

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

*SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA - CAMPUS DI CESENA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E
DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"*

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

***TELECHIRURGIA ROBOT ASSISTITA:
EVOLUZIONE E STATO DELL'ARTE DELLE PRINCIPALI
STRUMENTAZIONI E RETI TELEMATICHE***

*TESI DI LAUREA IN
STRUMENTAZIONE BIOMEDICA*

*RELATORE:
Prof. Cristiano Cuppini*

*PRESENTATA DA:
Sofia Terziari*

ANNO ACCADEMICO 2019/2020

Abstract

La telechirurgia è una tecnica operatoria che permette al medico di eseguire un intervento chirurgico su un paziente che non si trova fisicamente nello stesso luogo. Il chirurgo esegue l'intervento mediante un sistema robotico che presenta abilità chirurgiche eccezionali, combinato con tecnologie di comunicazione che consentono lo scambio di dati tra le due postazioni e l'ausilio di un monitor che permette il controllo continuo del campo operatorio. In questo lavoro sono analizzati due interventi chirurgici a distanza, con particolare attenzione alle principali strumentazioni e reti telematiche utilizzate.

Il primo intervento chirurgico a distanza è stato effettuato nel 2001, con paziente e chirurgo distanti oltre 6000 km. È stata utilizzata una rete ad alta velocità dedicata (ATM) per la trasmissione dei dati ed il sistema robotico "ZEUS" della Computer Motion. L'intervento, ritenuto troppo rischioso, non è più stato ripetuto.

Nel 2019 a Milano è stato effettuato il primo intervento chirurgico a distanza tramite connessione 5G. In questo caso paziente e chirurgo si trovavano distanti circa 15 km, ciò è stato reso possibile grazie all'utilizzo di determinate apparecchiature elettromedicali connesse alla rete di quinta generazione per la trasmissione dei dati. Le principali strumentazioni utilizzate, descritte nella trattazione, sono: sistema CALM, laser CO₂ medicale, robot Panda per manipolare le pinze chirurgiche robotiche ed esoscopio stereo 3D VITOM "lato paziente"; Wacom tablet, dispositivo tattile Omega.7 e display tridimensionale HMZ-T3 "lato chirurgo".

Ciò che risulta dall'analisi è che per il funzionamento delle tecnologie utilizzate in telechirurgia è necessaria una connettività avanzata, come quella fornita dalla rete 5G, che garantisce tempi di risposta immediati, maggiore velocità e capacità per il trasferimento dei dati ed estrema affidabilità. Tuttavia è bene ricordare che prima che la chirurgia tele-robotica diventi comune è necessario mettere in atto precauzioni, controlli e standard rigorosi.

Per il futuro si auspica che la possibilità di eseguire manipolazioni complesse da postazioni remote consentirà al chirurgo esperto di insegnare o sorvegliare l'esecuzione di tecniche avanzate o nuove mediante intervento in tempo reale. Di fatto si elimineranno i vincoli geografici e questo permetterà di ottenere elevate competenze chirurgiche in tutto il Mondo.

Sommario

Abstract	3
CAPITOLO 1	7
INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 2	11
LA TELECHIRURGIA	11
2.1 Evoluzione della chirurgia a distanza	11
2.2 Sistemi di supporto per la chirurgia a distanza	14
CAPITOLO 3	17
IL PRIMO INTERVENTO CHIRURGICO A DISTANZA TRAMITE L'UTILIZZO DI UNA RETE DEDICATA	17
3.1 Principali strumentazioni utilizzate	18
3.2 Considerazioni	22
3.3 Limitazioni della telechirurgia tramite rete dedicata al tempo dell'esecuzione dell'intervento	23
3.4 Prospettive della telechirurgia tramite rete dedicata al tempo dell'esecuzione dell'intervento	24
CAPITOLO 4	27
IL PRIMO INTERVENTO CHIRURGICO A DISTANZA TRAMITE L'UTILIZZO DELLA RETE 5G	27
4.1 Principali strumentazioni utilizzate	29
4.1.1 Rete 5G sperimentale - trasmissione di dati bidirezionale	30
4.1.2 Sistema CALM (computer assisted laser microsurgery) - microchirurgia laser assistita da computer	31
4.1.3 Laser CO ₂ medicale SmartXide2 C60 [DEKA]	36
4.1.4 Wacom tablet - per il controllo della posizione del laser	40
4.1.5 Robot Panda [Franka Emika] - per manipolare le pinze chirurgiche robotiche	41
4.1.6 Esoscopio stereo 3D VITOM [Karl Storz]	44
4.1.7 Dispositivo tattile Omega.7 [Force Dimension] - per il controllo del robot e delle pinze chirurgiche	48
4.1.8 Display tridimensionale HMZ-T3 [Sony] - per la visualizzazione del sito chirurgico remoto	50
4.2 Considerazioni	51

4.3 Limitazioni della telechirurgia tramite rete 5G	53
4.4 Prospettive della telechirurgia tramite rete 5G	54
CAPITOLO 5	55
CONCLUSIONI	55
Bibliografia e sitografia	59
Ringraziamenti	67

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Il secolo scorso ha rappresentato un periodo particolarmente ricco di scoperte e di innovazioni nel campo della sanità e della medicina, in cui l'uomo ha ottenuto risultati significativi e a volte inaspettati grazie alla realizzazione di nuovi dispositivi ed apparecchiature. Tante cose sono state fatte e tante altre sono ancora da fare: il secolo attuale sarà sicuramente caratterizzato da un progresso ulteriormente marcato in tutti i settori legati alla salute e alla vita.

Nell'ambito dello sviluppo tecnologico non è importante solo l'aspetto dell'innovazione, sempre più fondamentale infatti sta diventando l'integrazione con le tecnologie già esistenti.

Questa tesi è volta ad analizzare un settore particolarmente interessante che si è sviluppato, e si sta tutt'ora evolvendo, grazie all'innovazione tecnologica applicata alla medicina: la telechirurgia.

La telechirurgia, o chirurgia a distanza, è una tecnica operatoria che consente al medico di eseguire un intervento chirurgico su un paziente, nonostante questi non si trovino fisicamente nello stesso luogo. Il chirurgo esegue l'intervento attraverso l'utilizzo di un sistema robotico e l'ausilio di un monitor che consente il controllo continuo del campo operatorio. La chirurgia a distanza combina elementi di robotica che presentano abilità chirurgiche eccezionali con tecnologie di comunicazione che consentono lo scambio di dati tra le due postazioni. Questa tecnica è molto promettente e si auspica che possa consentire a chirurghi specializzati di essere a disposizione dei pazienti di tutto il Mondo, senza necessità di viaggiare oltre confine. La telemedicina sarà determinante nelle zone di guerra, dove i feriti potrebbero essere curati direttamente sul campo, e nelle aree più remote del Globo.

Il primo intervento chirurgico a distanza è stato effettuato nel 2001. Il paziente si trovava in Francia mentre il chirurgo ha operato

da una postazione lontana più di 6000 km, a New York. È stata utilizzata una rete ad alta velocità dedicata per la trasmissione dei dati, ma l'intervento è stato ritenuto troppo rischioso e non è più stato ripetuto.

Successivamente, nel 2019 a Milano è stato effettuato il primo intervento chirurgico a distanza tramite l'utilizzo della connessione 5G. In questo caso, il paziente si trovava lontano 15 km dal sito in cui ha operato il chirurgo e ciò è stato reso possibile grazie all'utilizzo di apparecchiature elettromedicali molto moderne connesse ad una rete di quinta generazione per la trasmissione dei dati.

Nelle pagine che seguono questo primo capitolo introduttivo sono presentati in modo più approfondito gli argomenti sopra citati, suddivisi in ulteriori quattro capitoli.

Il secondo capitolo dell'elaborato, *La telechirurgia*, fornirà alcune indicazioni generali inerenti alla chirurgia a distanza, dalla storia evolutiva di questa procedura ai sistemi di supporto di base necessari.

Nel terzo capitolo, *Il primo intervento chirurgico a distanza tramite l'utilizzo di una rete dedicata*, sarà descritta la prima esperienza di telechirurgia avvenuta nel 2001, con particolare attenzione alle tecnologie applicate per consentire la realizzazione di tale intervento. Saranno esposte le limitazioni e le prospettive future che si ritenevano maggiormente rilevanti al tempo dell'esecuzione della procedura.

Con il quarto capitolo, *Il primo intervento chirurgico a distanza tramite l'utilizzo della rete 5G*, nel quale verrà illustrato il recente intervento di telechirurgia effettuato a Milano nel 2019, ci si pone l'obiettivo di analizzare in modo approfondito le moderne strumentazioni biomedicali utilizzate per la realizzazione di tale esperienza. Anche in questo caso, saranno poi delineate le principali limitazioni e le prospettive future per l'applicazione di questa metodica operatoria.

Infine nel quinto capitolo, *Conclusioni*, saranno esposte alcune considerazioni sugli sviluppi previsti e prevedibili nell'ambito

della chirurgia a distanza e sui benefici che questa ci si auspica possa fornire in futuro al Mondo intero.

CAPITOLO 2

LA TELECHIRURGIA

La telechirurgia è un campo emergente ed interdisciplinare della robotica tele-operata e della chirurgia mininvasiva assistita da robot, ed ha un futuro promettente. [2] Consiste in un'applicazione, ancora in fase sperimentale, dei mezzi telematici per eseguire interventi chirurgici su pazienti situati a distanza, anche notevole, rispetto a dove si trova il chirurgo. [7]

Le tecnologie chiave coinvolte sono i robot chirurgici, la sovrapposizione video e la simulazione chirurgica, la trasmissione video e la comunicazione di rete e le misure di salvaguardia, le quali garantiscono sicurezza e fattibilità alla telechirurgia clinica. [2] Il chirurgo, tramite l'ausilio di un monitor che gli consente l'osservazione continua del campo operatorio, esegue le varie manovre dell'intervento che sono esattamente ripetute sul paziente attraverso un robot. [7]

2.1 Evoluzione della chirurgia a distanza

La chirurgia a distanza utilizza reti wireless e tecnologie robotiche per permettere ai chirurghi di operare su pazienti che si trovano in un luogo distante da loro. Questa tecnologia non va solo a vantaggio dell'attuale carenza di chirurghi, ma consente di eliminare le barriere geografiche che impediscono interventi chirurgici tempestivi e di alta qualità, permette di ridurre potenziali complicazioni e il rischio legato ai viaggi a lunga distanza. Il sistema, inoltre, fornisce una migliore precisione chirurgica a beneficio del paziente e garantisce la sicurezza del chirurgo operante.

Con il progresso della robotica e della tecnologia di comunicazione wireless, questa forma di chirurgia sta diventando sempre più fattibile. Di seguito si elencano i principali benefici ottenibili grazie all'utilizzo della telechirurgia:

- Consente interventi chirurgici di alta qualità in luoghi con scarsa assistenza medica come aree rurali, campi di battaglia e veicoli spaziali, eliminando la necessità di viaggi a lunga distanza, insieme agli oneri e ai pericoli finanziari legati a questi viaggi;
- L'attuale sistema di visualizzazione tridimensionale fornisce un feedback visivo condiviso e ad alta definizione ai chirurghi di diversi centri contemporaneamente. Questo consente la collaborazione chirurgica tra chirurghi in diversi centri medici in tempo reale;
- Il tremore fisiologico dell'operatore può essere annullato in tempo reale con la tecnologia dell'accelerometro, migliorando l'accuratezza chirurgica e riducendo i danni ai tessuti sani adiacenti. La minimizzazione dei danni ai tessuti sani accelera il recupero del paziente.

A partire dal primo intervento chirurgico al mondo effettuato in remoto nel 2001, la telechirurgia ha visto numerosi progressi tecnologici. Quell'intervento fu condotto da un team chirurgico a New York - USA, utilizzando il sistema robotico "ZEUS", che consentì di effettuare con successo una colecistectomia laparoscopica, su una paziente in un ospedale di Strasburgo - Francia.

Una delle principali criticità della telechirurgia è il tempo di latenza, che è definito come il ritardo nel trasferimento del feedback uditivo, visivo e tattile tra le due posizioni distanti, cioè tra i luoghi in cui si trovano paziente e chirurgo.

L'aumento del tempo di latenza è principalmente attribuibile al problema del routing di rete, alla congestione e al sovraccarico del server. Il ritardo temporale, non solo genera un intervento lungo, ma introduce anche un'imprecisione chirurgica significativa, che può mettere a rischio la sicurezza e ritardare il recupero post-chirurgico del paziente.

Si ritiene che il tempo di latenza ideale debba essere inferiore a 100 millisecondi e che un tempo di latenza superiore a 300 millisecondi produca importanti imprecisioni nella gestione dello strumento. [9]

È importante segnalare che la prima colecistectomia tele-chirurgica condotta nel 2001 ha avuto un tempo di latenza di 155 millisecondi, valore ritenuto accettabile. [53]

Nonostante ad oggi sia possibile ottenere un tempo di latenza inferiore a 100 millisecondi attraverso cavi in fibra ottica ad alta velocità e una modalità di trasferimento asincrono (ATM) dedicata, è purtroppo necessaria la presenza di 40 tecnici durante l'intervento affinché sia possibile mantenere questa velocità. [57] [58] [59]

È comunque interessante notare che, addestrando i teleoperatori in modo opportuno, un certo grado di imprecisione dovuto al ritardo di tempo può essere radicalmente diminuito o eliminato. [60]

Fino al 2015 il sistema di telechirurgia convenzionale presentava un altro inconveniente, in quanto non era in grado di fornire informazioni tattili e l'operatore si basava esclusivamente su un feedback visivo. La tecnologia che consente la trasmissione delle informazioni tattili al teleoperatore è chiamata "*feedback tattile*" (haptic feedback). Da quell'anno, con la realizzazione del primo prototipo implementato con tecnologia di feedback tattile, il "*Telelap Alf-x*" della ditta italiana SOFAR S.p.A., è stato possibile ridurre il tempo medio di esecuzione degli interventi. [54] [55] [56] Il "*Telelap Alf-x*" è stato inoltre dotato di una tecnologia di tracciamento oculare, in grado di arrestare i movimenti dei bracci robotici quando gli occhi dell'operatore non sono fissi sullo schermo.

L'ottenimento del feedback tattile è un aspetto cruciale del sistema chirurgico robotico wireless, che consente all'operatore di sentire la consistenza del tessuto e la tensione tra le suture, previene il danneggiamento dei tessuti fragili e lo strappo delle suture durante l'operazione, migliora la sicurezza dell'operatore durante l'intervento chirurgico.

