei Chirurghi Militari degli Stati Uniti (*Association of Military Surgeons of the United States, AMSUS*) con un intervento aperto di anastomosi intestinale. Grazie a questa presentazione, l'allora colonnello dell'esercito americano Richard Satava, che aveva collaborato con Philip S. Green, nel 1989 suggerì di orientare il sistema di telepresenza verso la chirurgia laparoscopica, un intervento minimamente invasivo. L'idea del colonnello Satava gli permise un invito nel 1992 all'*Advance Research Projects Agency* (ARPA, che nel 1993 diventò *Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA*), per poter sviluppare un sistema di telepresenza da applicare in campo militare. Il progetto del DARPA consisteva nel posizionare una postazione di lavoro della console chirurgica in un *Mobile Advanced Surgical Hospital (MASH)*, una stazione chirurgica avanzata, nella quale il chirurgo poteva operare ad una distanza dai 10 ai 35 chilometri. Le braccia robotiche dovevano essere montate su un veicolo armato mobile in grado di potersi spostare nel campo di battaglia, così da poter raggiungere velocemente il soldato ferito, offrendogli assistenza immediata, per poi riuscire a trasportarlo verso il *MASH*. Questo veicolo prese il nome di *Medical Forward Advanced Surgical Treatment (MEDFAST)*. Oltre alle componenti robotiche di telepresenza, il veicolo venne dotato di altre tecnologie non-chirurgiche quali l'anestesia, un dispositivo di monitoraggio da remoto e radiografia, in modo da eguagliare quasi totalmente le funzioni offerte da una reale sala operatoria.

Il DARPA, con questo primo prototipo di sistema chirurgico per la telepresenza, iniziò a eseguire esperimenti prima su dei manichini, passando poi a esperimenti su animali, per testare l'affidabilità di questo sistema. Nonostante i successi dei test riscontrati utilizzando questo sistema, come l'anastomosi intestinale su un intestino suino ex-vivo nel 1994, a causa di questioni politiche, il DARPA fu costretto a fermare il programma sul prototipo robotico inizialmente presentato da SRI, che venne poi acquistato da una nuova compagnia fondata nel 1995 in California, la *Intuitive Surgical Inc.* [6], che continuò a rivoluzionare questo sistema fino ad arrivare al rilascio del sistema robotico chirurgico più famoso, il sistema da Vinci.

1.3 Prime piattaforme robotiche

La prima piattaforma robotica impiegata per operare su un paziente umano fu la Programmable Universal Machine for Assembly 560 (PUMA 560), utilizzata nel 1985 per

e eseguire delle biopsie neurochirurgiche presso Westinghouse Electric in Pittsburgh, Pennsylvania. L'operazione consisteva nel guidare un braccio robotico, con l'aiuto della tomografia computerizzata, mentre inseriva un ago nel cervello per eseguire una biopsia, una procedura che era solitamente soggetta ad errori dovuti a tremori delle mani.

Successivamente nel 1988 l'Imperial College, a Londra, sviluppò il sistema robotico noto come PROBOT, idealizzato per l'assistenza negli interventi di prostatectomia transuretrale. Il sistema era caratterizzato da quattro assi di movimento, una lama rotante ad alta velocità per la resezione e una dimensione compatta.

Pochi anni dopo, nel 1992 fu sviluppato un sistema a guida d'immagine denominato ROBODOC Surgical System, che venne utilizzato per un intervento di protesi all'anca. Il sistema era costituito da un braccio robotico a cinque assi, con un dispositivo di fresatura collegato alla punta del braccio, che serviva per livellare la cavità ossea dove sarebbe stata poi inserita la protesi.

Negli anni successivi, si assistette a un notevole cambiamento nel panorama della robotica, caratterizzato dall'evoluzione e dall'adattamento del concetto di 'master-slave', che rappresentava il controllo remoto dei movimenti robotici da parte di una stazione di comando distante. Proprio in quegli anni, un'azienda chiamata Computed Motion, fondata dalla NASA, sviluppò un braccio robotico dotato di un endoscopio chiamato AESOP (*Automated Endoscopic System for Optimal Positioning*).



Figura 1.1: Automated Endoscopic System for Optimal Positioning (AESOP)

Il sistema AESOP era stato inizialmente progettato per migliorare la stabilità dell'immagine e ridurre il personale medico necessario in sala operatoria, mostrando grandi vantaggi rispetto

ad un'operazione chirurgica tradizionale in cui la telecamera veniva tenuta da un assistente chirurgo, il quale poteva affaticarsi durante procedure più lunghe.

Il primo modello AESOP 1000 risale al 1994, costituito da un braccio robotico controllato tramite pedali. Nella generazione successiva, AESOP 2000, vennero sostituiti i pedali con un controllo vocale, permettendo al chirurgo di avere diretto controllo sull'endoscopio, ma anche di eliminare la necessità di un assistente che tenesse l'endoscopio. Passando poi per AESOP 3000, in cui i gradi di libertà del braccio aumentarono, si arrivò al modello finale con AESOP HR (HERMES Ready), con controllo vocale integrato e funzioni come l'illuminazione della sala operatoria e il movimento del tavolo operatorio.

Il sistema AESOP rappresentava il primo sistema robotico che mettesse in pratica il concetto di telemanipolazione della videocamera durante un'operazione chirurgica, garantendo una migliore e più stabile visualizzazione. Lo step successivo era quello di voler ricreare, attraverso i sistemi robotici, i movimenti delle mani dei chirurghi.

Nel 1998, infatti, Computer Motion presentò il sistema ZEUS, con braccia e strumenti chirurgici controllati dal chirurgo: proprio con questo sistema fu per la prima volta introdotto il concetto di telepresenza in cui il chirurgo rappresentava il *master*, mentre il robot, lo *slave*.



Figura 1.2: robot chirurgico ZEUS

Il robot ZEUS era costituito essenzialmente da tre braccia robotiche, ognuna delle quali era attaccata al tavolo operatorio in modo indipendente: uno dei bracci robotici era un braccio AESOP, che controllava l'endoscopio, mentre gli altri due, con i loro quattro gradi di libertà, erano dotati di strumenti chirurgici. Questo sistema fu per la prima volta utilizzato alla Cleveland Clinic per un intervento di anastomosi delle tube di Falloppio. Solamente un anno

dopo il sistema ZEUS fu utilizzato per un innesto a cuore aperto dell'arteria coronaria in Canada.

Il 2001 fu l'anno in cui la chirurgia robotica fece il suo importante passo avanti grazie all'Operazione Lindberg: il chirurgo Jacques Marescaux, situato a New York, fu in grado di eseguire una colecistectomia su un paziente che si trovava a Strasburgo, grazie all'impiego del sistema robotico ZEUS e di una piattaforma di telecollaborazione denominato SOCRATES, che permise al chirurgo di controllare il robot a distanza grazie a una stazione di controllo remota. Questo si trattò del primo intervento chirurgico in cui venne utilizzata la chirurgia robotica di telepresenza e telemanipolazione.

Nel 1999, Intuitive Surgical Inc., introdusse il suo primo robot chirurgico da Vinci 'Standard'. Nonostante la grandezza delle braccia robotiche, che potevano portare ad una potenziale collisione tra i componenti del robot, il sistema da Vinci rappresentò fin da subito il sistema dominante per quanto riguardava gli interventi addominali laparoscopici assistiti da robot. Fin dall'uscita del primo modello del sistema da Vinci, erano molto chiari i vantaggi che questa piattaforma portava, soprattutto rispetto alla piattaforma ZEUS che, solo dopo pochi anni dell'uscita del da Vinci, non venne più prodotto. Il principale miglioramento che portava il da Vinci rispetto al sistema ZEUS era sicuramente il fatto che i bracci robotici non fossero direttamente attaccati al tavolo operatorio, ma vi era un carrello su cui erano state montate le braccia robotiche, che veniva posizionato a lato del letto operatorio. Questo portava notevoli vantaggi per quanto riguardava le tempistiche dell'operazione, in quanto risultava molto più veloce spostare e/o inclinare il letto del paziente con quest'ultimo sistema, al contrario di dover spostare singolarmente i bracci robotici del sistema ZEUS.

Fin dall'approvazione da parte dell'FDA (*Food and Drug Administration*) nel 2000, la piattaforma da Vinci di Intuitive Surgical Inc., ha rappresentato e rappresenta ancora oggi, il sistema robotico più diffuso e utilizzato al mondo. [3][4][6]

CAPITOLO 2: Sistemi robotici

2.1 Tipologie di sistemi robotici

I sistemi chirurgici robotici attualmente in uso si possono dividere in tre categorie principali:

- sistemi attivi
- sistemi semiattivi
- sistemi master-slave

I sistemi attivi si riferiscono a sistemi che operano in modo essenzialmente autonomo e svolgono compiti pre-programmati, nonostante siano gestiti dall'èquipe chirurgica. I primi sistemi robotici applicati alla chirurgia erano proprio sistemi attivi, come per esempio le piattaforme PROBOT E ROBODOC.

