



Massimo Robiony
Alessandro Tel
Elisabetta Ocello
Lorenzo Marini
Luca Michelutti

Quando la tecnologia incontra l'umano

La chirurgia
tra realtà e ricerca

 FORUM



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**

HIC SUNT FUTURA



**DI TOPPO
WASSERMANN
SUPERIORE
UNIVERSITARIA**
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE



**FONDAZIONE
FRIULI**



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA

IO SONO
FRIULI
VENEZIA
GIULIA

Collega—menti

Festival che incrocia i saperi

Quaderno 05

stampa

Poligrafiche San Marco, Cormons (Go)

© **FORUM 2025**

Editrice Universitaria Udinese

FARE srl con unico socio

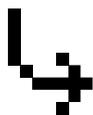
Via Palladio, 8 - 33100 Udine

Tel. 0432 26001

www.forumeditrice.it

ISBN 978-88-3283-553-3 (print)

ISBN 978-88-3283-554-0 (pdf)



Quando la tecnologia incontra l'umano

La chirurgia
tra realtà e ricerca

Massimo Robiony
Alessandro Tel
Elisabetta Ocello
Lorenzo Marini
Luca Michelutti

In apertura
Quando la tecnologia incontra
l'umano

Quando la tecnologia incontra l'umano : la chirurgia tra realtà e ricerca / Massimo Robiony, Alessandro Tel, Elisabetta Ocello, Lorenzo Marini, Luca Michelutti. - Udine : Forum, 2025.

(Collega-menti : festival che incrocia i saperi ; 5)
ISBN 978-88-3283-553-3 (brossura). - ISBN 978-88-3283-554-0 (pdf)

1. Chirurgia maxillofacciale - Impiego [dell'] Intelligenza artificiale [e della] Robotica
I. Robiony, Massimo II. Tel, Alessandro III. Ocello, Elisabetta IV. Marini, Lorenzo V. Michelutti, Luca

617.52059 (WebDewey 2025) - MEDICINA REGIONALE.
FACCIA. Chirurgia

Scheda catalografica a cura del Sistema bibliotecario dell'Università degli studi di Udine

Indice

- 7 Tecnoumanizzazione e centralità del paziente nell'era della chirurgia digitale
- 11 Il futuro comincia in anticipo: Virtual Surgical Planning (VSP)
- 23 La terza dimensione della chirurgia: la stampa 3D nel volto umano
- 39 La chirurgia incontro l'intelligenza delle macchine: l'uso dell'AI
- 57 Realtà aumentata: quando la chirurgia incontra il digitale
- 63 Bibliografia

Tecnoumanizzazione e centralità del paziente nell'era della chirurgia digitale



Quando parliamo di innovazione in chirurgia maxillo-facciale – e in medicina più in generale – è facile lasciarsi affascinare dalla potenza dei nuovi strumenti: l'intelligenza artificiale, la realtà aumentata, la stampa 3D, il bioprinting, la chirurgia robotica. Tecnologie che sembrano uscite da un romanzo di fantascienza ma che, oggi, fanno parte del nostro quotidiano clinico. Eppure, proprio in mezzo a questa straordinaria trasformazione tecnologica, si sente il bisogno di fermarsi e porre una domanda fondamentale: per chi stiamo innovando?

La risposta non è mai cambiata. Innoviamo per le persone. Per i nostri pazienti. Per garantire cure più efficaci, più sicure, più personalizzate. Ma anche, e forse soprattutto, più umane.

Nel mondo chirurgico, dove il gesto tecnico ha sempre avuto un ruolo centrale, il rischio più grande che stiamo correndo non è l'errore medico, ma l'errore di visione: quello di pensare che l'evoluzione tecnologica sia sufficiente da sola a garantire una medicina migliore. Non lo è. La macchina non può sostituire la relazione. Il software non può surrogare l'empatia. Un algoritmo può aiutare a diagnosticare una frattura o a pianificare un'osteotomia complessa, ma non potrà mai leggere negli occhi del paziente quella paura

silenziosa che precede l'intervento, né capire che dietro una richiesta 'funzionale' si nasconde un bisogno profondo di riconoscimento sociale, di identità, di riscatto personale.