A partire dal 2001 sono state introdotte numerose innovazioni tele-chirurgiche, volte ad ottimizzare ulteriormente la visualizzazione visiva, il tempo di latenza e la tecnologia di feedback tattile. Per quanto concerne quest'ultimo punto, un'evoluzione del sistema di feedback tattile è rappresentata dal dispositivo "*Omega.7*" dell'azienda Force Dimension, impiegato nel primo intervento

chirurgico a distanza effettuato tramite l'utilizzo della rete 5G, nel 2019 a Milano, descritto successivamente al paragrafo 4.1.7.

Ulteriori impedimenti all'implementazione della tecnologia telechirurgica nell'ambiente clinico di oggi sono riportati in seguito:

- Mancanza di programmi di formazione completamente sviluppati;
- Mancanza di protocolli operativi standard;
- Mancanza di protocolli per la manutenzione delle apparecchiature;
- Difficoltà nell'acquisizione delle attrezzature;
- Necessità di sviluppo di una rete globale;
- Problemi di finanziamento;
- Questioni legali, che variano tra Stato e Stato.

Se tali fattori limitanti non vengono affrontati prima del lancio dell'uso clinico di questa nuova tecnologia, potrebbero verificarsi negligenza, inefficienza delle cure e spese inutili. Una volta minimizzati i vari problemi sopra evidenziati, l'implementazione diffusa della telechirurgia in ambito clinico diventerà altamente fattibile e le barriere geografiche potranno essere così eliminate. [3]

2.2 Sistemi di supporto per la chirurgia a distanza

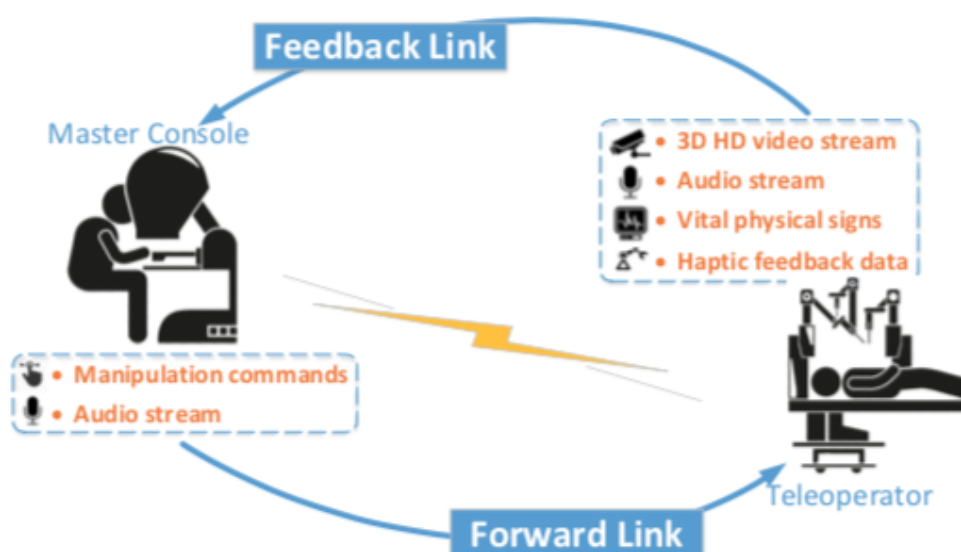


Fig. 2.2: modello di set-up per chirurgia a distanza [4]

Vediamo ora com'è strutturato un set-up generale di chirurgia a distanza. Il chirurgo è posto davanti ad una "Master Console" e tramite gli appositi comandi interagisce con la sala operatoria, situata in un luogo distante anche vari chilometri da esso. Il chirurgo riceve i dati dei parametri vitali del paziente, i dati di feedback dei suoi movimenti (feedback tattile) e tramite una telecamera 3D ad alta risoluzione riesce a sopperire alla sua mancanza visiva all'interno della sala operatoria. Inoltre, la sala dove si trova il chirurgo operante e la sala operatoria dove è situato il paziente sono sempre in collegamento audio.

È assolutamente indispensabile che tutti questi dati arrivino a destinazione inalterati e velocemente; infatti, come già detto, le performance della chirurgia robotica a distanza dipendono fortemente dai tempi di latenza della connessione.

CAPITOLO 3

IL PRIMO INTERVENTO CHIRURGICO A DISTANZA TRAMITE L'UTILIZZO DI UNA RETE DEDICATA

Come precedentemente introdotto, nel 2001 un gruppo di medici americani situati a New York ha per la prima volta operato una paziente che si trovava in un altro continente, per la precisione a Strasburgo, Francia.

Secondo i medici dell'European Institute of Telesurgery di Strasburgo l'operazione assistita da robot è stata coronata dal successo e non sono sorte complicazioni. La paziente, una donna di 68 anni operata di calcoli alla colecisti, è stata dimessa due giorni dopo l'operazione.

Durante questa colecistectomia laparoscopica da remoto i due gruppi di medici, uno sul posto (Strasburgo) e l'altro a 6000 km di distanza (New York), erano in costante collegamento mediante una linea ad alta velocità dedicata (ATM). L'utilizzo di questa rete dedicata ha permesso la condivisione in tempo reale delle immagini della telecamera. Il ritardo di tempo medio tra i movimenti del chirurgo e quelli del braccio robot, dovuto alla distanza, è stato di 155 millisecondi, molto meno dei 300 millisecondi ritenuti il limite di sicurezza accettabile. [5]

Questo intervento ha rappresentato il primo esempio di telechirurgia remota transcontinentale assistita da robot e ha dimostrato la fattibilità di eseguire interventi chirurgici su distanze transoceaniche utilizzando la tecnologia di telecomunicazione ATM (asynchronous transfer mode - modalità di trasferimento asincrono) dedicata.

I limiti tecnici e il problema del ritardo temporale nella trasmissione di informazioni digitalizzate attraverso le linee di telecomunicazione esistenti erano stati fonte di preoccupazione riguardo la fattibilità di eseguire una procedura chirurgica completa da distanze remote.

Il sito dell'operatore è stato allestito in un edificio non medico a Manhattan. I chirurghi di New York hanno eseguito la dissezione del dotto cistico e dell'arteria e la colecistectomia. Un team di Strasburgo ha indotto lo pneumoperitoneo ed eseguito la configurazione del braccio del robot, il posizionamento del "trocar" (*strumento chirurgico con una estremità appuntita usato per perforare una cavità del corpo, che permette ai fluidi di essere drenati utilizzando una cannula inserita nell'apertura [10]*), l'esposizione delle strutture e l'applicazione della clip. A Strasburgo, l'équipe chirurgica ha monitorato la procedura su uno schermo ed era in costante collegamento attraverso una linea telefonica con i colleghi di New York per coordinare l'elettrocoagulazione. Dopo il completamento della dissezione e l'introduzione di un sacchetto di plastica per l'estrazione, la cistifellea è stata quindi rimossa dai chirurghi presenti in sala operatoria. L'addome è stato quindi esufflato e le incisioni sono state chiuse.

L'operazione è stata eseguita con successo in 54 minuti, senza difficoltà o complicazioni. I chirurghi hanno percepito la procedura come sicura e l'intero sistema perfettamente affidabile. Il decorso postoperatorio è stato regolare e la paziente è tornata alle normali attività entro 2 settimane dall'intervento. [6]

3.1 Principali strumentazioni utilizzate

L'intervento è stato condotto utilizzando il sistema robotico "ZEUS", messo a punto dalla ditta californiana Computer Motion. Il sistema era costituito da due sottosistemi fisicamente separati denominati *lato chirurgo* e *lato paziente*.

- Il sottosistema del chirurgo (con sede a New York) comprendeva una console che accettava l'input del chirurgo tramite la movimentazione di apposite manopole (joystick); il chirurgo era seduto davanti ad un monitor video per la visualizzazione del sito chirurgico remoto;
- Il sottosistema del paziente (con sede a Strasburgo) comprendeva due bracci robotici che traducevano l'input in un'effettiva

manipolazione dello strumento e un braccio robotico aggiuntivo per controllare la telecamera endoscopica, che poteva essere azionato tramite un comando vocale.

Era possibile collegare una varietà di strumenti chirurgici ai bracci robotici, in modo che il chirurgo potesse attivare i vari strumenti (pinze, forbici, uncini e così via) semplicemente movimentando le manopole sulla console remota. Le tre braccia robotiche erano attaccate in modo indipendente al tavolo della sala operatoria ed erano controllate da un computer situato all'interno della console del chirurgo.



Fig. 3.1 a: sistema robotico ZEUS. Sulla sinistra si può notare la postazione del chirurgo comprendente la console robotica, mentre sulla destra si possono vedere i bracci robotici che si muoveranno sul paziente

[11]

L'interfaccia software del computer era in grado di eliminare il tremore del chirurgo tramite l'elaborazione del movimento delle mani, ottenendo quindi movimenti fluidi e precisi. [11] [61]

La precisione nell'esecuzione dell'intervento era incrementata dalla possibilità di variare il rapporto tra l'ampiezza dei movimenti del chirurgo e l'ampiezza dei movimenti dello strumento chirurgico collegato al braccio robotico. Il chirurgo poteva impostare il robot in modo tale da far corrispondere movimenti ampi del joystick a micromovimenti dell'utensile. Il fattore di scala poteva essere variato durante l'intervento dal chirurgo in un intervallo da 2:1 a 10:1, garantendo quindi una notevole flessibilità dello strumento. [11] [61]

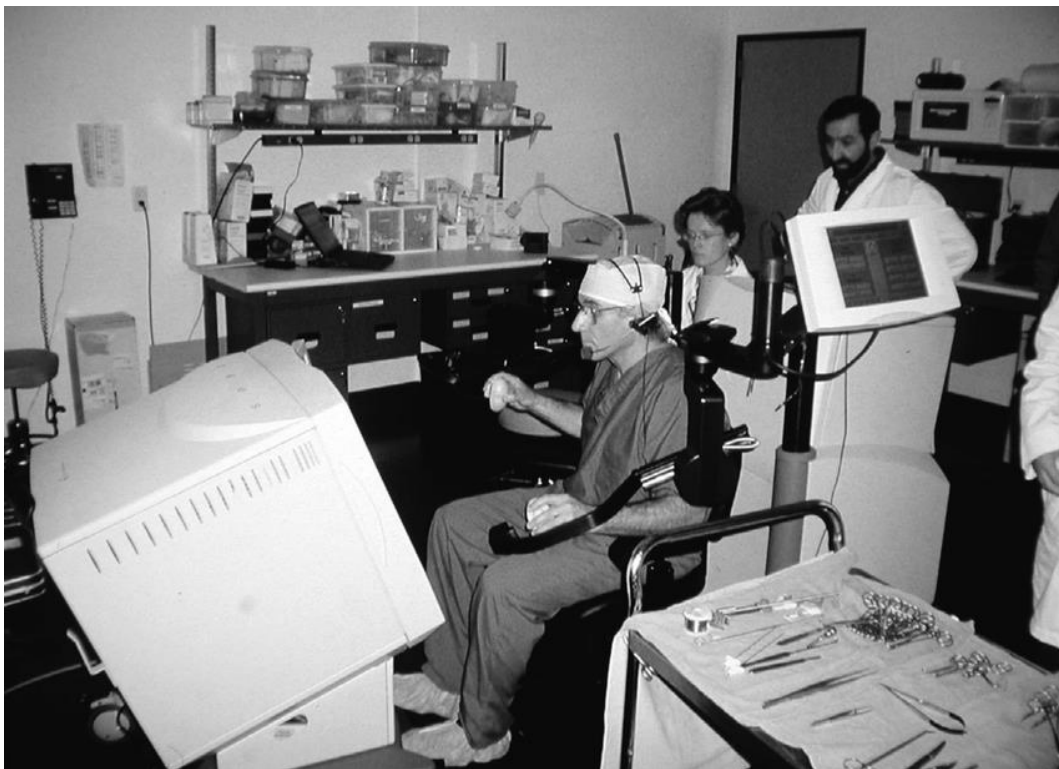


Fig. 3.1 b: chirurgo seduto alla console del sistema robotico ZEUS, mentre utilizza comandi vocali e manuali [8]

Due computer collegati dai canali di comunicazione ad alta velocità hanno consentito di mettere in collegamento i due sottosistemi. I movimenti della telecamera sono stati diretti dal computer a New York secondo le istruzioni del chirurgo operante.

Come già detto, i collegamenti tra New York e Strasburgo sono stati stabiliti tramite la tecnologia ATM. I nodi della rete ATM erano

interconnessi tramite una rete terrestre in fibra ottica ad alta velocità, che ha permesso il trasporto di dati attraverso connessioni virtuali dedicate per cliente.

È bene precisare che la rete ATM fornisce un servizio di alta qualità per il trasporto dei dati. Ad esempio, la probabilità di non avere interruzioni di rete è del 99.99% (il cosiddetto tasso di disponibilità della rete); la rete ATM offre un basso ritardo di trasporto e un basso tasso di perdita di pacchetti.

Durante l'intervento, una larghezza di banda di 10 Mb/s è stata riservata tramite applicazioni di interconnessione di rete in entrambi i siti utilizzando un'unità di terminazione di rete (NTU), in grado di fornire un percorso multiservizio a diverse applicazioni.

Per monitorare e misurare il proprio livello di qualità, la NTU (il mittente) ha inserito pacchetti di funzionamento e manutenzione (OAM) all'interno del flusso di dati dell'utente, che sono stati estratti e analizzati dalla NTU remota (il destinatario). Analizzando questi pacchetti e confrontando il numero di pacchetti utente inizialmente inviati con quelli effettivamente ricevuti, si è potuto misurare il numero di pacchetti persi.

Una linea di backup identica era disponibile in caso di congestione della linea principale. Il flusso di dati assegnato a ciascuna applicazione è stato unito al percorso virtuale a 10 Mb/s secondo una specifica qualità del servizio.

I dati di movimento del robot avevano un'alta priorità e una velocità garantita di 512 Kb/s all'interno del percorso virtuale di 10 Mb/s. I pacchetti video sono stati inviati con una velocità minima garantita di 7 Mb/s, con la possibilità di utilizzare più banda se disponibile all'interno del percorso virtuale di 10 Mb/s. Inoltre, è stato collegato un sistema di videoconferenza, completo di grandi schermi televisivi, e un telefono intraperitoneale a NTU. I dati provenienti da queste due applicazioni sono stati uniti e hanno ricevuto una velocità minima garantita di circa 3 Mb/s.