Per quanto riguarda i sistemi semiattivi, questi sono essenzialmente dei sistemi attivi che possono essere integrati da una componente direttamente guidata dal chirurgo.

I sistemi master-slave sono la principale tipologia di sistemi utilizzati anche oggi, che non posseggono funzioni pre-programmate o autonome, ma si basano solamente su manipolatori remoti che possono essere controllati da un chirurgo a distanza. Ne sono un esempio il sistema Da Vinci e il sistema ZEUS, primi prototipi dei sistemi master-slave. [7]

Oltre a queste tre categorie, i sistemi robotici possono essere classificati secondo il loro livello di autonomia durante gli interventi chirurgici. Secondo Yang et al. [8] ci sono sei diversi livelli di autonomia, più il livello aumenta, maggiore diventa l'autonomia del sistema robotico:

- Livello 0 (No autonomia): i sistemi robotici non sono autonomi, ma si muovono sotto completo controllo del chirurgo.
- Livello 1 (Assistenza robotica): i sistemi sono in grado di interagire con il chirurgo per aiutarlo e guidarlo durante l'operazione, come ad esempio il sistema di guida per immagini intraoperatorie o il *rendering* di realtà aumentata
- Livello 2 (Parziale autonomia ridotta): i sistemi sono in grado di compiere specifiche tasks chirurgiche basate su istruzioni date dal chirurgo, ma la maggior parte delle operazioni vengono fatte dal chirurgo
- Livello 3 (Autonomia condizionale): i sistemi sono dotati di capacità percettive per comprendere l'operazione chirurgica, pianificare ed eseguire alcune task specifiche, senza il controllo del chirurgo
- Livello 4 (Alta autonomia): i sistemi sono in grado di interpretare i dati preoperatori e intraoperatori, ideare un piano operativo composto da una sequenza di task ed eseguire il piano autonomamente, con una supervisione e controllo minimi da parte del chirurgo
- Livello 5 (Totale autonomia): i sistemi sono in grado di eseguire in modo completamente autonomo qualsiasi operazione

2.2 Componenti principali

I sistemi robotici sono costituiti da tre parti principali:

- console chirurgica
- carrello paziente
- carrello visione



Figura 2.1: console chirurgica sistema da Vinci Xi

La console chirurgica è la stazione di lavoro del chirurgo, che gli consente di operare e controllare il sistema robotico. Essa è tipicamente posizionata al di fuori dell'area sterile della sala operatoria. Il chirurgo è in grado di controllare completamente l'operazione, l'audio e le varie impostazioni in posizione seduta. Il design della console permette di essere regolata per favorire comfort e ridurre al minimo l'affaticamento del chirurgo durante l'operazione. Con la console, il chirurgo è in grado di utilizzare i controller principali e i pedali con mani e piedi, che consentono di manovrare gli strumenti e l'endoscopio. Il monitor della console offre una visione chiara dell'anatomia del paziente e degli strumenti operativi, oltre ad altre icone e funzioni dell'interfaccia utente. Grazie, poi, all'endoscopio 3D, il chirurgo può avere una visione tridimensionale del campo chirurgico.



Figura 2.2: carrello paziente sistema da Vinci Xi

Il carrello paziente comprende i bracci robotici e un sistema di posizionamento laser assistito. Il sistema robotico, con i vari strumenti, è in grado di replicare alla perfezione i movimenti del chirurgo in tempo reale, grazie anche ai sette gradi di libertà e due gradi di rotazione assiale che imitano alla perfezione i movimenti del polso umano. Il carrello paziente, essendo posizionato accanto al tavolo operatorio, permette al chirurgo di posizionarlo in qualsiasi posizione attorno al paziente, avendo quindi maggiore flessibilità nella disposizione chirurgica e un aumento dell'angolo di movimento degli strumenti chirurgici. La piattaforma è anche dotata di un sistema di comunicazione vocale per facilitare la comunicazione con l'intera équipe chirurgica.



Figura 2.3: carrello visione sistema da Vinci Xi

Il carrello visione contiene l'unità centrale di elaborazione e un sistema video ad alta definizione (Full HD). È composta principalmente dal modulo del sistema elettronico, dal modulo di controllo dell'endoscopio, dal modulo di elaborazione video e dal modulo del sistema di visione. Le immagini dell'endoscopio vengono catturate e poi ritrasmesse in alta definizione, con un campo visivo di 60°. Il sistema di visione permette di ingrandire le immagini fino a 6-10 volte. [2][9]

2.3 Sistema robotico più diffuso: il sistema da Vinci

2.3.1 Precursori del sistema da Vinci

La Intuitive Surgical Inc. prima di produrre il modello da Vinci, ha sviluppato vari prototipi, migliorando man mano le caratteristiche e le funzioni dei sistemi robotici.

Il primo prototipo di Intuitive fu Lenny, abbreviazione di Leonardo, che si basava sul prototipo rilasciato dalla SRI, aggiungendo però un polso all'asse di inserimento del manipolatore dello strumento chirurgico, creando altri due gradi di libertà. I bracci robotici erano tre ed erano fissati manualmente al tavolo chirurgico; un braccio reggeva l'endoscopio, mentre gli altri due tenevano la strumentazione chirurgica fissa. Il sistema di visualizzazione del Lenny utilizzava occhiali attivi sincronizzati con l'alternanza di fotogrammi del monitor video dell'occhio destro e sinistro, trasmessi dall'endoscopio. Il prototipo Lenny fu utilizzato nel 1996 per esperimenti su animali, ma subito si rivelò meccanicamente inaffidabile e soprattutto la visualizzazione non risultava di qualità sufficiente da permettere al chirurgo di operare in modo sicuro.

Dopo Lenny, la Intuitive presentò nel 1997 il prototipo Mona, dal nome della Gioconda di Leonardo da Vinci. Il prototipo Mona presentava caratteristiche innovative rispetto al precedente modello, a partire dalla strumentazione chirurgica che era stata riprogettata e resa intercambiabile, mantenendo comunque il campo chirurgico sterile. Il prototipo robotico Mona riuscì ad arrivare ad operare pazienti umani, riscontrando parecchi successi; nonostante questo, il prototipo presentava ancora diversi difetti, tra cui la fragilità dell'accoppiamento per lo scambio degli strumenti, che falliva il 20% delle volte, la poca precisione nella visualizzazione e il lungo ed ingombrante processo di impostazione del robot.

Tutte queste problematiche vennero prese in considerazione dalla Intuitive Surgical Inc. per progettare il sistema robotico che sarebbe diventato il più importante e diffuso in tutto il mondo: il sistema da Vinci. [10]

2.3.2 Evoluzione del sistema da Vinci

Dopo i prototipi Lenny e Mona, la Intuitive Surgical Inc. nel 1999 presentò il modello robotico da Vinci. La novità più evidente del sistema da Vinci, rispetto ai suoi predecessori, era la creazione di un carrello indipendente al quale vennero attaccate le componenti robotiche per tenere gli strumenti chirurgici, sostituendo la necessità di dover attaccare le braccia robotiche direttamente al tavolo operatorio e aumentando, allo stesso tempo, la flessibilità di posizionamento dei bracci sopraelevati. La creazione di un carrello indipendente eliminò inoltre i problemi legati alle limitazioni nel posizionamento del paziente e ai problemi di controbilanciamento quando il tavolo veniva inclinato. Il sistema da Vinci presentava anche un sistema di visione rinnovato: al posto di un singolo schermo video chiuso, in combinazione con gli occhiali polarizzati, il visore possedeva uscite video per ciascun occhio, che riducevano l'affaticamento e la nausea. La migliore visualizzazione era anche dovuta all'utilizzo di un endoscopio tridimensionale, che prevedeva l'uso di due cannocchiali da 5 mm all'interno di un telescopio da 12 mm, che permetteva la proiezione dell'immagine sui due schermi degli occhi. I problemi di scambio degli strumenti chirurgici, era stato risolto grazie all'applicazione di un design di accoppiamento Oldham, che si unisce tramite una serie di tre dischi bloccati insieme da linguetta e scanalatura.

Il primo modello da Vinci approvato dall'FDA, il da Vinci Standard, era composto da tre bracci: uno per tenere l'endoscopio e gli altri due per tenere gli strumenti chirurgici. Due anni dopo, nel 2002, la Intuitive Surgical Inc., ritenendo fosse necessario avere uno strumento chirurgico in più durante le operazioni, aggiunse al modello un quarto braccio robotico. L'aggiunta di un braccio in più non solo avrebbe migliorato l'esposizione delle strutture anatomiche, ma avrebbe anche ridotto la dipendenza da un assistente chirurgico. Questo nuovo modello, inoltre, aveva un dispositivo per scalare i movimenti da 1:1 a 5:1, permettendo di ottenere diverse sensibilità a preferenza del chirurgo. Un'altra novità riguardava l'aggiunta di un pedale al di sotto della console chirurgica, che consentiva al chirurgo di usare diversi livelli di energia, come monopolare e bipolare.