Ecco perché, in questo libro, la chiave di lettura deve essere il concetto di **tecnoumanizzazione**. Un termine che può sembrare strano, quasi ambiguo, ma rappresenta la vera chiave del futuro della nostra disciplina. Tecnoumanizzazione significa riconciliare la dimensione tecnologica e quella relazionale della medicina. Non scegliere tra l'una e l'altra, ma integrarle. Far sì che ogni innovazione diventi un ponte per avvicinarsi al paziente, non un muro che ci separa.

La tecnologia di per sé non disumanizza la medicina. La disumanizza l'uso distratto, freddo, autoreferenziale. Ma se la impieghiamo per spiegare meglio un intervento, per mostrare a un paziente cosa succederà al suo volto, per condividere con lui un progetto ricostruttivo o estetico, allora quella tecnologia diventa uno strumento di comunicazione. Uno strumento di cura. E, sì, anche uno strumento di fiducia.

Ripensando ai primi casi in cui abbiamo utilizzato i modelli 3D stampati per discutere un intervento chirurgico con il paziente, è stato come assistere a un vero spartiacque: c'era un prima e un dopo. Prima eravamo noi a parlare, e il paziente ad ascoltare. Dopo, c'era un dialogo. Un confronto. Il paziente poneva domande più profonde, più mirate. Non si limitava ad 'accettare' l'intervento: lo comprendeva. Ne diventava parte attiva. Da qui il concetto di tecnoumanizzazione come un percorso concreto, non teorico. Un percorso che parte dalla tecnologia ma arriva dritto alla relazione terapeutica.

E tutto questo per realizzare un modello innovativo per la nostra salute, che nasce dalla fusione delle innovazioni tecnologiche e dell'umanizzazione delle cure, ossia la **medicina delle 5P**. Una medicina che è:

- Personalizzata, perché ogni volto è unico e ogni paziente ha una propria storia, un proprio vissuto, una propria aspettativa.

- Predittiva, perché oggi possiamo simulare gli esiti chirurgici prima ancora di entrare in sala, minimizzando gli imprevisti e migliorando i risultati.
- Preventiva, perché molti dei nostri interventi – dalle disfunzioni temporo-mandibolari ai deficit respiratori – possono essere gestiti prima che degenerino in quadri clinici più gravi.
- Partecipativa, perché vogliamo pazienti informati, consapevoli, coinvolti. Non spettatori, ma protagonisti.
- Precisa, per offrire trattamenti mirati, basati su dati molecolari, radiologici e clinici ad alta risoluzione. In chirurgia maxillo-facciale, questo significa operare con massima accuratezza su strutture complesse e individuali.

L'intelligenza artificiale, oggi, è in grado di svolgere tanti compiti, come segmentare immagini, rilevare patologie, proporre piani operatori. Ma non può – e non deve – sostituire la nostra capacità di ascolto. Quando si riceve un paziente che ha subito traumi, malformazioni, o che ha vissuto interventi precedenti non riusciti, la prima cosa che si deve fare non è limitarsi a guardare una TAC. È guardare lui. Capire dove si trova, dentro quel percorso. Capire cosa si aspetta. Capire di cosa ha paura. Senza questa fase, anche la migliore pianificazione virtuale è sterile.

Allora, qual è il compito che ci attende come medici, come chirurghi, come innovatori? Non è semplicemente quello di imparare a usare nuove tecnologie. Quello è il minimo. Il vero compito è trasformare queste tecnologie in strumenti di umanità, renderle alleate della nostra sensibilità clinica, usarle per dare più voce al paziente, più spazio al dialogo, più possibilità di scelta. Tecnoumanizzazione significa anche questo: accettare che la tecnologia ci cambia, ma solo se siamo disposti a cambiare anche noi. Bisogna uscire da un modello paternalistico, verticale, in cui il medico decide tutto, ed entrare in una medicina condivisa, trasparente, tridimensionale, dove il paziente non è

più 'sotto' il chirurgo, ma 'insieme' al chirurgo.

Questo libro nasce da queste riflessioni. Non è solo una raccolta di tecnologie. È un manifesto per una chirurgia che guarda avanti, senza dimenticare da dove viene. Una chirurgia in cui il bisturi dialoga con l'algoritmo, il modello 3D con lo sguardo umano, la realtà aumentata con la fiducia costruita nello studio, nel colloquio, nella stretta di mano.