Le fasi operative sono state attentamente monitorate e sono state registrate difficoltà tecniche, complicazioni, appropriatezza della dissezione e tempi operativi: [6]

- Per tutta la durata dell'intervento non si sono verificate interruzioni nella trasmissione dei movimenti chirurgici e non è stato rilevato alcun degrado del segnale video;
- Non sono sorte complicazioni di carattere medico;
- Il coordinamento dell'elettro-cauterizzazione, come ordinato dai chirurghi di New York, è stato eccellente e non sono stati riscontrati danni (non si è verificato alcun sanguinamento);
- La configurazione del braccio robotico e il posizionamento del "trocar" hanno richiesto 16 minuti, mentre la colecistectomia laparoscopica vera e propria è stata condotta in 54 minuti (compreso il tempo necessario per cambiare gli strumenti collegati ai bracci del robot per eseguire le diverse fasi della procedura, un totale di 10.30 minuti).

Dopo il completamento della procedura, i chirurghi del team di New York hanno fornito una valutazione soggettiva della qualità dell'immagine e della sicurezza complessiva dell'operazione, in una scala da 0 a 10. La valutazione della qualità dell'immagine ha avuto un punteggio medio di 9.5. La sicurezza generale della procedura era intesa come la combinazione di immagini video di alta qualità per una visualizzazione appropriata dei dettagli strutturali e anatomici, della capacità di controllare i movimenti chirurgici e della perfetta coordinazione nell'uso del cauterio per la coagulazione dei vasi. Tutti i chirurghi hanno valutato con un punteggio di 10 la percezione della sicurezza dell'operazione.

In nessun caso durante l'intera operazione vi è stato alcun rischio per la paziente correlato alla teletrasmissione o all'utilizzo del sistema robotico.

3.2 Considerazioni

Oltre a migliorare le prestazioni umane dei chirurghi, i sistemi robotici offrono la capacità unica di eseguire interventi chirurgici in luoghi remoti. I limiti più importanti sono l'affidabilità (o la qualità del servizio) delle linee di telecomunicazione e il problema della latenza (il tempo di ritardo da quando il movimento della mano viene avviato dal chirurgo fino a quando il manipolatore remoto si

muove effettivamente e l'immagine è mostrata sul monitor del chirurgo).

A causa del fattore di latenza, si riteneva che la distanza massima per la chirurgia a distanza non fosse superiore a poche centinaia di chilometri sulle telecomunicazioni terrestri. L'esecuzione dell'intervento ha smentito tale stima.

Il caso sopra riportato, ha dimostrato la fattibilità e la sicurezza di eseguire un'operazione chirurgica completa da una posizione remota.

- Non sono state riscontrate difficoltà o complicazioni specifiche derivanti dall'utilizzo della teletrasmissione della procedura chirurgica;
- I chirurghi hanno percepito la procedura come sicura e i movimenti robotici fluidi e adeguatamente reattivi alle loro manipolazioni.

La fattibilità tecnica e la sicurezza clinica, tuttavia, non sono gli unici problemi da risolvere per consentire l'implementazione delle procedure di telechirurgia nella pratica clinica di routine. [6]

3.3 Limitazioni della telechirurgia tramite rete dedicata al tempo dell'esecuzione dell'intervento

In primo luogo, nonostante una rete di fibre ATM terrestri ad alta velocità fosse presente in più di 200 paesi in tutto il mondo, la maggior parte degli ospedali non era dotata di tecnologia ATM.

Inoltre, il costo delle operazioni da remoto poteva essere un ostacolo, in quanto le macchine robotiche costavano anche oltre un milione di dollari.

Per lo sviluppo della ricerca, altri costi significativi riguardavano l'uso di linee di telecomunicazione e l'impiego di risorse umane, tra cui diversi professionisti quali chirurghi, informatici ed ingegneri. I maggiori costi della chirurgia a distanza, se eseguita su base di routine, avrebbero dovuto evidenziarsi esclusivamente come quelli attribuibili alla macchina robotica e alla teletrasmissione.

Al tempo era difficile fornire una stima esatta del costo della componente di telecomunicazione, perché questo variava a seconda della distanza e dell'ubicazione dei siti collegati (cioè, i collegamenti transoceanici erano ragionevolmente più costosi dei collegamenti all'interno dello stesso continente o Paese). Approssimativamente, il costo per una disponibilità di 1 anno di linee ATM point-to-point variava tra 100000 dollari e 200000 dollari americani. Quindi, se la telechirurgia da remoto tramite linea dedicata veniva valutata esclusivamente come espansione della pratica chirurgica esistente, non era certamente conveniente.

Alcuni ipotizzarono che se la telechirurgia tramite rete dedicata avesse raggiunto gli obiettivi di aumentare l'accesso all'assistenza sanitaria e migliorare la formazione e l'efficienza dei chirurghi, si sarebbe addirittura potuta rivelare conveniente per i sistemi sanitari. Si auspicava anche che il costo delle nuove tecnologie sarebbe diminuito nel tempo. [6]

3.4 Prospettive della telechirurgia tramite rete dedicata al tempo dell'esecuzione dell'intervento

Non c'è dubbio che la telechirurgia remota tramite rete dedicata dipenda dall'assistenza robotica e dalle tecnologie dell'informazione. Avrebbe potuto trarre vantaggio dallo sviluppo delle tecnologie robotiche, dall'implementazione della realtà virtuale e dalla simulazione nella pratica chirurgica.

Il miglioramento della destrezza umana derivante dall'uso di un robot e l'esecuzione di compiti di alta precisione a distanza avrebbero potuto avere altri vantaggi, che vanno oltre la chirurgia. In effetti, il risultato conseguito ha simboleggiato un'importante rivoluzione tecnologica. Se le tecnologie di telecomunicazione aggiornate hanno consentito la condivisione di informazioni, voce e immagini, con l'intervento si è mostrato per la prima volta che gesti complessi possono essere eseguiti con alta precisione e in tempo reale anche a notevoli distanze.

Al tempo, si riteneva che la telechirurgia assistita da robot remota fosse fattibile e sicura utilizzando una linea di telecomunicazione ATM designata. [6]

CAPITOLO 4

IL PRIMO INTERVENTO CHIRURGICO A DISTANZA TRAMITE L'UTILIZZO DELLA RETE 5G

Come descritto nel capitolo precedente, la prima operazione di telechirurgia che ha coinvolto un paziente umano è stata eseguita nel 2001. La paziente, localizzata a Strasburgo, Francia, ha subito una colecistectomia laparoscopica eseguita da un chirurgo a New York attraverso l'utilizzo di una rete dedicata. Troppo complicato e rischioso: l'esperimento non è più stato ripetuto. [1]

Infatti, questa esperienza pionieristica ha mostrato il potenziale della chirurgia a distanza, ma la riproduzione sicura ed affidabile di questa impresa si è rivelata problematica per molti anni, a causa della limitata disponibilità di robot chirurgici e della mancanza di una rete che permettesse collegamenti veloci ed affidabili. [12]

L'8 ottobre 2019 a Milano è stato effettuato il primo intervento a distanza senza l'utilizzo di una rete dedicata, con il paziente lontano 15 km. In realtà è stato un test su cadavere, una rimozione di un polipo alle corde vocali avvenuta grazie all'utilizzo di robot, laser e connessione 5G. [1][14]

La vera novità di questo intervento non sta nel fatto che l'intervento chirurgico sia stato effettuato da un ospedale all'altro da remoto (cosa che, come abbiamo visto, è stata dimostrata essere possibile già nel 2001), ma nel fatto che è stata utilizzata la tecnologia di connessione 5G. Infatti, questo tipo di connessione ha risolto quelli che erano i problemi delle tecnologie precedenti, cioè tempi di latenza lunghi e quindi imprecisione nei movimenti del chirurgo. [4]

Il chirurgo che ha operato è il dott. Matteo Trimarchi, otorinolaringoiatra esperto dell'Ospedale San Raffaele di Milano. L'ingegnere Leonardo Mattos, responsabile del laboratorio di robotica biomedica all'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) a Genova, è colui che ha progettato il sistema.

È da anni che la medicina insegue questo sogno, e oggi, grazie alla rete 5G, più robusta della connessione internet in uso attualmente, sta arrivando a realizzarlo. Con questa nuova rete è possibile aprire davvero l'epoca della chirurgia a distanza.

L'operazione chirurgica in questione, cioè la rimozione di un polipo alle corde vocali del paziente, è un intervento piuttosto complesso per gli otorinolaringoiatri in quanto serve precisione estrema. È necessario che il tempo di latenza tra il movimento dei chirurghi e quello degli strumenti sia minimo, senza alcun fastidio. Questo è uno dei principali punti deboli della telechirurgia.

Il paziente era un cadavere umano adulto e si trovava nel laboratorio di anatomia dell'Ospedale San Raffele di Milano, con la testa sormontata da una telecamera ad alta risoluzione, un robot per muovere il laser e uno per il bisturi. I chirurghi operanti erano situati a 15 km di distanza, nel Vodafone Village, nella periferia sud-ovest di Milano. I chirurghi dovevano tenere un joystick con la mano sinistra per muovere il bisturi e tracciare con la mano destra con una penna su un tablet il percorso del taglio, da fare con il laser attivato dal piede. Tramite un visore è stato possibile per i chirurghi seguire il teatro operatorio, ingrandito con il microscopio. Era poi presente un altro schermo per trasmettere le immagini generali della sala operatoria. Microfoni e altoparlanti permettevano di parlare a distanza.

I robot utilizzati normalmente in chirurgia non sono esattamente come quelli utilizzati in questo caso, anche perché solitamente i chirurghi che li manovrano sono seduti accanto al tavolo operatorio, o al massimo nella stanza adiacente, con joystick e bisturi uniti da un cavo. [1]

In questo intervento è stato utilizzato un sistema robotico di telemicrochirurgia con laser transorale funzionante su una rete di trasmissione dati 5G.

Durante la procedura, è stata preventivamente eseguita una ventricolotomia in modo da esporre le corde vocali. Successivamente, il chirurgo ha eseguito una cordectomia di tipo I sulla piega vocale sinistra, seguita da una cordectomia di tipo IV sulla piega vocale

destra. Queste procedure sono definite in conformità con le classificazioni della Società Europea Laringologica.

La procedura è stata eseguita seguendo i protocolli etici internazionali, inclusa la Dichiarazione di Helsinki e le raccomandazioni di Health Technology Assessment del Gruppo di Alto Livello sui Servizi Sanitari e Assistenza Medica della Commissione Europea. [12]

4.1 Principali strumentazioni utilizzate

Il sistema robotico adottato per l'intervento ha consentito un'interazione chirurgica diretta con il paziente. Le principali componenti e strumentazioni utilizzate sono di seguito sinteticamente elencate:

- La rete 5G sperimentale che ha permesso la trasmissione bidirezionale dei dati, collegando entrambe le estremità del sistema;
- La configurazione "lato paziente" comprendeva: il sistema CALM, un laser CO₂ medicale, un robot Panda per manipolare le pinze chirurgiche robotiche ed un esoscopio stereo 3D VITOM;
- L'interfaccia "lato chirurgo" includeva: un Wacom tablet, un dispositivo tattile Omega.7 ed un display tridimensionale HMZ-T3.

Nei prossimi paragrafi vedremo più nel dettaglio le principali strumentazioni che sono state utilizzate per svolgere questa operazione.

Oltre a quanto esposto in seguito, una webcam e un microfono sono stati posizionati in entrambi i siti per migliorare la comprensione e la collaborazione tra gli assistenti locali (lato paziente) ed il chirurgo.

Gli assistenti, che hanno preparato il paziente prima dell'operazione, hanno anche controllato i parametri del laser medicale secondo le istruzioni del chirurgo. Il chirurgo, utilizzando

robot, pinze e laser da remoto, era l'unico responsabile durante l'esecuzione dell'intervento chirurgico. [12]

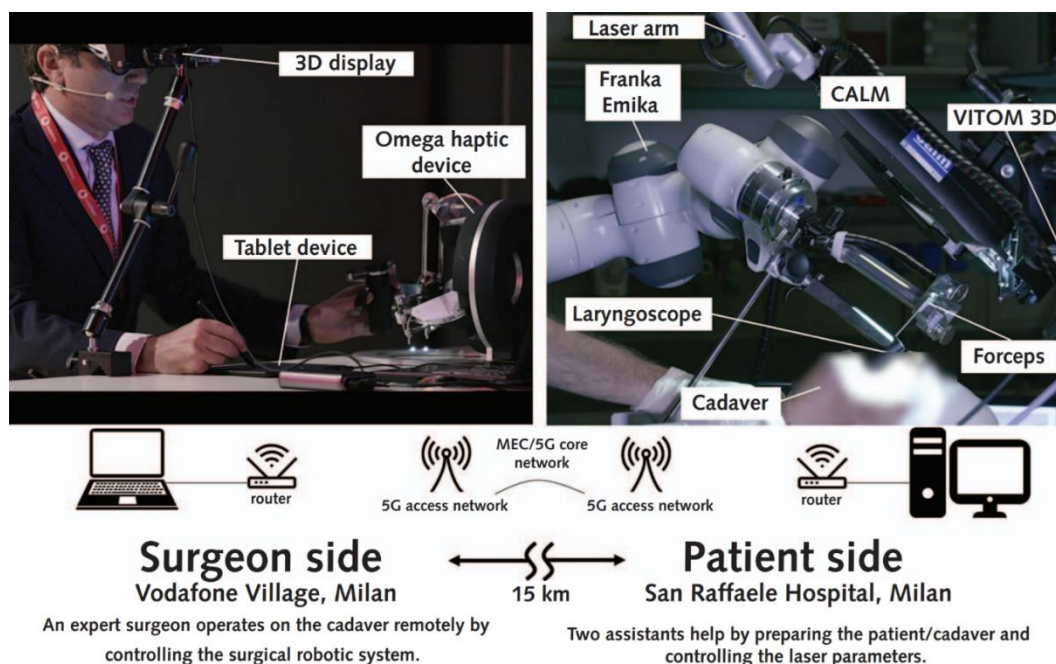


Fig. 4.1: telechirurgia tramite utilizzo di rete 5G. Sulla sinistra viene mostrata la postazione *lato chirurgo*, mentre sulla destra la postazione *lato paziente* [12]

4.1.1 Rete 5G sperimentale - trasmissione di dati bidirezionale

Con il sistema di rete di quinta generazione ci si pone l'obiettivo di migliorare drasticamente la connettività wireless a banda larga esistente. Questo potrà essere reso possibile in quanto la rete 5G fornirà maggiore velocità, minore latenza, connettività massiccia a vari dispositivi e larghezza di banda maggiore: tutto ciò consentirà quindi una copertura di rete più ampia.