Non ancora completamente soddisfatta, la Intuitive Surgical Inc. nel 2006 introdusse la piattaforma da Vinci S; essa offriva una visione tridimensionale con telecamera ad alta definizione (HD), una configurazione semplificata, un display touch-screen interattivo e dei bracci robotici più lunghi, con anche strumenti per l'emostasi bipolare.

Solamente tre anni dopo, Intuitive Surgical Inc. rilasciò il modello da Vinci Si, una piattaforma che velocemente si diffuse in tutto il mondo. Il nuovo sistema offriva il concetto di chirurgia a doppia console, che ottimizzava le capacità del chirurgo a livello intra-

operatorio e che permise l'introduzione di una tecnologia di simulazione, che poteva servire come metodo di formazione per i chirurghi non esperti. In più, il sistema di visione, era stato potenziato grazie al software *Tile-Pro*, rendendo anche possibile l'incorporazione della tecnologia *Firefly*, che consentiva l'imaging a fluorescenza in tempo reale.

Nonostante la piattaforma Si fosse rivoluzionaria e presentasse diversi vantaggi, possedeva ancora delle limitazioni: i bracci robotici nel carrello paziente erano ingombranti, il che aumentava la possibilità di collisioni esterne, inoltre, sebbene la piattaforma Si fosse progettata per la chirurgia multi-quadrante, ogni volta che si utilizzavano quadranti diversi nella stessa procedura, il carrello paziente doveva essere spostato e riadattato al nuovo quadrante e i bracci robotici dovevano essere sganciati e riagganciati, il che richiedeva maggiore tempo per l'intervento, nonché maggiore anestesia per il paziente.



Figura 2.4: carrello paziente sistema da Vinci Si

Il successore del sistema Si fu la piattaforma da Vinci Xi, rilasciata nel 2014. Questo nuova piattaforma multi-porta riportava miglioramenti nel carrello paziente, donandogli maggiore flessibilità e mobilità, compensando le limitazioni del modello precedente. Il carrello paziente era stato riprogettato per avere un'architettura più compatta, diminuendo l'ingombro delle braccia robotiche e allo stesso tempo aumentando l'accesso al paziente, in qualsiasi quadrante. La piattaforma Xi era stata anche progettata per donare più comfort al chirurgo, riducendo l'affaticamento durante le procedure chirurgiche, oltre ad avere un nuovo sistema di scalatura e filtraggio dei movimenti, che rendeva più efficiente e sicuro il controllo degli strumenti chirurgici. Fondamentale risultava anche l'aggiunta della funzione di movimento

integrato del tavolo, che consentiva di posizionare dinamicamente il paziente, anche mentre l'intervento era in corso, il che diminuiva i tempi dell'operazione.

Un altro importante aggiornamento del nuovo sistema riguardava la strumentazione e la pinzatura. Gli accessori di prima entrata erano stati riprogettati in cannule in acciaio inossidabile, completamente riutilizzabili, la strumentazione con tecnologia *EndoWrist*, già presente nei precedenti modelli, era stata migliorata, consentendo l'aspirazione e l'irrigazione robotizzate, ma anche l'applicazione di clip. La pinzatura robotica era stata riprogettata con un nuovo controllo completo, un'articolazione completa e un feedback intelligente della profondità del tessuto, fornendo un monitoraggio costante. Una nuova tecnologia aggiunta al modello Xi era *Wristed Needle Driver*, che consentiva una maggiore destrezza al chirurgo durante le suture. [3][10]

Per quanto riguardava il sistema di visione, esso garantiva una visione tridimensionale ad alta definizione molto più stabile, immersiva e altamente ingrandita del campo chirurgico, fornendo allo stesso tempo la possibilità al chirurgo di controllare l'endoscopio da 8mm. Nonostante la piattaforma Xi fosse nata per interventi multi-porta, la Intuitive decise comunque di integrare nel sistema la tecnologia *Single-Site*, già presente nel modello Si, apportando dei miglioramenti per facilitare ancora di più l'ingresso a porta singola al paziente. [11]

Sempre in quegli anni la Intuitive decise anche di produrre un sistema molto simile al sistema Xi, ma più economico: il sistema X. La differenza principale tra i due modelli risiedeva nell'architettura del carrello paziente, in quanto la console chirurgica e il carrello visione rimanevano gli stessi del da Vinci Xi. [12]



Figura 2.5: carrello paziente sistema da Vinci X

A questo punto il sistema da Vinci della Intuitive Surgical Inc. aveva raggiunto già da tempo l'egemonia mondiale per quanto riguardava i sistemi robotici, ma non si fermò qui. Nel 2018, infatti, Intuitive Surgical Inc. introdusse il sistema da Vinci SP (*Single-Port*), una piattaforma robotica specifica per gli interventi *Single-Port*, interventi chirurgici a porta singola, ovvero che vengono eseguiti tramite ad un'unica piccola incisione attraverso cui vengono inseriti gli strumenti chirurgici e l'endoscopio. La differenza principale con gli altri sistemi precedentemente sviluppati, si trovava nella struttura del carrello paziente: il sistema da Vinci SP presentava solamente un braccio robotico, dal quale uscivano dei filamenti robotici che tenevano gli strumenti chirurgici e l'endoscopio. Nonostante la presenza di un solo braccio robotico, la piattaforma da Vinci SP, permetteva un accesso a 360° al paziente, in ogni quadrante, oltre ad eliminare completamente la possibilità di eventuali collisioni durante l'operazione chirurgica. [13]



Figura 2.6: carrello paziente sistema da Vinci SP

2.3.3 Ultima versione del sistema da Vinci: da Vinci 5



Figura 2.7: in ordine carrello visione, console chirurgica e carrello paziente del sistema da Vinci 5

L'ultima versione lanciata da Intuitive Surgical del sistema da Vinci è stata approvata dall'FDA a marzo 2024. Con le sue tecnologie di ultimissima generazione il sistema da Vinci 5 rappresenta il più avanzato robot chirurgico attualmente conosciuto. Mantenendo la struttura classica che prevede il carrello paziente, la console chirurgica e il carrello visione, i miglioramenti apportati nel modello 5 sono più di 150, tra cui:

- accuratezza e precisione migliorate: grazie a miglioramenti nel design e nella progettazione, tra cui nuovi controller chirurgici con sistemi di controllo delle

vibrazioni e dei tremori più potenti e sensibili, rendendo il sistema ancora più preciso e sicuro

- display tridimensionale e sistema di elaborazione delle immagini di nuova generazione: il nuovo da Vinci 5 è dotato del sistema di imaging tridimensionale più naturale e più ad alta definizione di sempre, che consente ai chirurghi di avere una visione ancora più realistica del campo operatorio, permettendo inoltre l'integrazione di eventuali future generazioni di endoscopi chirurgici e di software di visione sempre più avanzati
- tecnologia Force Feedback: una tecnologia di rilevamento della forza prima nel suo genere. Permette ai chirurghi, con diversi livelli di esperienza di applicare fino al 43% di forza in meno sui tessuti e di rilevare le forze di spinta e di trazione sulla punta dello strumento durante l'operazione, filtrando eventuali interferenze esterne. Questa tecnologia migliorata offre anche la possibilità di personalizzare il livello di sensibilità degli strumenti, in base alle preferenze del chirurgo e/o al tipo di intervento chirurgico
- miglioramenti della produttività e del flusso di lavoro: il nuovo modello da Vinci dispone di funzioni innovative progettate per poter aumentare l'autonomia del chirurgo durante l'operazione, come per esempio l'insufflazione e l'unità elettrochirurgica. Il sistema offre anche un'interfaccia utente ottimizzata, come per esempio impostazioni accessibili dal chirurgo direttamente dal menù *head-in* della console, così da mantenere la concentrazione sul campo chirurgico
- maggior potenza di calcolo e di funzionalità di dati avanzate: il sistema da Vinci 5 ha una potenza di calcolo oltre 10.000 volte superiore a quella del precedente modello, il da Vinci Xi. Questo consente il supporto di funzionalità innovative quali Case Insights, una tecnologia che memorizza i parametri post-operazione e misura i parametri di riferimento del chirurgo, consentendo un feedback oggettivo dell'operazione, SimNow, un software che permette una simulazione reale degli interventi, usato per la formazione di chirurghi non esperti, ma anche per migliorare le capacità dell'operatore e Intuitive Hub, che serve per memorizzare i video delle operazioni, oltre a permettere all'intera équipe chirurgica di rimanere aggiornati in tempo reale.
- maggiore comfort per il chirurgo: il sistema è dotato di una nuova console ridisegnata in grado di essere posizionata in modo personalizzabile, consentendo ai chirurghi di trovare la propria posizione più comoda, compresa la possibilità di stare in piedi.