Non dobbiamo scegliere tra tecnica e umanità. Dobbiamo costruire una chirurgia che abbia entrambe, che cresca con entrambe. Una chirurgia che non abbia paura di innovare, ma nemmeno di sentire. Questo è il significato profondo della tecnoumanizzazione, e questo è il futuro che vogliamo costruire.

Il futuro comincia in anticipo: Virtual Surgical Planning (VSP)



Dal disegno alla realtà: cos'è davvero il VSP?

Immagina di poter vedere un'operazione chirurgica prima ancora che inizi, non su un modello teorico, ma sul tuo stesso volto, con una precisione millimetrica. Questo non è fantascienza, è la realtà del Virtual Surgical Planning, o VSP, la pianificazione chirurgica virtuale.

Negli ultimi anni, il VSP ha rivoluzionato il modo in cui i chirurghi maxillo-facciali affrontano interventi complessi: dalle malformazioni congenite ai traumi, dai tumori cranio-facciali agli esiti di gravi asimmetrie. Grazie a software avanzati e alla modellazione tridimensionale basata su immagini TC e risonanza magnetica, oggi è possibile simulare l'intervento chirurgico sul computer prima di agire sul paziente. È una nuova era di precisione, predicibilità e sicurezza [1, vedi Bibliografia, pp. 63-70].

Il Virtual Surgical Planning è un processo che trasforma dati radiologici in modelli 3D digitali del cranio, del volto e delle strutture profonde. Su questi modelli, il chirurgo può pianificare con estrema precisione ogni fase dell'intervento: tagli ossei, riposizionamenti, resezioni tumorali, ricostruzioni con lembi, impianti personalizzati.

Si tratta di un passaggio fondamentale: prima del

VSP, la pianificazione chirurgica era prevalentemente manuale, basata su fotografie, radiografie bidimensionali e modelli in gesso. Era una chirurgia 'analogica', dove ogni fase si basava sull'esperienza e sull'occhio clinico del chirurgo. Con il VSP, invece, **la chirurgia diventa digitale**: ogni movimento viene anticipato e provato virtualmente, riducendo margini di errore e tempi operatori [1-3].

Perché il VSP cambia tutto

Le implicazioni cliniche del VSP sono profonde. Numerosi studi hanno dimostrato come questa tecnologia porti vantaggi concreti [4]:

- **maggiore accuratezza**: gli interventi eseguiti con VSP hanno una precisione significativamente superiore, con margini di errore inferiori ai 2 mm. In chirurgia ortognatica, per esempio, questo si traduce in simmetria facciale migliore e occlusione più stabile;
- **tempi operatori ridotti**: grazie alla pianificazione preoperatoria dettagliata e all'uso di guide chirurgiche stampate in 3D, molti interventi si svolgono più rapidamente, con minore esposizione all'anestesia e ridotto rischio di complicanze.
- **comunicazione potenziata**: con i modelli 3D è più facile spiegare l'intervento al paziente, ma anche coordinare il team multidisciplinare. Chirurghi, ortodontisti, anestesisti e tecnici protesici lavorano tutti su una piattaforma comune;
- **formazione chirurgica avanzata**: per i giovani specialisti, il VSP è anche uno strumento educativo. Consentendo di 'entrare' nell'anatomia del paziente in modo virtuale, favorisce la comprensione tridimensionale delle patologie e delle soluzioni.

Un nuovo workflow: dalla TAC al tavolo operatorio

Il flusso di lavoro tipico inizia con una TC ad alta risoluzione del distretto cranio-facciale (fig. 1).

I dati vengono importati in un software dedicato, dove

vengono segmentati i diversi tessuti (osso, denti, tessuti molli). Si ottiene così un modello digitale fedele alla realtà.

A questo punto, il chirurgo può simulare le osteotomie (tagli ossei), provare diverse strategie ricostruttive, inserire protesi virtuali, oppure pianificare l'orientamento di un lembo microvascolare. Tutto questo in un ambiente digitale in cui ogni azione può essere annullata, rifatta, perfezionata.