La rete 5G sfrutta l'evoluzione del 4G con l'aggiunta di una nuova tecnologia radio, con un'architettura basata sui servizi e l'infrastruttura del cloud. [15][16]

La rete 5G può avere capacità di elaborazione Multi-Edge (*Multi-Edge Computing, MEC*). Il Multi-Access Edge Computing (*MEC*) sposta

l'elaborazione del traffico e dei servizi da un cloud centralizzato all'estremità della rete e più vicino al cliente. Invece di inviare tutti i dati ad un cloud per l'elaborazione, il perimetro della rete analizza, elabora ed archivia i dati. La raccolta e l'elaborazione dei dati effettuata più vicino al cliente riduce la latenza e consente prestazioni in tempo reale alle applicazioni funzionanti su larghezza di banda elevata. [25] [26]

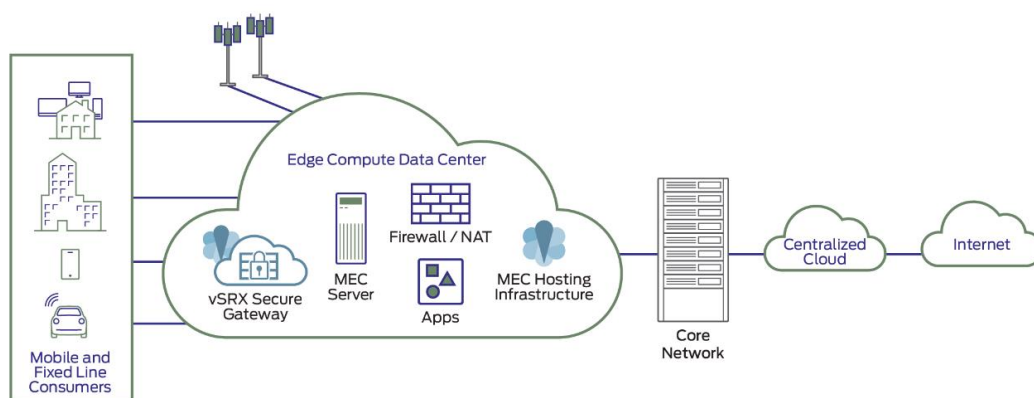


Fig. 4.1.1: configurazione Multi-Access Edge Computing [26]

Per fornire l'efficienza spettrale richiesta, una tecnologia chiave che potrebbe supportare il sistema 5G è uno schema di trasmissione basato sulla trasmissione multi-punto cooperativa CoMP (Cooperative Multi Point Transmission) combinata con la moltiplicazione a divisione di frequenza ortogonale OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, *che consiste nella suddivisione di un canale di comunicazione in più sotto-canali, ciascuno che lavora ad una determinata frequenza* [18]).

Ciò, tuttavia, richiede un'allocazione ottimale delle risorse in un sistema CoMP-OFDM, che si è dimostrato essere un problema estremamente complesso. [16]

4.1.2 Sistema CALM (computer assisted laser microsurgery) - microchirurgia laser assistita da computer

Con l'introduzione della procedura di microchirurgia laser transorale (TLM) nel campo della laringologia chirurgica, le funzioni chirurgiche chiave di controllo (manipolazione laser) e di percezione (visualizzazione del sito) si sono affidate all'efficace coordinamento di un micromanipolatore manuale per muovere il laser chirurgico a fascio libero (il laser CO₂ medicale è la varietà prevalentemente utilizzata) in un'area di circa 20x20 mm², della visualizzazione tramite microscopio operatorio e dell'attivazione del laser tramite pedale. I limiti della configurazione strumentale tradizionale per quanto attiene alla controllabilità e all'ergonomia sono noti in letteratura [34] [35], auspicando l'introduzione di approcci chirurgici assistiti da computer per svolgere interventi di microchirurgia laser transorale.

I sistemi chirurgici assistiti da computer svolgono un ruolo chiave negli interventi chirurgici di successo odierni. I vantaggi conseguiti nell'utilizzo di questi sistemi includono, ad esempio, una maggiore precisione da parte dei chirurghi, un tremore ridotto nella manipolazione degli strumenti ed una semplice interfaccia chirurgica. [28]

I laser costituiscono uno strumento sempre più comune che permette il trattamento di precisione di condizioni patologiche su organi umani delicati e vitali. Nel laboratorio di robotica biomedica dell'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) sono stati sviluppati nuovi sistemi robotici in grado di consentire un'erogazione ed un controllo accurati del laser, in modo da aiutare i chirurghi a raggiungere livelli di precisione ed efficienza senza precedenti. Un esempio significativo è il sistema chirurgico CALM (computer assisted laser microsurgery - microchirurgia laser assistita da computer).

CALM ridefinisce la configurazione della microchirurgia laser attraverso robotica ed interfacce di controllo laser intuitive, apportando capacità chirurgiche avanzate e livelli di controllabilità, precisione e sicurezza senza precedenti. [27]

Il sistema CALM rappresenta un innovativo sistema computerizzato che garantisce una maggiore usabilità, intuitività, efficienza e controllabilità durante interventi di microchirurgia laser transorale. Migliora l'ergonomia e la precisione rispetto allo stato

dell'arte attuale, incrementando potenzialmente la sicurezza e la qualità chirurgica.

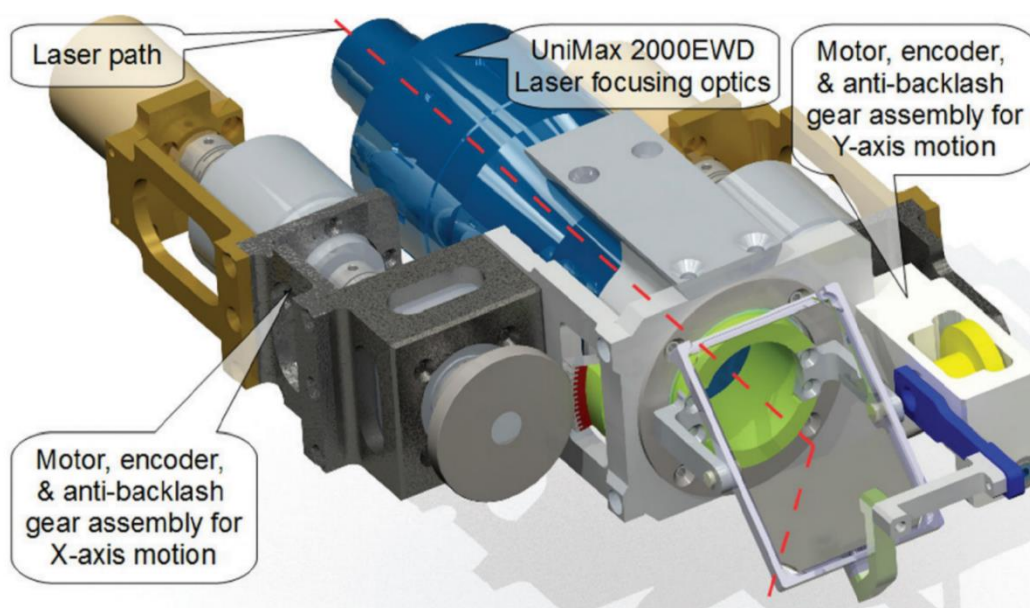


Fig. 4.1.2 a: micromanipolatore laser motorizzato [28]

Il sistema CALM dispone dei seguenti componenti.

1. *Micromanipolatore laser motorizzato MLM:* include un meccanismo di orientamento sferico che utilizza ingranaggi anti-ripercussione ed encoder (è un trasduttore di posizione, ossia un apparato elettromeccanico che converte la posizione lineare o angolare del suo asse rotante in un segnale elettrico digitale [37]) ad alta risoluzione. Il meccanismo aziona la divisione del fascio stesso in due dimensioni planari ed è compatibile con i microscopi ed i sistemi laser commerciali. Utilizza ottiche di messa a fuoco laser riflettenti che permettono l'allineamento del fascio dei sistemi laser commerciali; utilizza inoltre un laser con diametro del fascio minore di 0.15 mm [36]. Il micromanipolatore laser motorizzato fornisce un posizionamento altamente accurato (35 μm), un'area di lavoro programmabile (fino a 40x40 mm² ad una distanza di 400 mm) e una velocità di scansione definibile dall'utente (fino a 0.1 m/s). [28]

2. *Tablet touch con stilo (tavoletta grafica - descrizione al successivo paragrafo 4.1.4):* consente di controllare il dispositivo

MLM attraverso una scheda controller dedicata ed un algoritmo di controllo avanzato. Tramite lo stilo si controlla la direzione del laser chirurgico in tempo reale attraverso il suo movimento sulla superficie del tablet, sostituendo in questo modo il joystick manuale.

3. Per completare la configurazione, l'intero sistema è connesso sia ad un microscopio chirurgico utilizzato per la visualizzazione del sito chirurgico, che al sistema di ottica riflettente sfruttato per la messa a fuoco del fascio laser, nonché ad un laser medicale (a CO₂ - *paragrafo 4.1.3*) attivato dall'interruttore a pedale ed utilizzato per l'ablazione.

Il sistema CALM presenta una caratteristica innovativa che consiste in scansioni programmabili del raggio laser, denominata "*modalità di anteprima*". In questa modalità, il chirurgo può programmare lunghi percorsi di incisione personalizzati di forme desiderate da eseguire durante l'intervento utilizzando lo stilo stesso, ottenendo resezioni uniformi nel sito chirurgico. Il MLM esegue questi percorsi automaticamente ad una velocità definibile dall'utente. Questo offre al chirurgo un'anteprima del taglio previsto attraverso il movimento del laser visibile. Il laser può quindi essere attivato come desidera il chirurgo tramite l'interruttore a pedale. [28]

Il sistema CALM si presta per essere utilizzato nella TLM, per permettere resezioni accurate nel sito chirurgico. Il design tiene conto dei vincoli della configurazione chirurgica e dei requisiti di spazio meccanico in TLM.

CALM è stato sviluppato e ampiamente testato attraverso la collaborazione con vari chirurghi. È stato anche convalidato attraverso uno studio con 57 chirurghi otorinolaringoiatri esperti durante l'ELS 2016 (l'incontro annuale della Società Laringologica Europea), che hanno eseguito test chirurgici reali su una laringe di suino *ex-vivo* in uno scenario di microchirurgia laser transorale simulato. [27] [28]

La valutazione soggettiva dei 57 chirurghi internazionali ha dimostrato la preferenza per il sistema CALM in TLM rispetto al sistema tradizionale a joystick, soprattutto per quanto riguarda la facilità d'uso e di apprendimento, la sicurezza, la riduzione dello

sforzo mentale e la sua adeguatezza per l'esecuzione di resezioni uniformi, accurate e lunghe. È importante tenere conto dei limiti del sistema e del feedback dei chirurghi, in modo tale da migliorare ulteriormente l'utilità del sistema CALM in microchirurgia laser transorale. [28]

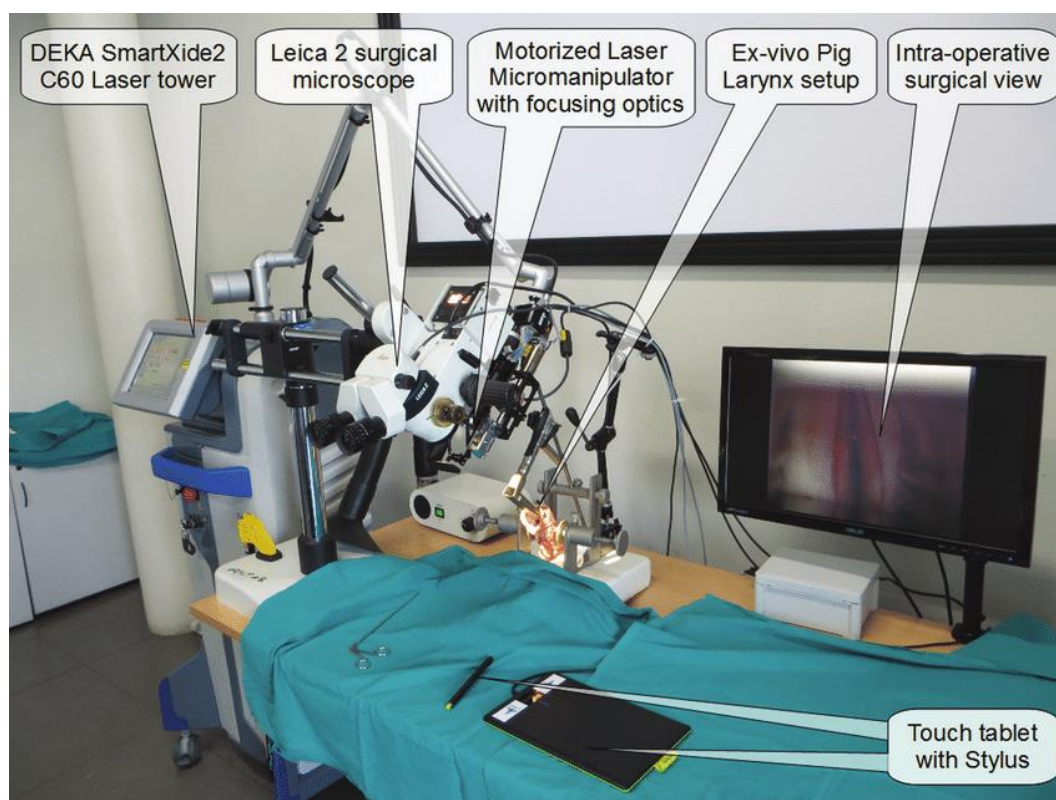


Fig. 4.1.2 b: configurazione generale sistema CALM, con i vari elementi che lo compongono (qui viene mostrata anche la laringe di suino utilizzata nel test effettuato nel 2016) [31]

Il prototipo CALM è stato convalidato attraverso prove preliminari comparative, che dimostrano che l'accuratezza del posizionamento del laser migliora del 60% rispetto al sistema manuale tradizionale. CALM fornisce un meccanismo ed un'interfaccia intuitivi per una migliore precisione chirurgica e migliori risultati chirurgici. [29]

In sintesi, il sistema CALM è un complesso robotico medico per teleoperazioni di TLM, basato su un concetto chiamato "*bisturi virtuale*", che consente di eseguire gli interventi chirurgici in modo sicuro e preciso utilizzando una penna grafica direttamente su un

video in diretta dal sito chirurgico, invece del tradizionale joystick manuale del micromanipolatore, rendendo il puntamento laser più intuitivo e coerente. Il sistema è comodo e offre un utilizzo migliore della destrezza manuale dei chirurghi. Aumenta le loro abilità manuali attraverso il ridimensionamento e l'ingrandimento dei loro gesti, migliorando così la sicurezza delle procedure chirurgiche.