Inoltre, il nuovo design permette di adattare la console a qualsiasi tipo di corporatura, compresi i chirurghi in gravidanza. [14]

CAPITOLO 3: Vantaggi e applicazioni della chirurgia robotica

3.1 Vantaggi della chirurgia robotica

La chirurgia assistita da robot rappresenta una delle innovazioni più significative nella medicina moderna, rivoluzionando l'approccio ai trattamenti chirurgici. Questa tecnologia avanzata offre migliori risultati clinici per i pazienti, una riduzione delle complicazioni intra-operatorie e post-operatorie e accelera i tempi di recupero. I benefici della chirurgia robotica, tuttavia, non si limitano solo ai pazienti. Anche gli ospedali stessi, grazie all'implementazione di sistemi robotici nelle operazioni chirurgiche, hanno riportato una gestione più efficiente dei costi, così come anche i chirurghi hanno riscontrato un'esperienza operativa più precisa e meno faticosa, con conseguente ambiente di lavoro più sicuro e sostenibile.

3.1.1 Vantaggi per il paziente

I sistemi robotici offrono una precisione senza pari nelle procedure chirurgiche grazie alla precisione stessa degli strumenti chirurgici e alla migliore visualizzazione fornita dalle tecnologie di imaging 3D ad alta definizione. I chirurghi, infatti, sono in grado di eseguire operazioni anche molto complesse, con una precisione millimetrica, grazie ai sistemi di filtraggio dei movimenti che, non solo elimina completamente i tremori fisiologici delle mani, ma anche permette una scalatura dei movimenti. La precisione e l'accuratezza comportano un'ottimizzazione del risultato chirurgico, riducendo al minimo i danni e i traumi ai tessuti circostanti la zona di interesse, che potrebbero provocare emorragie.

La capacità di controllare con precisione gli strumenti robotici comporta anche una riduzione delle perdite ematiche, quindi, minore necessità di trasfusioni di sangue e i rischi associati ad esse. Inoltre, riduce di molto il rischio di complicazioni intra-operatorie e post-operatorie, con una notevole diminuzione delle probabilità di un intervento di revisione.

Grazie all'assistenza dei robot chirurgici durante gli interventi, i chirurghi sono in grado di intervenire con operazioni minimamente invasive, facendo incisioni di gran lunga più piccole rispetto alla tradizionale chirurgia aperta. La minore estensione delle incisioni comporta diversi vantaggi, tra cui meno dolore, cicatrici ridotte e minor rischio di infezione post-

operazione grazie alla minore esposizione alle contaminazioni esterne. La riduzione dei tassi di infezione contribuisce a migliorare la sicurezza e la soddisfazione del paziente, oltre ad essere significativa per gli interventi chirurgici complessi, dove l'infezione può portare a complicazioni gravi, che potrebbero comportare la necessità di un secondo intervento. Una delle conseguenze più importanti delle incisioni ridotte è sicuramente il vantaggio estetico riportato nel paziente, il quale prova meno disagio post-operazione grazie alle piccole dimensioni delle cicatrici.

La precisione millimetrica, la dimensione ridotta delle incisioni e la riduzione della perdita di sangue contribuiscono insieme alla riduzione della degenza ospedaliera del paziente e quindi ad una dimissione più rapida, con conseguente miglioramento della qualità di vita complessiva del paziente. Inoltre, questi fattori contribuiscono alla riduzione dell'affaticamento post-operatorio, i pazienti, infatti, riferiscono di avere meno dolore e tensione fisica dopo questa tipologia di interventi, il che permette un loro ritorno più rapido al livello di energia e di mobilità abituale. In particolare, la diminuzione dell'affaticamento post-operatorio risulta alquanto significativa per i pazienti più anziani e/o fragili, perché consente loro un tempo di recupero minore, con meno stress fisico ed emotivo, mentre la riduzione generale del dolore post-operatorio si traduce in una minore necessità di dover assumere farmaci antidolorifici. [2]

3.1.2 Costo-efficacia

La chirurgia assistita da robot spesso comporta degenze ospedaliere più brevi rispetto alla chirurgia aperta tradizionale, riducendo i costi complessivi di ospedalizzazione. I pazienti che si sottopongono a interventi robotici minimamente invasivi riportano in genere meno dolore, minor rischio di infezione e tempi di recupero più rapidi. Questi fattori contribuiscono a diminuire di molto la degenza post-operatoria, comportando una riduzione dei costi associati ad essa e liberando risorse sanitarie. È inoltre stato dimostrato che la chirurgia robotica comporta tassi di complicanze più bassi rispetto alla chirurgia tradizionale, diminuendo di molto la necessità di interventi di *follow-up*, trattamenti ed eventuali riammissioni in ospedale, che comporterebbero maggiori costi sanitari.

I benefici a lungo termine della chirurgia robotica vanno oltre la riduzione immediata dei costi. Il miglioramento degli esiti del paziente e la riduzione delle complicanze post-operatorie possono portare a un continuo risparmio sui costi, evitando interventi sanitari costosi, come ricoveri prolungati, interventi chirurgici aggiuntivi e riabilitazioni estese. Questi

benefici a lungo termine contribuiscono al rapporto costo-efficacia complessivo dei programmi di chirurgia robotica. [2]

3.1.3 Vantaggi per il chirurgo

I benefici della chirurgia robotica non giovano solamente i pazienti, ma anche i chirurghi stessi. L'utilizzo di sistemi robotici durante gli interventi chirurgici consente ai chirurghi di migliorare le loro abilità chirurgiche e di eseguire procedure complesse con maggiore precisione e facilità, grazie anche alle interfacce intuitive degli strumenti robotici. Inoltre, la pratica continua e l'esperienza con la chirurgia robotica consentono ai chirurghi di fornire interventi minimamente invasivi di alta qualità in diverse specialità.

La maggiore precisione, con la conseguente riduzione degli errori durante gli interventi, è anche dovuta al fatto che, grazie all'assistenza dei sistemi robotici, viene completamente risolto l'effetto fulcro, presente durante le operazioni in laparoscopia, una tipologia di chirurgia minimamente invasiva, precursore della chirurgia robotica. L'effetto fulcro causa la percezione inversa del movimento dei manici rispetto alla punta degli strumenti laparoscopici; questo risulta in una percentuale maggiore di errori, anche dovuti alla mancata adeguatezza della percezione della profondità e dalla bassa definizione delle immagini bidimensionali negli interventi laparoscopici. [15]

La chirurgia robotica risulta vantaggiosa per i chirurghi anche perché riduce al minimo lo sforzo fisico dei chirurghi durante gli interventi. A differenza della chirurgia tradizionale, in cui i chirurghi spesso mantengono posizioni fisicamente impegnative anche per lunghi periodi, i chirurghi che operano assistiti da robot, operano da seduti. Questo riduce il rischio di lesioni muscolo-scheletriche e di affaticamento, oltre a diminuire il rischio di errori durante gli interventi. Tutti questi fattori contribuiscono insieme a migliorare il benessere a lungo termine dell'équipe chirurgica, oltre a permettere al chirurgo di eseguire procedure anche più complesse in modo comodo e preciso, migliorando la sua soddisfazione lavorativa e la sua longevità. [2]

3.2 Principali applicazioni

Grazie alla scoperta e al continuo sviluppo della chirurgia robotica, numerose specialità mediche hanno progressivamente implementato tecnologie robotiche all'avanguardia per eseguire interventi. Inizialmente utilizzata in ambiti specifici come la chirurgia urologica e

ginecologica, la chirurgia robotica ha rapidamente esteso il suo raggio d'azione, diventando oggi uno strumento indispensabile anche in altre discipline mediche. Attualmente, infatti, sono molte le operazioni chirurgiche che vengono eseguite con l'ausilio di robot chirurgici, che permettono risultati migliori rispetto alla tradizionale chirurgia aperta e/o alla laparoscopia.