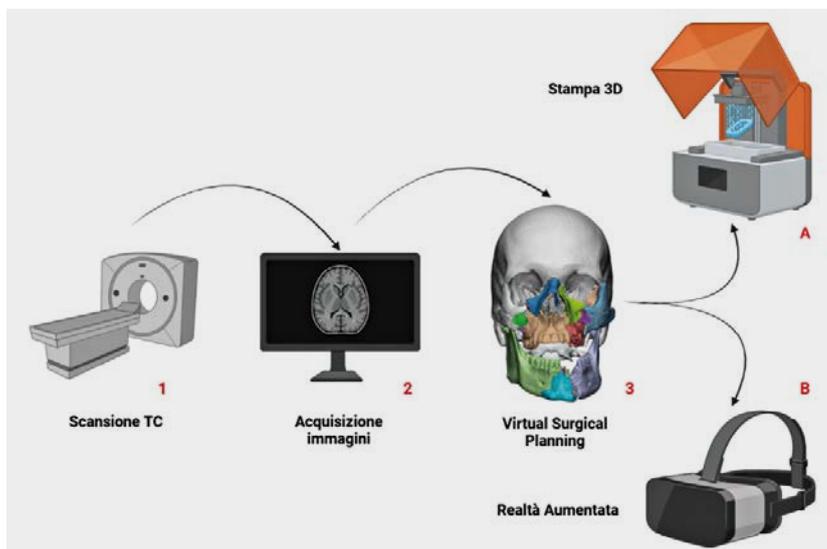
Quando il piano è definito, vengono prodotte dime chirurgiche personalizzate, tramite stampa 3D, che guidano fisicamente il chirurgo durante l'intervento. In alcuni casi si realizzano anche impianti customizzati, perfettamente adattati alla morfologia del paziente⁴. In alternativa il progetto può essere visualizzato tramite sistemi di realtà aumentata.

Non solo ortognatica: le applicazioni del VSP

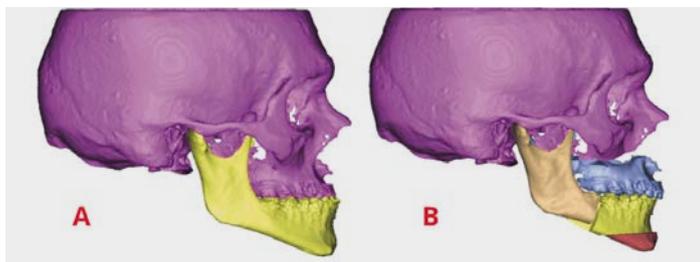
Se inizialmente il VSP si è affermato soprattutto nella chirurgia ortognatica (fig. 2), la disciplina che corregge le discrepanze scheletriche delle ossa mascellari, oggi le sue applicazioni si sono estese a moltissimi ambiti [4-6]:

- traumi cranio-facciali complessi, in cui è possibile ricostruire la morfologia originaria partendo da immagini pre-trauma o da una parte non lesionata del volto;
- resezioni tumorali e ricostruzioni immediate con lembi ossei (come il lembo di fibula), dove il VSP permette di tagliare e modellare il lembo con grande precisione;
- malformazioni congenite, tra cui labiopalatoschisi complesse o sindromi craniofacciali;
- chirurgia dell'articolazione temporo-mandibolare, con dime customizzate disegnate sul piano virtuale.

Il Virtual Surgical Planning non è più una tecnologia accessoria: è ormai un pilastro della chirurgia maxillo-facciale, capace di guidare l'intero percorso,



1



2

1 Flusso di lavoro del Virtual Surgical Planning. Il progetto di pianificazione chirurgica virtuale può essere utilizzato per realizzare modelli stampati in 3D (A) oppure per la realtà aumentata (B).

2 Esempio di VSP in chirurgia ortognatica. Planning preoperatoria (A) vs planning postoperatorio (B).

dalla pianificazione preoperatoria all'esecuzione in sala operatoria.

Un viaggio lungo decenni: l'evoluzione del VSP

La pianificazione chirurgica digitale non è nata da un giorno all'altro. Le sue radici affondano nei primi esperimenti di modellazione 3D negli anni Ottanta, quando l'elaborazione di immagini TAC iniziava a permettere una ricostruzione tridimensionale rudimentale delle strutture ossee. Ma fu solo con l'avvento di software più potenti e interfacce intuitive nei primi anni 2000 che il VSP iniziò a diffondersi davvero [7].