Come sopra detto, il sistema offre l'esecuzione automatica di scansioni programmabili intraoperatorie (*modalità anteprima*) combinate con la funzione di scansione ad alta velocità. Oltre a questo può potenzialmente ridurre notevolmente la quantità di pratica necessaria per ottenere competenze in TLM. [28] [30]

4.1.3 Laser CO₂ medicale SmartXide2 C60 [DEKA]

Un sistema chirurgico laser consiste fondamentalmente in un laser, cioè una fonte di radiazione visibile intensa o radiazione infrarossa che può essere focalizzata su punti di dimensioni submillimetriche, unito ad un sistema che convoglia questa radiazione, ad un manipolo e ad un attacco per microscopio o endoscopio.

Tra i vari sistemi attualmente utilizzati nella pratica medica, il laser ad anidride carbonica ha dimostrato essere il "*bisturi laser*" più efficiente grazie al suo fascio di radiazione infrarossa di lunghezza d'onda di 10.6 µm, che, a differenza delle lunghezze d'onda della radiazione visibile, è altamente assorbita in acqua. [20]

Progettato per la prima volta nel 1964 da Kumar Patel e sperimentato sull'uomo nel 1972, ha subito nel corso del tempo importanti evoluzioni, anche in termini di modalità di emissione (continua, pulsata, super-pulsata e ultra-pulsata) della radiazione infrarossa. [19] [24]

I vantaggi principali nell'utilizzo di questo tipo di laser sono i seguenti:

- Chirurgia senza contatto, in campo asciutto (senza eccessive perdite di sangue) ed altamente sterile;
- Microchirurgia ampiamente localizzata e precisa;

- Campo visivo chiaro, che consente un facile accesso anche in spazi ristretti;
- Guarigione rapida, con gonfiore e cicatrici minimi rispetto ad altri tipi di laser chirurgici;
- Apparente riduzione del dolore post-operatorio;
- Nessuna interferenza elettromagnetica sulla strumentazione di monitoraggio.

Il meccanismo d'azione può essere così riassunto: la radiazione infrarossa di 10.6 μm di lunghezza d'onda ha come cromoforo principale l'acqua, sia del compartimento intracellulare che del compartimento extracellulare (*per cromoforo si intende qualsiasi gruppo funzionale, legame chimico o sistema di legami che per la sua struttura elettronica assorbe una specifica lunghezza d'onda di radiazione [22] [23]*). Quando il fascio infrarosso focalizzato di questo laser incide sui tessuti viventi (costituiti da una percentuale di acqua del 75% - 90%), l'effetto che ne risulta è quello di una rimozione altamente localizzata di tessuto mediante un processo di vaporizzazione. [19] [20]

Il selettivo assorbimento dell'energia della radiazione da parte del cromoforo genera una importante quantità di calore, che è in grado di determinare la distruzione del tessuto che lo contiene. Trattandosi di acqua, in questo caso, il surriscaldamento indotto porta l'acqua stessa ad ebollizione con passaggio dallo stato liquido a quello gassoso e conseguente esplosione delle cellule legata alla produzione di vapore al loro interno. I detriti cellulari che si producono in parte vengono carbonizzati, in parte invece, raggiungendo temperature superiori ai 1000°C, passano allo stato volatile con formazione di fumi. [19]

La zona di tessuto interessata a vaporizzazione si trova ad essere circondata da un sottile strato di tessuto coagulato a caldo, in cui i vasi sanguigni più piccoli di 1 mm risultano sigillati, il che comporta un campo di operazione asciutto. Quanto detto conferma il fatto che questa procedura implica una perdita minima di sangue.

Durante la chirurgia laser sia la posizione del fascio infrarosso che il tessuto sottoposto ad intervento chirurgico sono sotto il continuo

controllo visivo del chirurgo. Il progresso dell'incisione dei tessuti è continuamente monitorato.

Piccoli volumi di tessuto sono rimossi con un singolo impulso o impulsi di esposizione multipli, mentre le incisioni più grandi vengono eseguite tramite progressive scansioni del fascio in modalità continua. [20]

L'utilizzo del laser ad anidride carbonica ha notevolmente migliorato le performance della microchirurgia rendendo gli interventi assolutamente meno invasivi. Oggi il laser ad anidride carbonica è universalmente riconosciuto come il Gold Standard in molte applicazioni di otorinolaringoiatria (come cordectomie e rimozione di polipi alle corde vocali).

L'azienda DEKA, leader mondiale nello sviluppo di sistemi laser avanzati, ha sintetizzato nell'eccellenza tecnologica SmartXide2 il risultato di un'esperienza trentennale.

L'interazione sinergica di SmartXide2 fornisce prestazioni senza precedenti:

- La sorgente laser CO₂ a RF (radiofrequenza) con tecnologia PSD (Pulse Shape Design);
- Il sistema di scansione ad elevata precisione (HiScan Surgical);
- Il micromanipolatore con esclusiva tecnologia Hybrid.

"Il laser CO₂ DEKA, con tecnologia di scansione progressiva, rende più semplice e più sicuro l'intervento su tessuti delicati come le corde vocali. È uno strumento meraviglioso per le procedure di ricostruzione selettiva delle vie aeree, con una serie di vantaggi significativi che vanno dal controllo della profondità di ablazione, al ridotto danno termico, sino ad una minore dipendenza dai movimenti non sempre precisi della mano del chirurgo." - Dr. Gullielmo Campos.

L'innovativa sorgente laser CO₂ a RF di DEKA, dotata di esclusiva tecnologia PSD, consente di generare impulsi espressamente dedicati all'applicazione chirurgica e di utilizzare il laser in totale sinergia con il sistema di scansione HiScan Surgical.

Lo sviluppo della sorgente CO₂ a RF ha permesso a DEKA di creare un sistema laser CO₂ versatile nelle alte emissioni e capace di generare

impulsi ottimali per applicazioni multidisciplinari con particolare riguardo alla chirurgia ORL (otorinolaringoiatria). Le caratteristiche speciali di questa nuova sorgente e del suo sistema di alimentazione consentono di creare impulsi laser con una struttura, durata e potenza di picco variabili, una caratteristica estremamente innovativa nei sistemi laser CO₂.



Fig. 4.1.3: laser chirurgico SmartXide2 [DEKA] [21]

L'impulso ideale per la microchirurgia laser ORL deve avere una grandissima energia per impulso in una durata ridotta, in modo da minimizzare l'effetto termico sul tessuto, per una eccellente ablazione senza carbonizzazione.

L'interfaccia grafica di SmartXide2 è stata sviluppata con l'intento di rendere semplice e chiaro il controllo di tutte le funzioni disponibili. Il grande schermo *lcd touch screen* a colori consente una facile selezione dei parametri operativi.

Il database integrato consente la rapida selezione delle impostazioni ottimali per l'esecuzione dell'intervento chirurgico, riducendo notevolmente i tempi di apprendimento del sistema. [17]

4.1.4 Wacom tablet - per il controllo della posizione del laser

La cosiddetta tavoletta grafica (e relativa penna grafica) è lo strumento più adatto per interagire con ciò che si visualizza a video. Per questo è utilizzata in tutti quegli ambiti in cui l'estro e le capacità dell'utente necessitano di un riscontro preciso sul progetto finale, con il minor tempo di reazione possibile: questo è esattamente quanto serve al chirurgo che opera a distanza. Tramite l'utilizzo di questa tecnologia risulta possibile controllare in tempo reale la direzione del laser chirurgico, attraverso il movimento dello stilo sulla superficie del tablet.



Fig. 4.1.4: Wacom tablet con penna grafica [32]

La superficie della tavoletta grafica, su cui si può far scorrere un apposito stilo, è attiva ed è quindi in grado di distinguere una determinata curvatura, una precisa inclinazione del tratto o una variazione di intensità in base alla pressione esercitata dallo stilo. [32] [33]

Benché sul mercato esistano diverse aziende produttrici (con diverse fasce di prezzo, funzionalità e software dedicati), fin dall'inizio il brand giapponese Wacom si è distinto come leader di mercato ed è sempre riuscito a mantenere i propri prodotti ad un livello eccellente e assolutamente sopra la media.

4.1.5 Robot Panda [Franka Emika] - per manipolare le pinze chirurgiche robotiche

Il dispositivo Panda, dell'azienda tedesca Franka Emika, è un robot con un braccio meccanico intelligente.

A realizzare questo versatile braccio meccanico è stato il prof. Sami Haddadin nel 2017, che già in passato aveva sperimentato un dispositivo simile. La particolarità di questo scienziato è quella di prestare attenzione soprattutto alla sicurezza. I suoi robot, infatti, sono pensati per lavorare al fianco delle persone ed è proprio partendo da questo concetto che ha sviluppato tale dispositivo intelligente.

Il robot Panda è sicuro e, come detto, è stato progettato soprattutto per lavorare in sinergia con gli uomini. Grazie ad alcuni speciali sensori, è in grado di percepire l'ostacolo e quando necessario arrestare il suo movimento meccanico. Alla base del sistema di sicurezza di Franka Emika c'è un software che controlla tutti i movimenti del robot e misura lo sforzo delle sue sette articolazioni. Se il programma si accorge che lo sforzo impiegato dal braccio è anomalo rispetto ai normali parametri, Panda si ferma immediatamente. [41]

Quando detto è di fondamentale importanza nel caso oggetto di analisi, in quanto il robot Panda guida le pinze chirurgiche durante l'intervento. È assolutamente necessario che i movimenti che esegue

siano sicuri e precisi, e che in caso di imprevisto possa arrestarsi prontamente.



Fig. 4.1.5: robot Panda [Franka Emika] [38]

In linea generale la soluzione Panda di Franka Emika si adatta perfettamente a varie applicazioni comuni e può essere alla base della costruzione di sistemi di automazione più complessi, in grado di abbinare al robot altre tecnologie e di implementarsi con queste. Per le sue caratteristiche costruttive e funzionali il robot Panda consente all'utente di usufruire di un flusso di lavoro più semplice e veloce. Le applicazioni progettate per il robot, oltre ai software dedicati allo stesso, possono includere la complessità del sistema nel quale il robot opera e permettere lo sviluppo di azioni come afferrare, collegare, inserire e torcere. Utilizzando *Desk*, l'interfaccia di Franka Emika basata su browser, le applicazioni possono essere progettate per eseguire intere funzioni in pochissimo tempo. Queste attività possono essere adattate, riutilizzate o implementate rapidamente su più robot per ridurre notevolmente i costi di configurazione. Le singole applicazioni e attività possono essere parametrizzate mostrando i posizionamenti che deve assumere Panda tramite dimostrazione o aggiungendo nella programmazione parametri rilevanti come velocità, durata, forza e azioni di attivazione.

La modalità con cui sono sviluppate le configurazioni di programmazione consente di implementare nuove applicazioni con interfacce utente personalizzate e ampie funzionalità specifiche. Inoltre, i servizi possono essere creati per integrarsi perfettamente con gli aggiornamenti e gli ampliamenti dei sistemi software e hardware. Applicazioni e servizi possono quindi essere distribuiti attraverso la piattaforma *Franka World* per raggiungere buona parte della collettività dei clienti, migliorando e accelerando la distribuzione delle varie soluzioni. [39]

Franka World è una piattaforma online (cloud) che collega i clienti, i partner, gli sviluppatori e i robot di Franka Emika. Portando i robot Panda nel cloud, tutti gli utenti del servizio possono trarre vantaggio dall'interazione reciproca e ottenere un accesso integrato ai prodotti ed ai servizi forniti da Franka Emika e dalla rete dei suoi partner qualificati.

Franka World fornisce ai clienti la gestione centralizzata e remota delle loro flotte di robot Franka Emika e la possibilità di accedere al catalogo online delle nuove estensioni software e hardware accreditate, continuamente in evoluzione. Franka World riunisce anche una comunità di professionisti che forniscono servizi integrati e di supporto. [40]

I dati tecnici caratteristici principali del robot Panda possono essere riassunti come segue.

- Gradi di libertà: 7
- Massimo raggio di azione: 855 mm
- Interfacce del braccio motorizzato: ethernet (TCP/IP) per programmazione visiva intuitiva da *Desk*, ingresso per dispositivo di abilitazione esterno, ingresso per dispositivo di attivazione o protezione esterno, connettore di controllo, connettore per l'attuatore finale;
- Interfacce del sistema di controllo: ethernet (TCP/IP) per connessione all'internet, connettore di alimentazione, connettore per il braccio motorizzato;
- Limiti di velocità cartesiani: fino a 2 m/s (attuatore finale);
- Ripetibilità del posizionamento: inferiore a ± 0.1 mm (basandosi su ISO 9283);

- Deviazione dal percorso programmato: inferiore a ± 1.25 mm (basandosi su ISO 9283, con valori riferiti ad un ambiente di lavoro di $0.4 \times 0.4 \times 0.4$ m, con l'asse Z orientato parallelamente alla gravità terrestre e il gomito posizionato verso l'alto);
- Forza (in N, basandosi su ISO 9283 alle condizioni precedentemente citate): asse X $-125 \div 95$ nominale $-150 \div 115$ di punta, asse Y $-100 \div 100$ nominale $-275 \div 275$ di punta, asse Z $-50 \div 150$ nominale $-115 \div 155$ di punta;
- Coppia (in N/m, basandosi su ISO 9283 alle condizioni precedentemente citate): asse X $-10 \div 10$ nominale $-70 \div 70$ di punta, asse Y $-10 \div 10$ nominale $-16 \div 12$ di punta, asse Z $-10 \div 10$ nominale $-12 \div 12$ di punta;
- Tempo di rilevamento delle collisioni: < 2 ms;
- Tempo nominale di reazione all'urto: < 50 ms;
- Tempo di reazione all'urto nel caso peggiore: < 100 ms;
- Rigidità traslazionale regolabile: $0 \div 3000$ N/m;
- Rigidità rotazionale regolabile: $0 \div 300$ Nm/rad;
- Segnali monitorati: posizione, velocità e coppia del giunto articolare; posizione, velocità e forza cartesiana. [44]

4.1.6 Esoscopio stereo 3D VITOM [Karl Storz]

Gli esoscopi (ES) sono dispositivi ottici caratterizzati da una piccola fotocamera orientabile che trasmette immagini ad alta definizione, sono dotati di un sottile braccio meccanico di supporto montato su una base portatile e offrono una visione telescopica del campo operatorio.

La principale differenza rispetto al microscopio operatorio classico (OM) è che questi dispositivi ottici funzionano a distanza sia dal chirurgo che dal paziente, offrendo una visione micro-telescopica in grado di esaltare anche il più piccolo elemento anatomico su un grande schermo, piuttosto che negli oculari del microscopio operatorio.