3.2.1 Testa e collo

- Otorinolaringoiatria: il sistema da Vinci rappresenta, ad oggi, l'unico sistema robotico, approvato dall'FDA, per la chirurgia della testa e del collo. La tecnica di chirurgia robotica transorale (TORS) trova ampia applicazione nel campo dell'otorinolaringoiatria, tra cui la resezione robotica della lingua, la tonsillectomia robotica e la chirurgia del carcinoma orofaringeo a cellule squamose. Il vantaggio principale della TORS è la riduzione dei tempi operativi medi di quasi la metà, la riduzione delle perdite ematiche, con conseguente tempo di recupero minore. La chirurgia robotica trova applicazione anche nell'intervento di tiroidectomia e paratiroidectomia, determinando incisioni più piccole, minor numero di complicanze e migliore risultato estetico. [2]
- Neurochirurgia: con l'aumento della necessità di approcci minimamente invasivi al cervello e alla colonna vertebrale, la chirurgia robotica trova applicazione in neurochirurgia grazie alla localizzazione della lesione, alla pianificazione chirurgica per l'accesso alle aree più profonde del cervello e alla stabilità posturale della mano del chirurgo. I sistemi robotici chirurgici sono estremamente utili per le procedure stereotassiche, come l'inserimento di elettrodi DBS (*Deep Brain Stimulation*), la biopsia di tumori complessi in profondità, l'inserimento di elettrodi multipli per la stereoelettroencefalografia (SEEG) e il posizionamento di microcateteri per la chemioterapia mirata nei gliomi.

3.2.2 Torace

- Chirurgia cardiaca: le principali applicazioni di robot chirurgici in cardiocirurgia riguardano gli interventi di rivascolarizzazione coronarica, riparazione/sostituzione della valvola mitrale, ablazione della fibrillazione atriale, trattamento del difetto del setto atriale e impianto guidato di elettrocateri ventricolari sinistri. In particolare, il sistema da Vinci viene principalmente utilizzato nella rivascolarizzazione coronarica,

una procedura che può essere eseguita sia a cuore battente che in arresto, che include il bypass coronarico totalmente endoscopico (TECAB), in cui viene prelevato un innesto dall'arteria toracica interna sinistra, che viene poi innestato sull'arteria discendente anteriore sinistra. Per quanto riguarda l'intervento di riparazione/sostituzione della valvola mitrale assistito da robot, i chirurghi hanno riportato una miglior destrezza e precisione, con conseguente diminuzione di perdite ematiche e trauma toracico ridotto al minimo. I sistemi robotici applicati nell'ablazione della fibrillazione atriale permettono una creazione e una mappatura precisa delle lesioni, riducendo il rischio di complicazioni e la necessità di ripetere la procedura. [16]

3.2.3 Addome

- Chirurgia urologica: il primo campo di applicazione della chirurgia robotica è stato la chirurgia urologica, a causa della profondità della pelvi e delle piccole strutture anatomiche che rendono difficile l'accesso al chirurgo. Per questo motivo i robot chirurgici sono utili negli interventi di prostatectomia, nefrectomia, surrenalectomia e pieloplastica, che comportano incisioni più piccole e conseguente meno dolore, cicatrici ridotte e un più rapido ritorno alle normali attività. Anche interventi come la cistoprostatectomia totale robotica, hanno dimostrato una minore perdita di sangue, un periodo di cateterizzazione post-operatoria più breve, un più rapido ripristino della continenza urinaria e del ritorno dell'erezione. [2] Altri interventi urologici assistiti da robot sono l'inversione della vasectomia, la rimozione sub-inguinale di un varicocele e la rimozione del cordone spermatico. In generale nella chirurgia urologica, l'uso di robot aiuta i chirurghi ad avere maggiore precisione e destrezza, consentendo loro di risparmiare i nervi critici per la continenza urinaria e la funzione sessuale.
- Chirurgia generale: i robot chirurgici trovano applicazione in interventi come la colecistectomia e l'appendicectomia, dove offrono maggiore precisione e incisioni più piccole, riducendo il trauma tissutale e il dolore post-operatorio. Inoltre, gli strumenti robotici riducono il rischio di lesioni alle strutture circostanti, come i dotti biliari e i vasi sanguigni. Un'altra importante applicazione è la riparazione dell'ernia, diventata sempre più popolare grazie alla precisione e alle tecniche minimamente invasive. I sistemi robotici consentono ai chirurghi di eseguire un posizionamento preciso della rete per la riparazione dell'ernia, riducendo il rischio di recidiva.

- Chirurgia gastrointestinale: una principale applicazione della chirurgia robotica nella chirurgia gastrointestinale è la gastrectomia per il cancro gastrico. Un altro tipo di chirurgia gastrointestinale robotica è il bendaggio gastrico in silicone assistito da robot come trattamento dell'obesità, inoltre l'intervento di bypass gastrico robotico ha mostrato esiti migliori senza perdite post-operatorie o fallimenti anastomotici. In generale, i sistemi robotici attualmente utilizzati consentono la dissezione in cavità addominali congestionate con una minima perdita di sangue, con conseguenti migliori risultati clinici.
- Chirurgia ginecologica: è stato dimostrato che il sistema da Vinci applicato in interventi ginecologici come l'isterectomia e la miomectomia ha permesso una migliore visualizzazione del campo operatorio, una migliore manipolazione, una dissezione più facile e un recupero più rapido. In particolare, nella miomectomia robotica, i chirurghi sono in grado di colpire e rimuovere i fibromi preservando l'utero, il che lo rende un'opzione per le donne che desiderano mantenere la propria fertilità. I sistemi robotici vengono usati anche negli interventi di cistectomia ovarica e risultano particolarmente utili per preservare la funzione ovarica. [16]

3.2.4 Arti

- Chirurgia ortopedica: l'applicazione di sistemi robotici per interventi ortopedici si è evoluto nel corso degli anni. Le prime applicazioni riguardavano l'artroplastica totale dell'anca (PTA) e l'artroplastica totale del ginocchio (TKA), interventi tutt'ora eseguiti con sistemi robotici, che comportano ripristino preciso dell'articolazione d'anca, con conseguente recupero migliore, e posizionamento più preciso degli impianti nel ginocchio, per preservare con successo l'osso e i tessuti molli. La chirurgia robotica trova anche applicazione nella chirurgia spinale, in particolare perché i robot chirurgici sono in grado di creare mappe dettagliate della colonna vertebrale e guidano i chirurghi nel posizionamento di impianti e strumentazione. Inoltre, i sistemi robotici vengono utilizzati anche per identificare il punto di ingresso dell'inchiodamento intra-midollare e identificare, sezionare e riparare in sicurezza i nervi nelle lesioni del plesso brachiale. [16]

3.2.5 Altre applicazioni

- **Chirurgia oncologica:** attualmente gli studi hanno dimostrato che procedure come la resezione anteriore nel carcinoma del retto, la metastasectomia nel polmone, la resezione a cuneo e la lobectomia nel carcinoma del polmone hanno vantaggi definitivi in termini di facilità di intervento se eseguite con l'assistenza robotica. Anche la timectomia per i timomi ha riscontrato un gran passo avanti con l'utilizzo di sistemi robotici, in particolare grazie al software di imaging a fluorescenza che permette una visione chiara delle strutture anatomiche. [17]
- **Chirurgia pediatrica:** per quanto riguarda la chirurgia generale robotica in pediatria, la funduplicatio è una delle procedure più eseguite. Degli interventi robotici cardiotoracici pediatrici, quelli più eseguiti sono la riparazione dell'ernia diaframmatica, la lobectomia, l'escissione di cisti broncogena, la cardiomiectomia di Heller per l'acalasia, l'esofagoplastica e la riparazione dell'atresia esofagea. Gli interventi di urologia pediatrica assistiti da robot includono l'ureterostomia, l'appendicectomia di Mitrofanoff, l'aumento della vescica, la ricostruzione del collo vescicale e l'ileocistoplastica di aumento. La chirurgia robotica trova applicazione anche nelle patologie neonatali, come la riparazione dell'atresia duodenale, la duodenodigiunostomia per la sindrome SMA, sindrome dell'arteria mesenterica superiore, e l'operazione Kasai per l'atresia biliare. Inoltre, le procedure che prevedono la pancreatectomia distale con conservazione della milza, l'enucleazione pancreatica robotica, la pancreatico-digiuno anastomosi laterale robotica, la pancreatico-duodenectomia robotica e la pancreatectomia parziale sono utilizzate per il trattamento delle patologie pancreatiche pediatriche.
- **Oftalmologia:** la chirurgia robotica in campo dell'oftalmologia è nella sua fase iniziale. Nonostante questo, è stato dimostrato che l'uso di robot chirurgici comporta benefici come la riduzione di tremori fisiologici, e aiuta a guidare il movimento chirurgico in modo accurato in procedure come il posizionamento della punta di una microcannula in un vaso sanguigno retinico e il suo mantenimento nel vaso sanguigno per la somministrazione di farmaci. Il sistema da Vinci trova applicazione nella riparazione di lacerazioni corneali, nella microchirurgia vascolare retinica, nella vitrectomia della pars plana, nella rimozione di corpi estranei intraoculari, nella capsuloressi anteriore, nella cheratoplastica penetrante e nella chirurgia dello pterigio. [16]

CAPITOLO 4: Futuro della chirurgia robotica

La chirurgia robotica ha sicuramente rivoluzionato l'assistenza chirurgica e il suo uso si è ormai esteso a quasi tutte le specialità chirurgiche. Nonostante ormai rappresenti il “*gold standard*” per molteplici interventi chirurgici, il campo della chirurgia assistita da robot è ancora in crescente sviluppo, grazie anche all'introduzione di nuove tecnologie come l'intelligenza artificiale, ma anche per il desiderio di poter mettere in atto il concetto di telechirurgia. Oltre all'integrazione di tecnologie all'avanguardia, la chirurgia robotica si sta sempre di più evolvendo anche per quanto riguarda l'architettura dei sistemi robotici; si parla di miniaturizzazione dei robot e di robot morbidi, che rappresentano dei principali obiettivi futuri per la chirurgia.