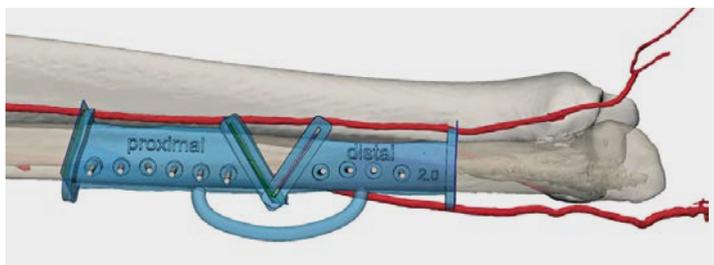
Un punto di svolta si ebbe con l'integrazione tra imaging 3D, tecnologie CAD/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing) e stampa 3D, che rese possibile il passaggio dalla simulazione alla produzione di guide chirurgiche e protesi su misura (figg. 3 e 4). Da quel momento, la chirurgia maxillo-facciale non fu più la stessa [7, 8].

Come evidenziato in una revisione sistematica del 2023, negli ultimi dieci anni il numero di software per la pianificazione virtuale è cresciuto in modo esponenziale, con decine di piattaforme oggi disponibili, ciascuna con specifici punti di forza e ambiti di applicazione [7].

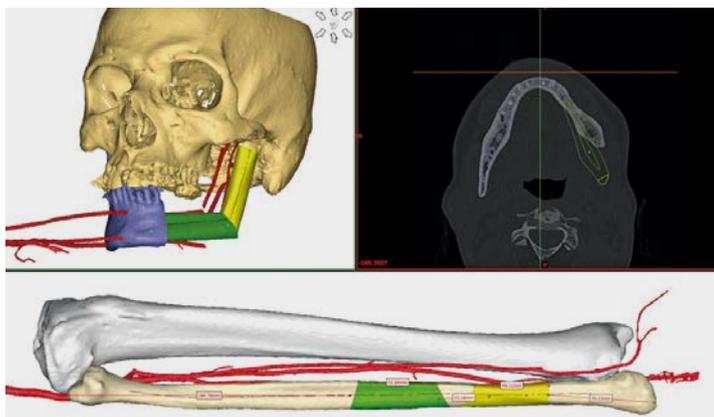
Dalla virtualità alla realtà aumentata

Il futuro del VSP non è solo nella simulazione, ma anche nella sua integrazione in tempo reale durante l'intervento. Tecnologie come la navigazione chirurgica, la realtà aumentata e i visori intraoperatori stanno trasformando l'ambiente operatorio in uno spazio ibrido, dove il mondo fisico e quello digitale convivono.

Un esempio significativo è il lavoro presso la nostra clinica sull'uso della realtà virtuale immersiva per esplorare compartimenti facciali profondi prima di resezioni oncologiche. Il chirurgo può letteralmente 'entrare' nel cranio del paziente, valutare i rapporti



3



4

- 3 Dima di taglio custom-made per la fibula.
- 4 Ricostruzione mandibolare con lembo microvascolare di fibula.

con vasi e nervi, e pianificare un percorso chirurgico su misura [6].

L'intelligenza artificiale entra in sala operatoria

Un'altra rivoluzione silenziosa è l'arrivo dell'intelligenza artificiale (AI). Gli algoritmi di machine learning stanno già aiutando i chirurghi in varie fasi del VSP, come ad esempio per la segmentazione automatica di scansioni TAC, il riconoscimento automatico di punti di repere craniofacciali o la previsione di risultati estetici e funzionali tramite modelli predittivi addestrati su migliaia di casi clinici [9].

L'integrazione tra VSP, AI e stampa 3D consentirebbe oggi di affrontare con successo anche i traumi cranio-facciali più complessi, seguendo protocolli sequenziali e personalizzati che riducono complicanze e migliorano gli esiti [8, 9].

Vantaggi, ma anche limiti

Nonostante i molti benefici, il VSP non è privo di limiti e criticità. Alcuni di essi sono tecnologici, altri organizzativi [1, 4]:

- costi elevati: le apparecchiature, i software e la formazione del personale rappresentano ancora una barriera per molte strutture sanitarie.
- tempi di produzione: sebbene la stampa 3D sia rapida, la progettazione delle guide può richiedere giorni, rendendola poco adatta ai casi d'urgenza.
- dipendenza da dati di qualità: un piano chirurgico è valido solo quanto lo sono le immagini su cui si basa. Errori nella TC o nella segmentazione si traducono in imprecisioni operative.