Alcuni studi hanno rivelato che gli esoscopi portano un valore aggiunto dal punto di vista tecnico e didattico rispetto ai microscopi

operatori tradizionali. [49] In particolare, gli operatori hanno la possibilità di orientare facilmente gli esoscopi all'interno del campo operatorio tramite il meccanismo di riposizionamento, pur restandone lontani. Questo implica che gli operatori non sono costretti a guardare negli oculari. [47]

Il dispositivo VITOM 3D dell'azienda tedesca KARL STORZ (Video Telescope Operating Monitor - monitor operativo del video telescopio) è un esoscopio che coniuga la visualizzazione con risoluzione 4K e la tecnologia tridimensionale. Presenta molti vantaggi per quanto riguarda ergonomia, versatilità e profondità di campo rispetto ai microscopi operatori tradizionali, fattori importanti che contribuiscono al raggiungimento di buoni risultati durante lo svolgimento di interventi chirurgici. [48]

L'eccellente qualità delle immagini dei sistemi di imaging dell'azienda KARL STORZ si può impiegare non solo in combinazione con gli endoscopi, ma anche con i microscopi operatori e con i colposcopi. In tal modo l'immagine, altrimenti accessibile solo al chirurgo, può essere visualizzata tramite monitor anche dagli assistenti, dal personale di sala e dagli eventuali studenti presenti.

Il modello VITOM 3D è un sistema che consente una visualizzazione tridimensionale del campo operatorio durante interventi endoscopici, microchirurgici e a cielo aperto con accesso mini-invasivo in molte discipline mediche.

Il sistema VITOM 3D viene fissato tramite un braccio auto-statico ad una distanza di 25-75 cm sul sito operatorio. Consente una visione di alta qualità dell'intervento chirurgico, permette di lavorare in modo ergonomico, di svolgere attività formative e di pratica e di documentare le operazioni. Le possibilità di applicazione sono analoghe a quelle di un microscopio operatorio.

Le principali caratteristiche di VITOM 3D sono rappresentate dai punti seguenti:

- Più piccolo, più leggero e compatto rispetto ad un microscopio operatorio tradizionale, risulta più flessibile nelle operazioni microchirurgiche;

- Lavora in sinergia con l'endoscopia grazie all'integrazione nella colonna endoscopica, in questo modo è possibile unire in un unico sistema i vantaggi dell'endoscopia e della microscopia;
- Sistema ergonomico in quanto l'operatore non è legato all'oculare;
- Migliora il processo operativo, l'intera équipe chirurgica è coinvolta e può seguire l'intervento con la stessa qualità di immagini del chirurgo. [45]

Il comando delle principali funzioni viene effettuato tramite il dispositivo *IMAGE 1 PILOT*, posizionato nelle immediate vicinanze del chirurgo. *IMAGE 1 PILOT* costituisce l'unità di controllo per l'azionamento del sistema VITOM 3D. In sintesi si tratta di un joystick con la possibilità di selezionare la sezione dell'immagine a cui si è interessati, di ingrandire l'immagine (zoom), di gestire la messa a fuoco ed è inoltre dotato di quattro pulsanti programmabili.

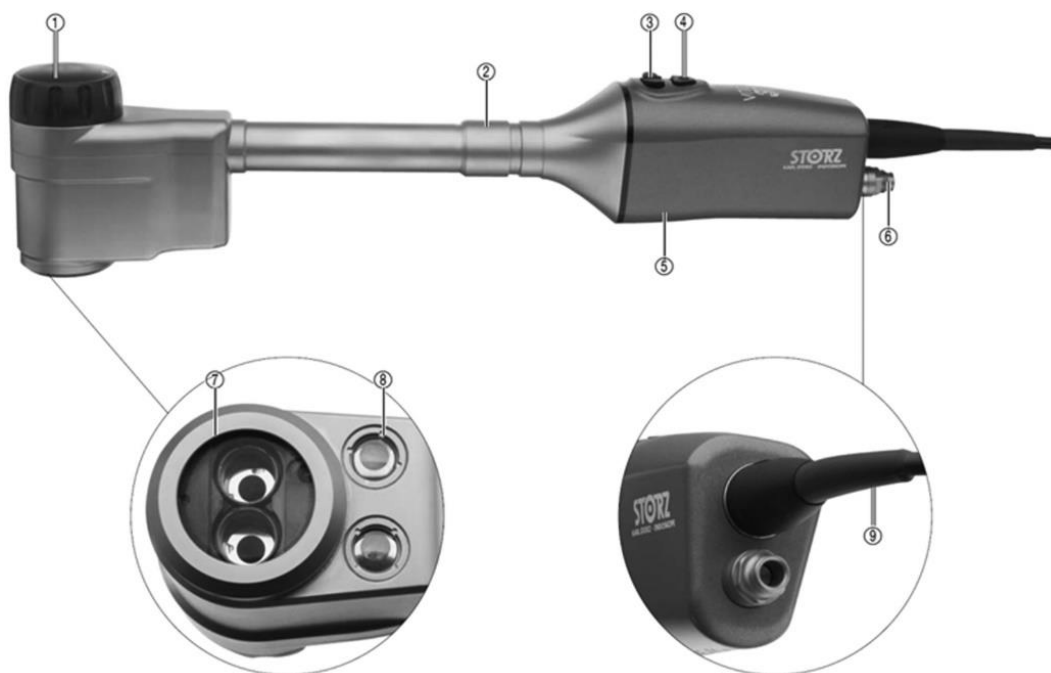


Fig. 4.1.6: VITOM 3D [KARL STORZ] con indicati alcuni degli elementi più significativi [50]

Il design compatto del sistema VITOM 3D è rappresentato da quanto segue (vedi Fig. 4.1.6):

- Elementi di illuminazione (8);
- Sensori 4K integrati (7);
- Pulsanti programmabili sulla testa della telecamera (3-4);
- Manopola per l'allineamento orizzontale (1).

I sistemi di supporto per consentire l'operatività di VITOM 3D sono rappresentati dai dispositivi in seguito elencati: "VERSACRANE" (è un tipo di braccio meccanico auto-equilibrato, sviluppato per essere impiegato con il dispositivo VITOM, che consente il posizionamento ergonomico, semplice e preciso del sistema per l'applicazione in molte discipline mediche), "ARTip base" (si tratta di un braccio meccanico per il posizionamento, dotato di grande stabilità e con alimentazione a batteria) e "ARTip cruise" (anch'esso è un braccio meccanico, però motorizzato e dotato di grande precisione). Con riferimento alla Fig. 4.1.6 i collegamenti e le connessioni al dispositivo VITOM 3D avvengono nei punti 2-6-9.

Questo sistema si presenta come adatto ad operazioni di neurochirurgia, otorinolaringologia, chirurgia plastica e ricostruttiva, chirurgia cardiovascolare, urologia e pediatria. [45]

Un'esatta percezione della profondità all'interno del corpo umano è un fattore essenziale per ogni intervento chirurgico endoscopico. Il sistema VITOM 3D dell'azienda KARL STORZ consente all'operatore un'eccellente profondità di campo ed una straordinaria combinazione tra i movimenti della mano e le percezioni visive. Questo sistema stereoscopico di alto livello risulta particolarmente adatto durante azioni che richiedono un notevole grado di percezione spaziale, come sutura e annodamento. Garantisce inoltre una grande precisione di posizionamento e contribuisce di conseguenza ad aumentare la sicurezza del paziente che si trova in sala operatoria. [46]

Nel caso oggetto d'analisi, il sistema VITOM 3D è stato posizionato dal lato paziente ed ha consentito una registrazione delle immagini del sito operatorio che sono state trasmesse in tempo reale al chirurgo che si trovava distante 15 km. [12]

4.1.7 Dispositivo tattile Omega.7 [Force Dimension] - per il controllo del robot e delle pinze chirurgiche

Concepito e prodotto in Svizzera dall'azienda Force Dimension, il dispositivo tattile Omega.7 è così chiamato perché ha la caratteristica di avere 7 gradi di libertà attivi:

- 3 traslazioni attive;
- 3 rotazioni passive;
- 1 presa attiva.



Fig. 4.1.7: dispositivo tattile Omega.7 [Force Dimension] [51]

Con la sua esclusiva estensione di presa attiva, il modello Omega.7 è un dispositivo tattile particolarmente versatile, adatto per le tele-operazioni a due mani. Il suo effettore è in grado di coprire l'intero raggio di movimento naturale della mano umana ed è compatibile con il design della console di teleoperazione bi-manuale.

Il dispositivo consente agli utilizzatori di aggiornare gli effettori finali a seconda dell'applicazione in cui lo stesso è utilizzato. [51]

La combinazione tra il sistema di compensazione della gravità e la calibrazione senza deriva (*moto trasversale dovuto ad inerzia che crea instabilità nel posizionamento*) contribuisce ad apportare un maggiore comfort per l'utente e una migliore precisione. L'Omega.7 è progettato per applicazioni impegnative in cui le prestazioni e l'affidabilità sono fondamentali, infatti è stato utilizzato dal chirurgo nell'intervento a distanza oggetto di studio ed ha consentito di controllare il movimento del robot e delle pinze chirurgiche.

Il dispositivo tattile Omega.7 fornisce all'operatore informazioni (sensazioni) di ritorno sulla forza esercitata con percezione delle stesse di tipo tridimensionale, oltre a fornire il rilevamento della rotazione e consentire una presa attiva. Queste sue potenzialità permettono un'ampia gamma di applicazioni:

- Console di teleoperazioni, come nel caso oggetto d'analisi;
- Robotica medica e spaziale;
- Micro e nano manipolatori;
- Simulazioni virtuali;
- Sistemi di addestramento ed esercitazione;
- Ricerca. [52]

Le principali caratteristiche di questo particolare dispositivo tattile possono essere riassunte come segue.

- Spazio di lavoro: traslazione \emptyset 160x110 mm, rotazione 240x140x180°, presa 25 mm;
- Forza: traslazione 12.0 N, presa 8.0 N in entrambe le direzioni;
- Risoluzione: traslazione <0.01 mm, rotazione 0.09°, presa 0.006 mm;
- Rigidità: circuito chiuso 14.5 N/mm;
- Interfacce: USB 2.0 standard, frequenza di aggiornamento fino a 8 KHz;
- Potenza: 110 V - 240 V;
- Struttura: cinematica parallela (*nella quale tutti gli assi possono essere azionati con le identiche proprietà dinamiche, quindi con riduzione della massa da muovere*), rotazioni centrate sulla mano, rotazioni disaccoppiate dalle traslazioni, compensazione della gravità attiva;
- Calibrazione: automatica e senza deriva;

- Input dell'utente: 1 pulsante tattile programmabile;
- Sicurezza: monitoraggio della velocità, smorzamento elettromagnetico;
- Opzioni: azionamento con mano destra o con mano sinistra. [52]

4.1.8 Display tridimensionale HMZ-T3 [Sony] - per la visualizzazione del sito chirurgico remoto

Il visore HMZ-T3 è la terza generazione di dispositivi HMD (*Head Mounted Display - dispositivo di visualizzazione, indossato sulla testa o come parte di un casco*) con capacità 3D dell'azienda Sony.

Il visore HMZ-T3 permette di combinare l'ascolto dei suoni in ambiente con la visione attraverso due piccoli display OLED, uno per ciascun occhio, con risoluzione di 1280x720, in grado di offrire la medesima percezione che si avrebbe con una dimensione dell'immagine virtuale di 750 pollici ad una distanza di 20 m, con un campo visivo di 45°. [43]



Fig. 4.1.8: display 3D HMZ-T3 [Sony] [42]

Il dispositivo HMD Sony HMZ-T3 rispetto alla precedente generazione è più leggero e dispone della possibilità di connessione wireless,

oltre che di una batteria sostituibile. La caratteristica maggiormente rilevante è sicuramente il supporto della tecnologia Wireless-HD, che consente lo streaming del video senza cavi al dispositivo HMD praticamente senza alcun ritardo di tempo (naturalmente questo può essere reso possibile solo se anche l'hardware che si ha a disposizione è in grado di supportare la tecnologia Wireless-HD).

Come detto, il dispositivo può funzionare sia con alimentazione via cavo che tramite batteria, in dotazione assieme al dispositivo HMZ-T3. La batteria è in grado di fornire fino a 3 ore di autonomia per una connessione wireless completa o fino a 7 ore di autonomia quando si utilizza la connessione via cavo HDMI per il video. [42] Spesso si preferisce utilizzare l'opzione wireless completa, come accade durante lo svolgimento di interventi chirurgici a distanza nei quali è necessario visualizzare ciò che avviene nel sito chirurgico remoto. Nel caso oggetto d'analisi questo è stato reso possibile grazie all'interazione con il sistema di imaging VITOM 3D (paragrafo 4.1.6).

Le principali specifiche del dispositivo Sony HMZ-T3 sono riassunte di seguito.

- Display del dispositivo: 2 pannelli OLED (con risoluzione 1280×720);
- Dimensione dell'immagine virtuale: 750 pollici a 20 m di distanza;
- 3D ready: predisposto;
- Ampiezza del campo visivo: 45°;
- Risposta in frequenza delle cuffie: da 4 a 27000 Hz;
- Sensibilità delle cuffie: 106 dB/mW;
- Ingressi e uscite HDMI/MHL: processore 3 ingressi (HDMI) e 1 uscita passante (HDMI) - batteria 1 ingresso (MHL/HDMI);
- Dispositivo HMD 1 uscita (HDMI);
- Durata della batteria (con batteria al litio incorporata): 3 ore (con connessione wireless), 7 ore (con connessione HDMI), 3 ore (con connessione MHL). [42]

4.2 Considerazioni

In due precedenti esperienze con il tele-mentoring 5G, si è dimostrato come un chirurgo esperto possa guidare un intervento chirurgico a distanza, dando istruzioni al chirurgo locale situato al lato del paziente. In entrambe le operazioni, una eseguita a Barcellona e l'altra a Shanghai, l'equipe chirurgica si trovava in sala operatoria mentre il chirurgo mentore lavorava da una distanza di 4 e 6.1 km rispettivamente. Entrambe le squadre chirurgiche erano dotate di computer portatili per inviare e ricevere segnali tramite rete 5G in tempo reale. L'immagine del paziente era catturata da una telecamera laparoscopica collegata ad un convertitore di immagini con interfaccia digitale seriale, che inviava il segnale al laptop del tele-chirurgo. I chirurghi locali indossavano auricolari Bluetooth per comunicare con il chirurgo tutor, che ha ricevuto sia suoni che immagini dalla sala operatoria ed è stato in grado di inviare istruzioni vocali e disegni sull'immagine, che sono stati ricevuti dall'equipe in tempo reale. [13]

Ora è stata presentata un'esperienza di telechirurgia 5G, che ha dimostrato che il chirurgo da remoto può operare direttamente sul paziente utilizzando un sistema robotico chirurgico e appropriate interfacce di teleoperazione.