4.1 Tecnologie avanzate

4.1.1 Intelligenza Artificiale

L'intelligenza artificiale (AI) è lo studio di algoritmi che conferiscono alle macchine la capacità di ragionare e di svolgere funzioni cognitive, tipiche dell'essere umano, come il processo decisionale, la risoluzione dei problemi e il riconoscimento di oggetti e parole, che possono aiutare nell'analisi di grandi quantità di dati sui pazienti, come le immagini mediche e le storie cliniche dei pazienti.

Il machine learning (ML) è un ramo dell'IA che consente alle macchine di imparare da una grande quantità di dati e prendere decisioni senza essere precedentemente programmate. In particolare, il deep learning (DL) è una tecnica specifica del ML che usa strati di funzioni non lineari interconnesse, generalmente denominate neuroni artificiali, come le *Deep Artificial Neural Networks*, che sono analoghe ai neuroni umani, ma superano la capacità umana di elaborare grandi quantità di dati poco maneggevoli come serie temporali, immagini radiografiche e video.

Grazie alle potenzialità di queste nuove tecnologie l'intelligenza artificiale ha iniziato ad essere applicata nel campo della chirurgia, ottenendo diversi vantaggi, aiutata anche dal fatto che la chirurgia è un ramo della medicina che genera grandi quantità di dati che possono essere elaborati in modo dettagliato e approfondito. In particolare, l'IA può essere integrata per studiare dati chirurgici preoperatori e intra-operatori, come esami clinici, di laboratorio e di imaging dei pazienti. Attualmente l'IA viene utilizzata per prevedere gli esiti chirurgici e

identificare potenziali complicazioni, ma può anche fornire informazioni al chirurgo in tempo reale come l'anamnesi e la diagnostica per immagini. Grazie alla sua natura, inoltre, l'IA è in grado di fare analisi predittive, avvisando in tempo reale i chirurghi sui rischi di emorragie, danni ai tessuti o eventuali complicazioni post-operatorie, aumentando la sicurezza dell'intervento e migliorando i risultati. [18][19]

L'IA rappresenterebbe un grande progresso per quanto riguarda la fase pre-operatoria, infatti, una delle criticità maggiori durante questa fase, sono le immagini bidimensionali della tomografia computerizzata (TC) e della risonanza magnetica (RM), che devono essere tradotte in immagini tridimensionali. Per superare quest'ostacolo si potrebbe addestrare algoritmi di IA per interpretare le immagini bidimensionali e produrre modelli tridimensionali. Questo concetto è stato definito radiomica e consiste nell'estrazione di informazioni dalle immagini mediche, per arrivare a diagnosi e prognosi cliniche. Le biopsie ottiche fanno parte della radiomica, permettendo di interpretare informazioni non strutturate su immagini TC, identificando neoplasie a partire da foto intraoperatorie e video dinamici. Una particolare applicazione si trova nella chirurgia epatobiliare, in cui viene utilizzata la laparoscopia diagnostica per la valutazione visiva e il campionamento dei tessuti, tappa spesso necessaria della stadiazione del tumore, per poter calcolare l'indice di tumore peritoneale. Con un maggiore addestramento degli algoritmi di ML, si potrebbe arrivare ad una interpretazione in tempo reale di acquisizioni video robotiche intra-addominali, per poter valutare con più accuratezza l'estensione del tumore, evitando l'attuale modello di resezione ed esame istopatologico congelato, che richiede più tempo e denaro.

In generale l'utilizzo di algoritmi di DL per riconoscere delle immagini mediche potrebbe evitare biopsie non necessarie, riducendo costi e tempi operativi. Anche l'implementazione di tecnologie di realtà aumentata (AR), integrate con la valutazione in tempo reale dell'IA, potrebbe migliorare la sicurezza e la precisione durante gli interventi, soprattutto per quanto riguarda le dissezioni.

L'integrazione dell'intelligenza artificiale non porterebbe solamente vantaggi di tipo decisionale e relativi all'analisi delle immagini, infatti, l'obiettivo più grande a cui si aspira è lo sviluppo di piattaforme completamente autonome. In futuro i robot chirurgici potranno essere in grado di operare in completa autonomia, a differenza degli attuali sistemi robotici che rappresentano una tipologia master-slave di lavoro, e che quindi si limitano a ricreare i movimenti del chirurgo. L'integrazione di algoritmi di apprendimento rappresenterebbe una parte fondamentale per lo sviluppo di sistemi autonomi, affiancati da tecnologie innovative per quanto riguarda la robotica, la visione computerizzata e sensori intelligenti.

A causa della natura deformabile dell'anatomia del corpo umano, il sistema robotico dovrà essere in grado di analizzare i dati in tempo reale, ma allo stesso tempo di confrontare dati precedentemente visti in altri pazienti e/o che provengono dalla letteratura; l'obiettivo è quello di sviluppare un sistema robotico in grado di eseguire interventi, con tutti i vantaggi dati dalla chirurgia robotica, di poter prevenire eventuali complicazioni intra-operatorie, e di sapere e decidere velocemente come procedere durante l'operazione.

L'idea è quella di insegnare ai robot, attraverso un insegnamento diretto, quindi con un'adeguata programmazione, o con un approccio indiretto, che vedrebbe il robot osservare direttamente il chirurgo all'opera o attraverso dei video, affinché questi riescano a operare come veri esseri umani, in autonomia e con una percezione e sensibilità che eguagliano quella del chirurgo. [20]

4.1.2 Chirurgia a distanza

Grazie ai progressi nelle telecomunicazioni e nella chirurgia robotica, negli ultimi anni si è iniziato a pensare sempre di più al concetto di telechirurgia. La telechirurgia, nota anche come chirurgia a distanza, sfrutta i sistemi robotici e le connessioni Internet ad alta velocità per consentire ai chirurghi di eseguire interventi su pazienti a distanza. Essa comporterebbe, non solo i benefici della chirurgia robotica, ma porterebbe ulteriori vantaggi. In particolare, uno dei principali vantaggi della telechirurgia sarebbe sicuramente la possibilità di fornire assistenza chirurgica alle persone in tutto il mondo, diminuendo se non eliminando completamente le disparità sanitarie, in particolare in aree remote, campi di battaglia o in aree inaccessibili come le astronavi. Fondamentale, inoltre, risulterebbe la telechirurgia nei casi di emergenza, in cui la rapidità di assistenza sanitaria è di importanza vitale.

Un altro importante vantaggio rappresenterebbe l'eliminazione della necessità di viaggiare per cure mediche, opzione che risulta non fattibile per molti a causa di vincoli finanziari, rischi associati ai viaggi, ritardi o restrizioni di viaggio che potrebbero risultare controproducenti, se non fatali.

Un altro vantaggio sarebbe anche la possibilità di avere delle collaborazioni tra diversi chirurghi, che potrebbe avvenire in tempo reale; il paziente, quindi, potrebbe beneficiare della competenza di uno o più chirurghi simultaneamente, soprattutto in casi di interventi chirurgici molto complessi. In più, la chirurgia a distanza, potrebbe risolvere la carenza di chirurghi, problema comune in tutto il mondo. [21]

4.2 Sistemi robotici

4.2.1 Miniaturizzazione dei sistemi robotici

La robotica su piccola scala nasce dai progressi fatti nella miniaturizzazione dei sistemi robotici e nell'ingegneria dei tessuti; essa comprende la nanorobotica, la microrobotica e la millirobotica, a seconda delle dimensioni dei robot.

Le applicazioni biomediche della microrobotica attualmente sono l'indagine su singole cellule, la biopsia, la somministrazione mirata di farmaci, la medicina rigenerativa, la pulizia dei vasi sanguigni ostruiti e la microchirurgia. Quest'ultima risulta altamente avvantaggiata in quanto, grazie a questi sistemi di piccole dimensioni, il chirurgo è in grado di avere maggiore destrezza nella manipolazione, consentendogli di accedere a strutture anatomiche intricate con grande precisione, diminuendo anche il trauma ai tessuti circostanti.