Inoltre, come sottolineato da diversi studi, i vantaggi del VSP possono variare notevolmente a seconda dell'esperienza del team, della qualità del protocollo e della collaborazione interdisciplinare [2].

La sfida dell'integrazione

Il vero potenziale del VSP si realizza solo quando

viene integrato in modo fluido nel percorso clinico: dalla diagnosi iniziale al follow-up postoperatorio. Ciò richiede una mentalità aperta al cambiamento, la disponibilità a collaborare tra discipline (chirurghi, ingegneri, tecnici, ortodontisti, oncologi) e l'adozione di protocolli condivisi.

Esperienze come quella del team del professor Robiony a Udine, o del gruppo del Johns Hopkins Hospital a Baltimora, dimostrano che un approccio sistematico e tecnologicamente avanzato può diventare realtà clinica quotidiana, con benefici tangibili per il paziente [3, 10].

Una nuova sala operatoria: tra digitale e realtà

Entrare oggi in una sala operatoria maxillo-facciale d'avanguardia è come assistere a una fusione tra ingegneria, medicina e informatica. Accanto al chirurgo, troviamo workstation digitali con modelli 3D, guide sterili stampate in 3D, navigatori intraoperatori e talvolta anche visori per la realtà aumentata.

Tutto è pianificato: dai vettori di spostamento mandibolare al posizionamento esatto degli impianti. In certi casi, il chirurgo non si limita a 'seguire l'anatomia': segue un piano chirurgico virtuale che è stato validato, simulato e verificato più volte prima dell'intervento. Nel caso di resezioni tumorali, ad esempio, il VSP consente di stabilire in anticipo i margini oncologici, modellare la ricostruzione con lembi ossei vascolarizzati, e ottenere una simmetria morfologica superiore rispetto alla pianificazione tradizionale (fig. 5).

Casi clinici: esempi concreti di rivoluzione

Caso 1: deformità mandibolare severa

Un paziente con una grave asimmetria mandibolare a causa di una iperplasia condilare progressiva. Grazie al VSP è stato possibile simulare una condilectomia proporzionale computer-guidata, come descritto nel protocollo aggiornato da Sembronio et al. (2019), ot-

tenendo risultati stabili sia dal punto di vista estetico che funzionale [11].

Caso 2: ricostruzione post-oncologica

Una paziente affetta da carcinoma mandibolare ha subito una resezione segmentaria. Con la pianificazione virtuale è stato progettato un lembo di fibula modellato in segmenti osteotomizzati con guide su misura. L'esito? Simmetria facciale mantenuta e funzionalità masticatoria pienamente recuperata [12].

Caso 3: trauma orbito-zigomatico complesso

In un politrauma facciale (fig. 6), il team ha utilizzato il VSP per 'riavvolgere il tempo', ricostruendo la morfologia pre-trauma a partire dall'altro lato del viso, il così detto 'mirroring'. Il risultato è stato una ricostruzione simmetrica, assistita da guide e splint 3D customizzati [13].