Questa competenza chirurgica, in particolare in aree altamente specializzate come la microchirurgia in cui le competenze non sono ampiamente disponibili, può essere sfruttata e condivisa in modo più efficace utilizzando i nuovi standard di telecomunicazione.

Questo esperimento di telechirurgia 5G ha dimostrato che il chirurgo ha potuto mantenere un controllo efficace del robot chirurgico, delle pinze e del laser ed ha potuto eseguire con sicurezza ed elevata precisione la cordectomia laser sulle corde vocali del cadavere. Questo è stato possibile grazie alla telepresenza di alta qualità fornita dai robot e dalle interfacce, che hanno permesso al chirurgo di manipolare le corde vocali del cadavere come se fosse in sala operatoria operando direttamente sul paziente.

Le misurazioni hanno mostrato un tempo medio di andata e ritorno di circa 40 millisecondi tra 2 dispositivi entrambi collegati alla rete di accesso 5G.

Con l'utilizzo della rete 5G la latenza media unidirezionale per la trasmissione dell'intero video tridimensionale ad alta definizione è stata di 102 ± 9 millisecondi, con un ritardo massimo inferiore a 140 millisecondi. Un tempo di latenza di andata e ritorno massimo di circa 280 millisecondi non ha provocato il deterioramento delle prestazioni della teleoperazione.

Inoltre, la teleconferenza con webcam e microfono ha rappresentato un efficace canale di comunicazione bidirezionale, che ha consentito un'interazione efficiente tra chirurgo e assistenti.

Questo esperimento ha dimostrato che un sistema di telechirurgia robotica è in grado di sfruttare efficacemente le capacità avanzate delle reti 5G, per fornire enormi quantità di dati con latenza estremamente bassa e larghezza di banda elevata (fino a 1 Gb/s) in modo bidirezionale, tra la sala operatoria e il chirurgo che opera a distanza. Questo risulta quindi essere un punto critico per il futuro della telechirurgia, che dovrà essere ulteriormente sviluppato.

Inoltre, poiché sia il chirurgo che il robot hanno lavorato sulla rete mobile, i risultati conseguiti hanno dimostrato, ad esempio, la fattibilità della realizzazione di tali interventi anche negli ospedali da campo in comunità remote o scenari disastrosi. [12]

4.3 Limitazioni della telechirurgia tramite rete 5G

La rete 5G è ancora in via di sviluppo e necessita ancora di consolidamento. Si stima che serviranno ancora circa 2 anni per passare dagli interventi sui cadaveri a quelli sui pazienti vivi. Un secondo di intervento nel test di Milano ha richiesto la trasmissione di 1 Gigabit, mentre la rete attualmente disponibile, nel migliore dei casi, è 10 volte più lenta.

Come già discusso, un ulteriore limite della chirurgia a distanza riguarda la parte legale. Bisogna ad esempio decidere di chi sia la responsabilità in caso di contenziosi e quale quadro legislativo e normativo applicare nel caso in cui chi opera si trovi in un Paese diverso rispetto a quello in cui è situato il paziente.

È probabile che nei primi tempi della sua applicazione la telechirurgia venga usata per consulenze nei paesi meno ricchi di competenze chirurgiche. In ogni caso, è opportuno che sia sempre presente un medico accanto al malato, che possa intervenire in caso di disconnessioni della rete di trasmissione dati. Alla luce di quanto sopra risulta evidente come non sia così banale la divisione dei compiti tra i vari attori e la conseguente definizione delle responsabilità. [1]

4.4 Prospettive della telechirurgia tramite rete 5G

Attualmente i robot chirurgici stanno diventando sempre più comuni ed accettati nelle sale operatorie e la nuova generazione di reti mobili (5G) sta rapidamente diventando una realtà, portando una trasmissione di dati ultraveloce, stabile e affidabile.

Ciò potrebbe influire sull'assistenza sanitaria di centinaia di milioni di pazienti; l'impatto economico stimato entro il 2035 è fino a 3.5 trilioni di dollari e potrebbe coinvolgere fino a 22 milioni di posti di lavoro.

La tecnologia e la medicina si stanno evolvendo rapidamente, con l'intelligenza artificiale e l'assistenza robotica. Si ritiene che le telecomunicazioni 5G siano destinate a svolgere un ruolo fondamentale nel consentire non solo la telechirurgia robotica, ma anche la teleassistenza ed il tele-mentoring. [12]

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

La chirurgia a distanza assistita da robot sembra essere realizzabile e sicura in un futuro prossimo. La teletrasmissione di manipolazioni chirurgiche attive ha il potenziale per poter garantire la disponibilità di competenze chirurgiche in località remote, per operazioni difficili o rare e consentirà di migliorare la formazione chirurgica in tutto il Mondo.

Le operazioni chirurgiche a distanza richiedono una trasmissione rapida ed accurata delle informazioni. I fattori che influenzano in modo significativo la rapidità e l'accuratezza del trasferimento di queste informazioni sono il tempo necessario per convertire le immagini video e i gesti del chirurgo in segnali elettronici, la larghezza di banda e il ritardo delle linee di telecomunicazione esistenti. [6]

Per il funzionamento delle tecnologie utilizzate in telechirurgia è quindi necessaria una connettività avanzata, come quella fornita dalla rete 5G, che garantisce tempi di risposta immediati, maggiore velocità e capacità per il trasferimento dei dati ed estrema affidabilità.

Secondo lo studio "*From Healthcare to Homecare*" dell'Ericsson ConsumerLab, lo sviluppo dell'assistenza sanitaria da remoto, l'aumento del numero dei dati sanitari dei pazienti e l'incremento dell'uso dei dispositivi indossabili e dei trattamenti sanitari remoti renderanno il 5G essenziale per la fornitura di servizi affidabili e sicuri. [62]

Poiché la telechirurgia può coinvolgere più di uno Stato o Paese, potrebbero sorgere conflitti di giurisdizione, sia per la ricerca di cause in caso di incidenti, che per l'attribuzione di meriti in caso di successi. Dovrebbero essere affrontate alcune questioni legali, ad esempio se il chirurgo debba o meno essere responsabile per errori dovuti a ritardi nella trasmissione o a guasti alle apparecchiature, oppure se debba essere identificata una persona responsabile del

processo. Probabilmente, sarebbe bene che la comunità della telemedicina istituisse un comitato internazionale ad hoc per affrontare queste ed altre questioni legali, per fornire regole chiare e valide a livello internazionale per regolare la pratica della telechirurgia. [6]

Non è ancora arrivato quindi il momento in cui un chirurgo possa operare mentre si trova in viaggio, magari dall'altra parte del mondo. La telemedicina è un'innovazione che deve essere perfezionata e soprattutto solleva dubbi e problemi su diversi aspetti. Oltre alle varie criticità sopra citate, è bene considerare che occorre anche una persona in sala operatoria che prepari il paziente e non può essere altri che un secondo chirurgo. [63]

Come precedentemente evidenziato, i vantaggi che seguiranno lo sviluppo della chirurgia assistita da robot a distanza sono molteplici.

I vincoli geografici non determineranno più il tipo di trattamento che il paziente riceve a causa della mancanza di esperienza chirurgica. Idealmente, qualsiasi paziente potrà ricevere la forma di trattamento più appropriata e più vantaggiosa per la propria condizione, come ad esempio nuove tecniche minimamente invasive. Quanto detto potrebbe avere un impatto ancora più profondo sui Paesi in via di sviluppo, dove l'assistenza sanitaria è spesso fornita da volontari che non hanno necessariamente esperienza in tutti i campi della medicina e della chirurgia.

Inoltre, le operazioni di emergenza nei piccoli ospedali rurali sono talvolta impegnative per i giovani chirurghi in servizio "di guardia". La disponibilità di una rete che colleghi l'ospedale locale ad un importante centro medico consentirà a chirurghi esperti di assistere all'intervento o di eseguire l'intera procedura. La disponibilità di chirurghi esperti sarà d'aiuto in aree remote dove si stanno svolgendo missioni militari o scientifiche, soprattutto in caso di operazioni di emergenza.

Oltre a tutti questi potenziali vantaggi per il paziente, l'intervento attivo da postazioni remote aprirà nuove strade per la formazione e l'istruzione chirurgica. L'obiettivo dell'esecuzione di procedure a

distanza non è infatti quello di sostituire i chirurghi: si potrà migliorare la chirurgia attraverso l'insegnamento e il tutoraggio, che consentiranno di ridurre la curva di apprendimento dei chirurghi per nuove procedure e di conseguenza si ridurranno gli errori causati da mancanza di esperienza. Saranno possibili vari gradi di interazione tra l'esperto e il chirurgo al letto del paziente: l'assistenza di un esperto potrà variare dall'esecuzione completa della procedura, al solo aiuto con l'esposizione delle strutture anatomiche per facilitare il lavoro dei chirurghi al letto del paziente.

Tuttavia, è bene ricordare che prima che la chirurgia tele-robotica diventi comune è necessario mettere in atto precauzioni, controlli e standard rigorosi.

Il professor Trimarchi, esecutore dell'intervento a distanza effettuato a Milano nel 2019, ha brevemente riassunto come si presenta la situazione attuale: *"Da un punto di vista teorico è possibile realizzare un intervento a distanza, ma da quello pratico serve ancora una normativa chiara, preceduta da una discussione etica, per capire come gestire l'intera procedura. Al momento questa tecnologia può essere utilizzata per fare tele-mentoring a distanza, magari collegandosi con Paesi del Terzo Mondo per assistere i loro chirurghi nelle parti più complesse di un'operazione"*. [12]

La tele-performance di un'operazione chirurgica richiede inoltre che il chirurgo esperto abbia familiarità con i dispositivi robotici. La semplice esperienza in una particolare procedura o malattia non è sufficiente per fornire un supporto attivo. Certo, fino a quando non saranno disponibili abbastanza chirurghi specificamente formati in chirurgia robotica e prestazioni a distanza, la telechirurgia non sarà probabilmente in grado di ridurre gli errori ed i relativi costi su larga scala, non abbastanza almeno per diventare conveniente. [6]

Per concludere, in un futuro prossimo si auspica che la possibilità di eseguire manipolazioni complesse da postazioni remote consentirà ad un chirurgo esperto di insegnare o sorvegliare l'esecuzione di una tecnica avanzata o nuova mediante intervento in tempo reale. Di fatto si elimineranno i vincoli geografici e questo permetterà di ottenere elevate competenze chirurgiche laddove ciò sia richiesto. [6]

Bibliografia e sitografia

- [1] «Il primo intervento a distanza: il "paziente" lontano 15 km | Rep».
https://rep.repubblica.it/pwa/generale/2020/07/14/news/il_primo_intervento_a_distanza_il_paziente_lontano_15_km-261857830/ (consultato set. 09, 2020).
- [2] Cai Meng, Tianmiao Wang, Wusheng Chou, Sheng Luan, Yuru Zhang, e Zengmin Tian, «Remote surgery case: robot-assisted teleneurosurgery», in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, apr. 2004, vol. 1, pagg. 819-823 Vol.1, doi: 10.1109/ROBOT.2004.1307250.
- [3] P. J. Choi, R. J. Oskouian, e R. S. Tubbs, «Telesurgery: Past, Present, and Future», *Cureus*, vol. 10, n. 5, doi: 10.7759/cureus.2716.
- [4] «5G e chirurgia: un intervento lungo 3000 km», *IngegneriaBiomedica.org*, giu. 15, 2019.
<https://www.ingegneriabiomedica.org/news/terapia/5g-e-chirurgia-un-intervento-lungo-3000-km/> (consultato set. 09, 2020).
- [5] «Il primo intervento chirurgico remoto», *Le Scienze*.
https://www.lescienze.it/news/2001/09/21/news/il_primo_intervento_chirurgico_remoto-590690/ (consultato set. 09, 2020).
- [6] J. Marescaux et al., «Transcontinental Robot-Assisted Remote Telesurgery: Feasibility and Potential Applications», *Ann. Surg.*, vol. 235, n. 4, pagg. 487-492, apr. 2002.
- [7] «telechirurgia in "Dizionario di Medicina"».
[http://www.treccani.it/enciclopedia/telechirurgia_\(Dizionario-di-Medicina\)](http://www.treccani.it/enciclopedia/telechirurgia_(Dizionario-di-Medicina)) (consultato set. 09, 2020).
- [8] «Figure 2. Surgeon seated at ZEUS console and using voice and hand...», *ResearchGate*.
<https://www.researchgate.net/figure/Surgeon-seated-at-ZEUS->

console-and-using-voice-and-hand-controls_fig2_5912753
(consultato set. 09, 2020).

- [9] S. Xu, M. Perez, K. Yang, C. Perrenot, J. Felblinger, e J. Hubert, «Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator», *Surg. Endosc.*, vol. 28, n. 9, pagg. 2569-2576, set. 2014, doi: 10.1007/s00464-014-3504-z.
- [10] F. H. Moll, A. T. Roth, P. F. Costa, e W. A. Holmes, «Trocar», US4654030A, mar. 31, 1987.
- [11] J. Marescaux e F. Rubino, «The ZEUS robotic system: experimental and clinical applications», *Surg. Clin. North Am.*, vol. 83, n. 6, pagg. 1305-1315, dic. 2003, doi: 10.1016/S0039-6109(03)00169-5.
- [12] A. Acemoglu et al., «Operating From a Distance: Robotic Vocal Cord 5G Telesurgery on a Cadaver», *Annals of Internal Medicine*, American College of Physicians, lug. 14, 2020.
- [13] A. M. Lacy et al., «5G-assisted telementored surgery», *BJS Br. J. Surg.*, vol. 106, n. 12, pagg. 1576-1579, 2019, doi: 10.1002/bjs.11364.
- [14] *Vodafone 5G - Remote Surgery*. 2019.
- [15] S. Zhang, Y. Wang, e W. Zhou, «Towards secure 5G networks: A Survey», *Comput. Netw.*, vol. 162, pag. 106871, ott. 2019, doi: 10.1016/j.comnet.2019.106871.
- [16] A. Zubow, A. Rostami, e S. Bayhan, «On practical cooperative multi point transmission for 5G networks», *Comput. Netw.*, vol. 171, pag. 107105, apr. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107105.
- [17] «getDAdoc.pdf». Consultato: set. 09, 2020. [In linea]. Available at: <https://www.dekalaser.com/IT/getDAdoc.ashx?man=3972>.
- [18] «Multiplexing del canale», *Elettronicadoc*. <http://elettronicadoc.altervista.org/time-division-multiplexing.html> (consultato set. 09, 2020).