Nonostante le applicazioni già in atto in campo medico, vi sono ancora alcune limitazioni da superare, come la necessità di trovare nuove tecniche di progettazione e costruzione, ma anche di studiare materiali avanzati e metodi di controllo elettronici all'avanguardia. I microrobot, infatti, avrebbero il potenziale di colpire i tessuti cancerosi in modo più diretto, oltre ad avere la possibilità di poter essere integrati con nuove tecnologie di rilevamento e decisionali. La sfida più importante che i microrobot devono affrontare per le applicazioni mediche riguardano i materiali di fabbricazione, che devono essere biodegradabili e biocompatibili, per evitare di innescare meccanismi di difesa nel paziente. Inoltre, in futuro, forse si arriverà anche a recuperare completamente, o quasi, microrobot degradati o malfunzionanti che hanno eseguito interventi di microchirurgia. [22]

Il campo della nanorobotica, invece, si basa su nanorobot, che operano su scala nanometrica, quindi di dimensione ancora più piccola dei microrobot. I nanorobot medici sono definiti come nanostrutture non vincolate che contengono un motore, o che hanno la capacità di trasformare diversi tipi di fonti di energia in forze meccaniche e di svolgere un compito medico. La composizione e la struttura di questi dispositivi possono variare a seconda della loro funzione prevista e dei materiali e delle tecnologie utilizzate nella loro creazione. Essi hanno il potenziale di rivoluzionare l'assistenza sanitaria, a partire dal loro possibile impiego nella chirurgia minimamente invasiva, che comporterebbe interventi più precisi e mirati, traumi ridotti e tempi di recupero più rapidi. In più i nanorobot potrebbero essere utilizzati per somministrare con precisione i farmaci a tessuti, cellule o persino posizioni subcellulari, riducendo al minimo gli effetti collaterali e massimizzando l'efficacia del trattamento.

Un'altra possibile applicazione riguarda la diagnosi in vivo, che sarebbe possibile con l'utilizzo di nanorobot progettati per il monitoraggio in tempo reale di vari parametri fisiologici, che aiuterebbero nella diagnosi e diagnosi precoce di malattie. Inoltre, grazie alla dimensione nanometrica di questa tipologia di robot, potrebbe essere possibile una loro applicazione nella medicina rigenerativa, aiutando nella riparazione e rigenerazione dei tessuti a livello cellulare, oltre a poter essere utilizzati nella modulazione del sistema immunitario, sopprimendolo nelle malattie autoimmuni o migliorando la sua attività antitumorale nei trattamenti contro il cancro. In particolare, i nanorobot potrebbero essere in grado, in futuro, di interagire selettivamente con specifici biomarcatori coinvolti nello sviluppo di un tumore, ostacolandone anche la crescita.

Ad oggi, una particolare applicazione della nanorobotica sono i nanorobot intravascolari [2], una tipologia di nanorobot che hanno il potenziale per navigare nel flusso sanguigno con notevole precisione. I nanorobot intravascolari potrebbero essere impiegati per rimuovere le ostruzioni nei vasi sanguigni, per la somministrazione di farmaci mirata e per la riparazione di tessuti vascolari danneggiati, oltre al loro possibile utilizzo per il trattamento delle malattie cardiovascolari e cerebrovascolari. [23]

4.2.2 Soft robotics

In generale la soft robotics, la robotica morbida, si concentra sull'utilizzo di materiali morbidi e conformi per la costruzione di dispositivi robotici. Grazie ai materiali di cui sono fatti, i robot morbidi possono essere utilizzati in ambienti non strutturati o per interagire con gli esseri umani, perché possono deformarsi in base all'ambiente circostante. Altri vantaggi dell'utilizzo di materiali morbidi rappresentano anche il loro basso costo, la loro facile reperibilità e il fatto che sono semplici da maneggiare. Proprio per questi motivi, la robotica chirurgica flessibile rappresenta un'area di ricerca molto promettente. Si parla di costruire robot con materiali morbidi biocompatibili, materiali superelastici e plastiche morbide stampate in 3D, per consentire di modificare la forma e le proprietà meccaniche del robot al tocco, aumentando così la sicurezza intrinseca. [16] Un progetto futuro è rappresentato anche dalla possibilità di costruire dispositivi robotici monouso utilizzando questi materiali particolari, in modo da renderli specifici per ogni paziente, mantenendo le caratteristiche principali di un dispositivo robotico tradizionale, ma aumentando la flessibilità del sistema. Al momento esistono già delle tipologie di soft robot che, grazie alle loro caratteristiche, sono utilizzati, o potrebbero essere impiegati, anche per uso chirurgico: i robot continui, i robot peristaltici e i robot seriali.

I robot continui sono dispositivi robotici che non contengono singoli collegamenti rigidi o giunti, ma sono in grado di piegarsi in modo continuo. Molti progetti di robot morbidi continui sono anche modulari o composti da diverse unità di base che possono essere controllate singolarmente. Proprio per le loro caratteristiche peculiari, questa tipologia di robot morbidi, sembrano essere una scelta appropriata per la chirurgia minimamente invasiva in quanto richiedono un solo punto di accesso e consentono un' esplorazione migliore della cavità corporee, grazie alla loro flessibilità, che risulta invece impossibile con gli strumenti rigidi.

I robot peristaltici sono invece dei dispositivi semoventi, che basano il loro movimento sull' attrito anisotropo, tipico di lombrichi, vermi e serpenti. Traendo ispirazione dai movimenti di questi tre animali, si possono distinguere tre categorie di robot peristaltici. Le categorie dei robot peristaltici in stile verme e lombrico offrono il potenziale per fornire accesso al colon senza allungarlo, diminuendo i danni o il dolore al paziente come invece fanno le tecniche attuali.

L' ultima tipologia di soft robot sono i robot seriali, che sono costituiti da diversi giunti prismatici o rotanti, accoppiati insieme da collegamenti. Un recente sviluppo riguarda dei giunti pneumatici morbidi, che sono in grado di produrre sia movimento lineare che rotatorio per l' uso di pinze e bracci robotici. In particolare, in campo medico si è osservato un meccanismo seriale azionato pneumaticamente attaccato ad un endoscopio, ma anche alcune pinze basate su meccanismi seriali, dove dita dritte ma morbide, su un robot in miniatura, vengono azionate da un giunto morbido. Nonostante le grandi potenzialità dei robot seriali per la chirurgia minimamente invasiva, questi hanno ancora delle limitazioni per quanto riguarda il controllo preciso e soprattutto lo sforzo di forza, che diminuisce con l' aumentare della lunghezza. [24]

CONCLUSIONI

L'evoluzione della chirurgia robotica rappresenta una delle rivoluzioni più importanti nella storia della medicina moderna. A partire dai primi prototipi robotici fino ad arrivare agli attuali sistemi robotici chirurgici avanzati, la chirurgia assistita da robot ha radicalmente trasformato l'approccio agli interventi chirurgici, offrendo ai chirurghi una precisione e un'accuratezza senza precedenti, e ai pazienti un'esperienza chirurgica minimamente invasiva, oltre che ad un risultato estetico migliore.

Questo elaborato propone un'analisi dei principali avvenimenti storici che hanno portato alla nascita della chirurgia robotica, per poi soffermarsi sull'architettura dei sistemi robotici, in particolare tratta l'evoluzione del sistema robotico più diffuso, il sistema da Vinci. Attraverso poi un'analisi dei vantaggi e delle applicazioni dei sistemi robotici chirurgici, è emerso chiaramente che l'adozione di queste piattaforme ha portato miglioramenti significativi per i pazienti, ma anche per i chirurghi stessi. L'analisi ha anche evidenziato come la chirurgia robotica si sia ormai diffusa nella maggior parte dei campi chirurgici, dalla chirurgia generale, all'urologia, dalla chirurgia ortopedica alla cardiocirurgia, dimostrando inoltre che, l'utilizzo di sistemi robotici, si sta sempre di più espandendo verso tutte le discipline chirurgiche. La precisione millimetrica offerta dai robot chirurgici permette infatti di eseguire gli interventi chirurgici anche più complessi, con un minore tasso di complicanze intra e post-operatorie e una riduzione significativa dei tempi di degenza, con conseguente impatto positivo sia sulla qualità di vita dei pazienti, sia sugli ospedali stessi.

Nonostante gli evidenti vantaggi della chirurgia robotica, la diffusione globale delle piattaforme robotiche chirurgiche presenta ancora diverse sfide, tra cui i costi elevati legati all'acquisto e alla manutenzione dei robot chirurgici, così come i costi aggiuntivi dei corsi di formazione per i chirurghi. Inoltre, una limitazione dell'estensione della chirurgia robotica riguarda anche la necessità di avere strutture ospedaliere adeguate, con personale medico specializzato, che rappresenta una grande sfida soprattutto per i paesi in via di sviluppo.