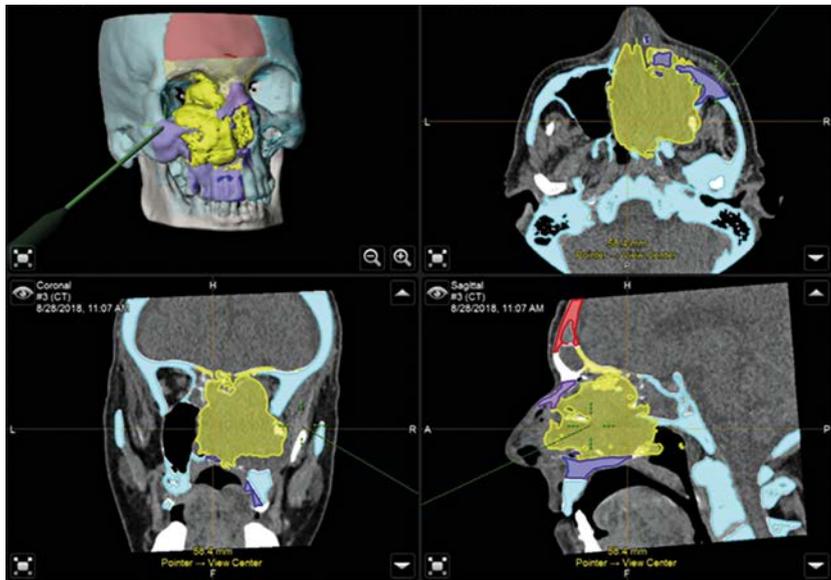
La stampa 3D: dal piano alla materia

Uno degli alleati chiave del VSP è la stampa 3D, che consente di trasformare il piano virtuale in uno strumento reale. Vengono stampate guide chirurgiche di taglio, guide di posizionamento per le ricostruzioni ossee, protesi personalizzate in titanio e modelli anatomici per la simulazione, formazione e comunicazione con il paziente.

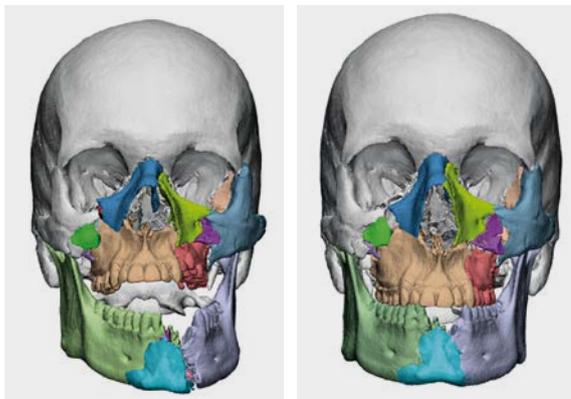
L'integrazione tra VSP e stampa 3D è particolarmente utile anche nei casi pediatrici oncologici, dove ogni millimetro conta. Diversi studi mostrano come la combinazione tra imaging, pianificazione digitale e guide 3D porti a resezioni precise e conservazione funzionale nei giovani pazienti [5, 14].

Verso una chirurgia sempre più predittiva

Il VSP, potenziato dall'intelligenza artificiale, apre le porte a una chirurgia predittiva, in cui è possibile non solo pianificare l'intervento, ma anche anticiparne l'esito, attraverso simulazioni morfologiche del volto



5



6

- 5 Esempio di navigazione intraoperatoria.
- 6 Esempio di gestione di un trauma complesso.

postoperatorio, previsioni biomeccaniche di carico e stabilità e analisi comparative tra diverse opzioni chirurgiche.

Il futuro vedrà la combinazione di big data clinici, imaging avanzato e reti neurali che consiglieranno, in tempo reale, la strategia chirurgica ottimale per ciascun paziente.

Una trasformazione culturale

Più che la tecnologia, è la mentalità che sta cambiando. Il VSP impone una logica nuova: ragionare in modo anticipatorio, collaborativo, multidisciplinare. È una chirurgia meno improvvisata e più ragionata, dove il gesto è l'ultima tappa di un percorso già compiuto virtualmente.

Non si tratta solo di 'fare le cose meglio', ma di fare cose nuove. Il VSP ha permesso di affrontare casi prima considerati inoperabili, espandendo i confini della chirurgia ricostruttiva cervico-facciale [4].

In questo contesto, la centralità del paziente acquista un significato ancora più profondo. La pianificazione virtuale consente di coinvolgere attivamente la persona nelle scelte terapeutiche, migliorando la comunicazione, riducendo l'ansia preoperatoria e favorendo una reale alleanza terapeutica. Come sottolinea il professor Massimo Robiony, l'evoluzione tecnologica deve sempre tradursi in un'umanizzazione delle cure e in un miglior benessere organizzativo: una chirurgia più precisa è anche una chirurgia più rispettosa, consapevole e orientata alla qualità della vita del paziente.

Conclusione: chirurgia su misura, per davvero

Il Virtual Surgical Planning rappresenta oggi uno degli strumenti più potenti nella chirurgia maxillo-facciale. Ha cambiato il modo di pensare, progettare e realizzare un intervento. E non è più appannaggio di pochi centri d'élite: la sua diffusione cresce anno dopo anno, sostenuta da evidenze scientifiche robuste e da una continua innovazione tecnologica.

Nel futuro prossimo, assisteremo a una integrazione completa tra VSP, intelligenza artificiale, realtà aumentata e robotica. Una chirurgia guidata dai dati, ma al servizio dell'uomo. Una chirurgia, finalmente, davvero su misura.