- [19] «articolo_laser.pdf». Consultato: set. 09, 2020. [In linea]. Available at: http://www.umbertogiaroli.it/articolo_laser.pdf.
- [20] I. Kaplan e S. Giler, *CO2 Laser Surgery*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [21] «SmartXide² WH - Surgical laser by Deka | MedicalExpo». <https://www.medicalexpo.com/prod/deka/product-71176-898133.html> (consultato set. 09, 2020).
- [22] «Cromoforo». <https://www.chimica-online.it/download/cromoforo.htm> (consultato set. 09, 2020).
- [23] «5UV%20VIS.pdf». Consultato: set. 09, 2020. [In linea]. Available at: https://www.fe.infn.it/u/spizzo/met_fis/uv-visibile/5UV%2520VIS.pdf.
- [24] «www.orl.it - IL LASER IN OTORINOLARINGOIATRIA». https://www.orl.it/archivio%20old/laser/laser_info.htm (consultato set. 09, 2020).
- [25] T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, e D. Sabella, «On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration», *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 19, n. 3, pagg. 1657-1681, thirdquarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2705720.
- [26] «What is multi-access edge computing?», *Juniper Networks*. <https://www.juniper.net/uk/en/products-services/what-is/multi-access-edge-computing/> (consultato set. 09, 2020).
- [27] «CALM», *Advanced Robotics*. <http://advr.iit.it/index.php/calm> (consultato set. 09, 2020).
- [28] N. Deshpande *et al.*, «Design and Study of a Next-Generation Computer-Assisted System for Transoral Laser Microsurgery», *OTO Open*, vol. 2, n. 2, pag. 2473974X18773327, apr. 2018, doi: 10.1177/2473974X18773327.
- [29] A. Acemoglu, N. Deshpande, J. Lee, D. G. Caldwell, e L. S. Mattos, «The CALM System: New Generation Computer-Assisted Laser Microsurgery», in *2019 19th International Conference on*

- Advanced Robotics (ICAR)*, Belo Horizonte, Brazil, dic. 2019, pagg. 641-646, doi: 10.1109/ICAR46387.2019.8981585.
- [30] L. S. Mattos, G. Dagnino, G. Becattini, M. Dellepiane, e D. G. Caldwell, «A virtual scalpel system for computer-assisted laser microsurgery», in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, set. 2011, pagg. 1359-1365, doi: 10.1109/IROS.2011.6094574.
- [31] «Figure 2. Computer-assisted laser microsurgery concept: The touch...», *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/figure/Computer-assisted-laser-microsurgery-concept-The-touch-tablet-controls-the-aiming-of-the_fig2_325076023 (consultato set. 09, 2020).
- [32] «Blog - TAVOLETTA GRAFICA, A COSA SERVE E COME SCEGLIERLA». https://www.espresso.it/blog/tavoletta_grafica/ (consultato set. 09, 2020).
- [33] «Tavoletta Grafica: cos'è, perché utilizzarla e quale scegliere», *Foto Come Fare*, mag. 02, 2011.
<https://fotocomefare.com/tavoletta-grafica-bamboo-wacom/> (consultato set. 09, 2020).
- [34] M. Remacle, F. Hassan, D. Cohen, G. Lawson, e M. Delos, «New computer-guided scanner for improving CO2 laser-assisted microincision», *Eur. Arch. Oto-Rhino-Laryngol. Head Neck*, vol. 262, n. 2, pagg. 113-119, feb. 2005, doi: 10.1007/s00405-004-0746-8.
- [35] M. Remacle, G. Lawson, M.-C. Nolleveaux, e M. Delos, «Current State of Scanning Micromanipulator Applications with the Carbon Dioxide Laser», *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.*, vol. 117, n. 4, pagg. 239-244, apr. 2008, doi: 10.1177/000348940811700401.
- [36] C. A. Solares e M. Strome, «Transoral Robot-Assisted CO2 Laser Supraglottic Laryngectomy: Experimental and Clinical Data», *The Laryngoscope*, vol. 117, n. 5, pagg. 817-820, 2007, doi: 10.1097/MLG.0b013e31803330b7.

- [37] «encoder».
https://itisravenna.edu.it/corso/labsitel/provelab/caratt_motc/c/encoder.htm (consultato set. 09, 2020).
- [38] <https://www.franka.de/capability/> (Consultato set. 09, 2020).
- [39] «Working-with-Panda-EN.pdf». Consultato: set. 09, 2020. [In linea]. Available at: <https://s3-eu-central-1.amazonaws.com/franka-de-uploads/uploads/Working-with-Panda-EN.pdf>.
- [40] «Franka-World-EN.pdf». Consultato: set. 09, 2020. [In linea]. Available at: <https://s3-eu-central-1.amazonaws.com/franka-de-uploads/uploads/Franka-World-EN.pdf>.
- [41] «Franka Emika, il robot collegato al cloud capace di clonarsi | Libero Tecnologia». <https://tecnologia.libero.it/franka-emika-il-robot-che-si-clona-4916> (consultato set. 09, 2020).
- [42] «The New Sony HMZ-T3W Head Mounted Display - More of the Same». <https://3dvision-blog.com/9076-the-new-sony-hmz-t3w-head-mounted-display-more-of-the-same/> (consultato set. 09, 2020).
- [43] L. P. September 04 e 2013, «Hands on: Sony HMZ-T3W Head Mounted Display review: Hands-on», *T3*.
<https://www.t3.com/reviews/sony-hmz-t3w-review> (consultato set. 09, 2020).
- [44] «Franka-World-EN.pdf». Consultato: set. 09, 2020. [In linea]. Available at: <https://s3-eu-central-1.amazonaws.com/franka-de-uploads/uploads/Franka-World-EN.pdf>.
- [45] «Microscopia | KARL STORZ Endoskope | Italia».
<https://www.karlstorz.com/it/it/microscopy.htm> (consultato set. 09, 2020).
- [46] «TELEPRESENCE SISTEMI DI IMMAGINI DOCUMENTAZIONE ILLUMINAZIONE CARRELLI MOBILI - PDF Download gratuito».
<https://docplayer.it/112690357-Telepresence-sistemi-di-immagini-documentazione-illuminazione-carrelli-mobili.html> (consultato set. 09, 2020).

- [47] L. Ricciardi, P. P. Mattogno, A. Olivi, e C. L. Sturiale, «Exoscope Era: Next Technical and Educational Step in Microneurosurgery», *World Neurosurg.*, vol. 128, pagg. 371-373, ago. 2019, doi: 10.1016/j.wneu.2019.05.162.
- [48] Z. Rossini, A. Cardia, D. Milani, G. B. Lasio, M. Fornari, e V. D'Angelo, «VITOM 3D: Preliminary Experience in Cranial Surgery», *World Neurosurg.*, vol. 107, pagg. 663-668, nov. 2017, doi: 10.1016/j.wneu.2017.08.083.
- [49] A. De Virgilio et al., «High definition three-dimensional exoscope (VITOM 3D) for microsurgery training: a preliminary experience», *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.*, vol. 277, n. 9, pagg. 2589-2595, set. 2020, doi: 10.1007/s00405-020-06014-7.
- [50] S. Siller, C. Zoellner, M. Fuetsch, R. Trabold, J.-C. Tonn, e S. Zausinger, «A high-definition 3D exoscope as an alternative to the operating microscope in spinal microsurgery», *J. Neurosurg. Spine*, vol. 1, n. aop, pagg. 1-10, lug. 2020, doi: 10.3171/2020.4.SPINE20374.
- [51] «Force-Dimension omega.7 | 7 active degrees-of-freedom Haptic device». https://www.spectratech.gr/en/product/51042/Force-Dimension_omega.7?path=00 (consultato set. 09, 2020).
- [52] «specs-sheet-omega.7.pdf». Consultato: set. 09, 2020. [In linea]. Available at: https://est-kl.com/images/PDF/Force_Dimension/specs-sheet-omega.7.pdf.
- [53] «Determining the Threshold of Time-Delay for Teleoperation Accuracy and Efficiency in Relation to Telesurgery | Telemedicine and e-Health». <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/tmj.2013.0367> (consultato set. 09, 2020).
- [54] M. Stark, S. Pomati, A. D'Ambrosio, F. Giraudi, e S. Gidaro, «A new telesurgical platform - preliminary clinical results», *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.*, vol. 24, n. 1, pagg. 31-36, gen. 2015, doi: 10.3109/13645706.2014.1003945.
- [55] M. Stark, T. Benhidjeb, S. Gidaro, e E. R. Morales, «The future of telesurgery: a universal system with haptic

- sensation», *J. Turk. Ger. Gynecol. Assoc.*, vol. 13, n. 1, pagg. 74-76, mar. 2012, doi: 10.5152/jtgga.2012.05.
- [56] «Telesurgery is promising but still need proof through prospective comparative studies», *J. Gynecol. Oncol.*, vol. 23, n. 2, pagg. 134-135, apr. 2012, doi: 10.3802/jgo.2012.23.2.134.
- [57] N. Raison, M. S. Khan, e B. Challacombe, «Telemedicine in Surgery: What are the Opportunities and Hurdles to Realising the Potential?», *Curr. Urol. Rep.*, vol. 16, n. 7, pag. 43, mag. 2015, doi: 10.1007/s11934-015-0522-x.
- [58] M. B. Shenai, R. S. Tubbs, B. L. Guthrie, e A. A. Cohen-Gadol, «Virtual interactive presence for real-time, long-distance surgical collaboration during complex microsurgical procedures: Technical note», *J. Neurosurg.*, vol. 121, n. 2, pagg. 277-284, ago. 2014, doi: 10.3171/2014.4.JNS131805.
- [59] R. Wirz et al., «An Experimental Feasibility Study on Robotic Endonasal Telesurgery», *Neurosurgery*, vol. 76, n. 4, pagg. 479-484, apr. 2015, doi: 10.1227/NEU.0000000000000623.
- [60] S. Xu, M. Perez, K. Yang, C. Perrenot, J. Felblinger, e J. Hubert, «Effect of latency training on surgical performance in simulated robotic telesurgery procedures», *Int. J. Med. Robot.*, vol. 11, n. 3, pagg. 290-295, 2015, doi: 10.1002/rcs.1623.
- [61] «ROBOTICA MEDICA E SOCIETA in "XXI Secolo"». http://www.treccani.it/enciclopedia/robotica-medica-e-societa_%28XXI-Secolo%29/ (consultato set. 09, 2020).
- [62] «IIT ed Ericsson, 5G e robotica per la Sanità del futuro | Tom's Hardware». <https://www.tomshw.it/altro/iit-ed-ericsson-5g-e-robotica-per-la-sanita-del-futuro/> (consultato set. 09, 2020).
- [63] «Intervento a distanza, chirurgo e "paziente" lontani 15 chilometri: è la prima volta in Europa», *Ohga!* <https://www.ohga.it/intervento-a-distanza-chirurgo-e-paziente->

lontani-15-chilometri-e-la-prima-volta-in-europa/ (consultato
set. 09, 2020).

Ringraziamenti

La prima persona che desidererei ringraziare è il professor Cristiano Cuppini, relatore di questa tesi di laurea, che mi ha guidata e supportata negli ultimi mesi durante l'elaborazione e la stesura di questo lavoro.

Ringrazio l'ingegnere Leonardo Mattos, responsabile del laboratorio di robotica biomedica all'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) a Genova, per le informazioni che mi ha fornito in merito al recente intervento effettuato a Milano.

Un ringraziamento particolare va ai miei genitori, che mi hanno sempre sostenuta fin dall'inizio di questo percorso e non hanno mai smesso di aver fiducia in me. Grazie per essermi stati vicini, per avermi aiutata nei momenti di sconforto e per aver gioito con me per ogni piccola soddisfazione.

A tutti i miei amici e amiche dico un enorme grazie, per avermi accompagnata, supportata e anche sopportata in questi anni di studio. Grazie per esserci e per esserci stati, non mi avete mai fatta sentire sola. Vi ringrazio per aver creduto in me più di quanto non abbia fatto io, è anche grazie a voi se sono riuscita a raggiungere questo traguardo.

E infine vorrei ringraziare me stessa, per essere stata abbastanza forte e determinata da non mollare, per aver resistito nonostante non sempre le cose siano andate come mi aspettavo.

Vorrei dedicare queste ultime righe a tutti coloro che in un modo o nell'altro mi hanno accompagnata e sono stati presenti in questi tre anni, senza di voi non sarebbe stata la stessa cosa.

Ringrazio la mia famiglia, per essermi sempre stati accanto e per non avermi mai fatto mancare il sostegno e l'aiuto di cui avevo bisogno. Siete sempre al mio fianco, con i vostri consigli e la vostra capacità di ascoltarmi mi avete aiutata a crescere e a maturare fino a diventare la persona che sono oggi. Grazie mamma e grazie papi, senza di voi non so se ce l'avrei fatta.

Voglio ringraziare le mie super amiche, Megghi e Leti. Anche se abbiamo legato solo nell'ultimo anno mi siete state accanto e mi avete capita come se ci conoscessimo da una vita. Vi ringrazio per aver creduto in me e soprattutto per avermi supportata nei periodi più difficili.

Alla mia complice Vero dico grazie per aver condiviso con me alti e bassi di questi bellissimi anni, per essere sempre dalla mia parte, per avermi trasmesso il coraggio e la determinazione di affrontare certe sfide.

Ringrazio immensamente la mia compagna di viaggio, Luci. Mi hai sempre spronata a dare il massimo, a non accontentarmi, mi hai sostenuta e motivata anche quando mi sembrava di non avere speranze. Ti ringrazio per avermi accompagnata in questi tre anni di soddisfazioni e delusioni, perché ci siamo confrontate e siamo cresciute assieme. Ti ringrazio per essere al mio fianco, nonostante tutto.

Alla mia piccola Ali dico un enorme grazie, per essere ancora qui dopo tanti anni di amicizia, dopo alti e bassi. Sei una delle persone che mi conosce e mi capisce meglio, mi hai sostenuta nei momenti più cupi e continui tutt'ora a sostenermi. Ti ringrazio per la fiducia che riponi in me e la forza che mi trasmetti. Tu sai.

Ringrazio Lollo, che dopo otto anni non si è ancora stancato di me.
Ringrazio Clara, che nonostante sia lontana è sempre presente, ogni giorno. Ringrazio Irene ed Enia, Serena e Giulia, Cecilia e Sofia, e tutti gli amici che ci sono e ci sono stati.

Infine vorrei ringraziare anche voi, Giacomo ed Ele, perché mi avete guidata fin da quando ero piccola, mi avete insegnato a non mollare e a perseverare per raggiungere gli obiettivi, è anche grazie a voi se sono così determinata ed ho potuto raggiungere questo grande traguardo.

Vi ringrazio tutti infinitamente,
siete una parte di me.