Un altro importante aspetto riguarda le questioni etiche e legali, emerse in modo più significativo con l'avvento dell'intelligenza artificiale. La sempre più crescente autonomia dei sistemi robotici ha infatti comportato dubbi sempre più diffusi per quanto riguarda la sicurezza degli interventi chirurgici assistiti da robot, soprattutto in una situazione di eventuale malfunzionamento della macchina, oltre a domandarsi su quanto ci si possa effettivamente affidare ai robot chirurgici durante le situazioni critiche. In aggiunta a questi ultimi, anche la perplessità riguardo la privacy dei dati di un paziente, rappresenta una delle

limitazioni della chirurgia robotica. Nonostante questi ostacoli, l'evoluzione continua dei sistemi robotici e la loro versatilità, promettono di ridurre queste barriere.

Il presente elaborato, nella parte finale, indaga le opportunità future offerte dalla chirurgia assistita da robot. Nonostante le implicazioni etiche e legali, l'integrazione dell'intelligenza artificiale, potrebbe rivoluzionare ulteriormente il concetto di chirurgia. Il futuro della chirurgia robotica riguarda sistemi robotici che saranno in grado di elaborare un piano operatorio e di eseguirlo in completa autonomia, analizzando immagini, analisi e dati del paziente. Inoltre, con tecnologie sempre più avanzate si potrà persino arrivare alla chirurgia a distanza, che potrebbe abbattere le disuguaglianze nell'accesso alle cure sanitarie, consentendo ai chirurghi di operare pazienti situati in parti del mondo meno sviluppate e/o in zone difficili da raggiungere.

Altre prospettive future riguardano la miniaturizzazione e lo sviluppo di sistemi robotici sempre più sofisticati e all'avanguardia, che potrebbero estendere ancora di più l'applicazione della chirurgia robotica a nuovi ambiti, soprattutto interventi in aree del corpo che sono difficilmente raggiungibili con le tecniche tradizionali.

Tuttavia, è essenziale che l'evoluzione della chirurgia robotica sia accompagnata da un progresso tecnologico sempre più avanzato, comprendente una ricerca sempre più mirata a sviluppare sistemi robotici ancora più sicuri ed efficaci, oltre che da un impegno costante verso l'aggiornamento delle competenze professionali, soffermandosi sulla formazione del personale medico nel gestire ed utilizzare piattaforme robotiche.

In conclusione, la chirurgia robotica rappresenta una delle più importanti innovazioni tecnologiche, ma anche un'opportunità unica per una trasformazione radicale degli standard della pratica chirurgica. Mentre ci avviciniamo sempre di più ad un'era in cui i sistemi robotici arriveranno a gestire quasi totalmente gli interventi chirurgici, è fondamentale che la comunità medica, i politici e la società, collaborino insieme per garantire che questi progressi possano essere utilizzati da tutti in egual modo, mettendo al primo posto la vita dei pazienti. Solamente collaborando si potrà effettivamente realizzare il pieno potenziale della chirurgia robotica e, sfruttando pienamente le opportunità che essa offre, si avrà la possibilità di garantire benefici concreti per la salute globale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rivero-Moreno, Y., Echevarria, S., Vidal-Valderrama, C., Stefano-Pianetti, L., Cordova-Guilarte, J., Navarro-Gonzalez, J., Acevedo-Rodríguez, J., Dorado-Avila, G., Osorio-Romero, L., Chavez-Campos, C., & Acero-Alvarracín, K. (2023). Robotic Surgery: A Comprehensive review of the literature and current trends. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.42370>
- [2] Reddy, K., Gharde, P., Tayade, H., Patil, M., Reddy, L. S., & Surya, D. (2023). Advancements in Robotic Surgery: A comprehensive overview of current utilizations and upcoming frontiers. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.50415>
- [3] Morrell, A. L. G., Morrell-Junior, A. C., Morrell, A. G., Mendes, J. M. F., Tustumi, F., De-Oliveira-E-Silva, L. G., & Morrell, A. (2021). The history of robotic surgery and its evolution: when illusion becomes reality. *Revista Do Colégio Brasileiro De Cirurgiões*, 48. <https://doi.org/10.1590/0100-6991e-20202798>
- [4] Ferreira, L. M., De Araújo, R. S., & Oyharçabal, C. M. (2023). History of robotic surgery. In *Springer eBooks* (pp. 1–7). https://doi.org/10.1007/978-3-031-35102-0_1
- [5] SRI International. (2023, November 29). *75 Years of Innovation: The Robotic Surgeon (Teleoperator System and Method with Telepresence)*. SRI. <https://www.sri.com/press/story/75-years-of-innovation-the-robotic-surgeon-teleoperator-system-and-method-with-telepresence/>
- [6] Noël, J., Reddy, S., Giedelman, C., Swarovski-Adams, R. C. D., Patel, E., & Satava, R. M. (2022). History of robotic surgery. In *Springer eBooks* (pp. 3–10). https://doi.org/10.1007/978-3-031-00363-9_1
- [7] Bramhe, S., & Pathak, S. S. (2022b). Robotic Surgery: A narrative review. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.29179>
- [8] Knudsen, J. E., Ghaffar, U., Ma, R., & Hung, A. J. (2024b). Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery. *Journal of Robotic Surgery*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s11701-024-01867-0>
- [9] Zheng, K., Lin, Z. (2023). Introduction of Robot-assisted Surgical Technology: the da Vinci Xi System. In: Shu, Q. (eds) *Pediatric Robotic Surgery*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9693-1_2
- [10] George, E. I., Brand, T. C., LaPorta, A., Marescaux, J., & Satava, R. M. (2018). Origins of Robotic Surgery: From skepticism to standard of care. *JSLs Journal of the Society of Laparoscopic & Robotic Surgeons*, 22(4), e2018.00039. <https://doi.org/10.4293/jsls.2018.00039>
- [11] [1025290ra-isi-brochure-single-site-digital-low-res-394110.pdf \(intuitive.com\)](https://www.intuitive.com/1025290ra-isi-brochure-single-site-digital-low-res-394110.pdf)

- [12] [da-vinci-x-system-brochure.pdf \(intuitive.com\)](#)
- [13] [da-vinci-sp-system-brochure-1047732.pdf \(intuitive.com\)](#)
- [14] [Meet the New Da Vinci 5 Robotic Surgical System | Intuitive](#)
- [15] Crothers, I. R., Gallagher, A. G., McClure, N., James, D. T. D., & McGuigan, J. (1999). Experienced Laparoscopic Surgeons are Automated to the “Fulcrum Effect”: An Ergonomic Demonstration. *Endoscopy*, 31(5), 365–369. <https://doi.org/10.1055/s-1999-26>
- [16] Chatterjee, S., Das, S., Ganguly, K., & Mandal, D. (2024). Advancements in robotic surgery: innovations, challenges and future prospects. *Journal of Robotic Surgery*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s11701-023-01801-w>
- [17] Elizabeth Z Goh, Tariq Ali, Robotic surgery: an evolution in practice, *Journal of Surgical Protocols and Research Methodologies*, Volume 2022, Issue 1, January 2022, snac003, <https://doi.org/10.1093/jsprm/snac003>
- [18] Zhang, C., Hallbeck, M. S., Salehinejad, H., & Thiels, C. (2024). The integration of artificial intelligence in robotic surgery: A narrative review. *Surgery*. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2024.02.005>
- [19] Moglia, A., Georgiou, K., Georgiou, E., Satava, R. M., & Cuschieri, A. (2021). A systematic review on artificial intelligence in robot-assisted surgery. *International Journal of Surgery*, 95, 106151. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2021.106151>
- [20] Panesar, S., Cagle, Y., Chander, D., Morey, J., Fernandez-Miranda, J., & Kliot, M. (2019). Artificial intelligence and the future of surgical robotics. *Annals of Surgery*, 270(2), 223–226. <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000003262>
- [21] Mohan, A., Wara, U. U., Shaikh, M. T. A., Rahman, R. M., & Zaidi, Z. A. (2021). Telesurgery and Robotics: an improved and efficient era. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.14124>
- [22] Zhang, D., Gorochowski, T. E., Marucci, L., Lee, H., Gil, B., Li, B., Hauert, S., & Yeatman, E. (2023). Advanced medical micro-robotics for early diagnosis and therapeutic interventions. *Frontiers in Robotics and AI*, 9. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.1086043>
- [23] Kong, X., Gao, P., Wang, J., Fang, Y., & Hwang, K. C. (2023). Advances of medical nanorobots for future cancer treatments. *Journal of Hematology & Oncology*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s13045-023-01463-z>
- [24] Runciman, M., Darzi, A., & Mylonas, G. P. (2019). Soft robotics in minimally invasive surgery. *Soft Robotics*, 6(4), 423–443. <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0136>