La terza dimensione della chirurgia: la stampa 3D nel volto umano



Cos'è la stampa 3D e come funziona

La stampa 3D è una tecnologia che consente di creare oggetti tridimensionali a partire da un modello digitale. A differenza dei metodi tradizionali di produzione (che rimuovono materiale da un blocco solido), la stampa 3D costruisce l'oggetto strato dopo strato, depositando materiale in modo preciso fino a realizzare la forma desiderata [15].

Molti di noi hanno usato una stampante a getto d'inchiostro per stampare documenti o foto. Funziona proiettando minuscole gocce di inchiostro su un foglio, riga dopo riga, fino a formare un'immagine bidimensionale. Ora, immaginate che invece di un foglio ci sia una base mobile, e che invece dell'inchiostro venga usato un materiale solido (come una resina liquida, una plastica fusa o addirittura polvere di titanio), depositato strato su strato.

La stampante 3D funziona proprio così: ogni strato viene 'stampato' sulla base, poi il piano si abbassa leggermente e inizia un nuovo strato. Continuando in questo modo, si ottiene un oggetto tridimensionale completo, con una forma precisa e spesso molto complessa, impossibile da ottenere con tecniche tradizionali.

In altre parole, se la stampante a inchiostro 'disegna'

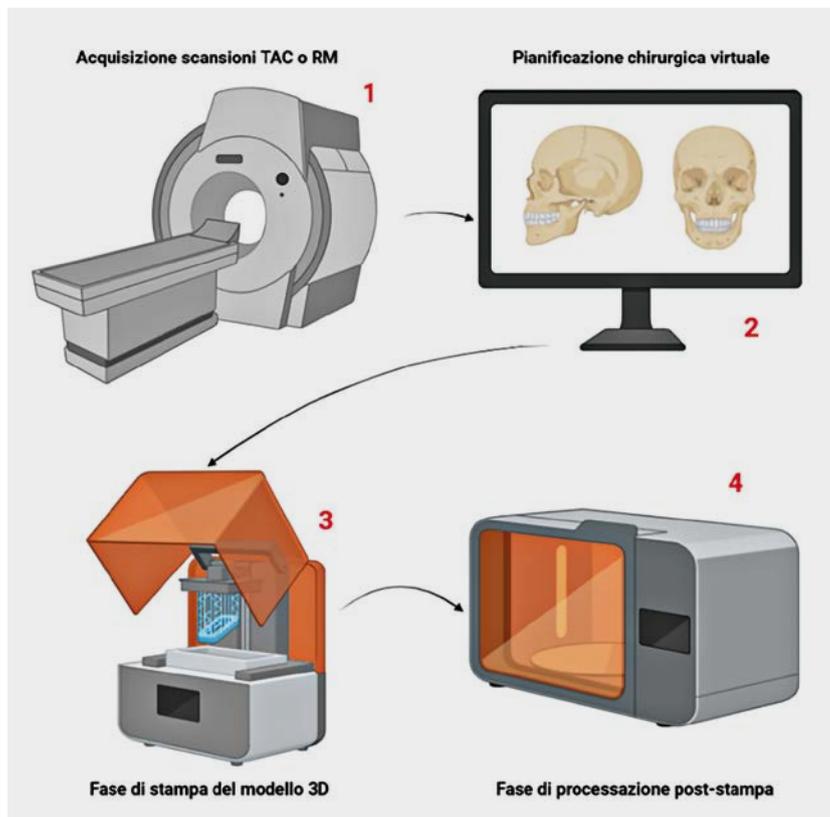
sul piano, la stampante 3D 'costruisce' in altezza. È come passare da una fotografia piatta a una scultura fatta a mano, ma con la precisione di un computer. Nel contesto medico, questo significa che è possibile riprodurre in scala reale parti del corpo umano, come ossa od organi, utilizzando dati ottenuti da esami radiologici (come la TC o la RM). I materiali usati possono essere plastici, metallici o persino biologici, a seconda dell'applicazione.

La tecnologia della stampa 3D ha avuto una forte fase di crescita nell'ultimo decennio. Grazie alla riduzione dei costi, all'innovazione tecnologica e agli investimenti nella ricerca, si è diffusa in diverse branche della medicina, nella cardiocirurgia, nella chirurgia plastica ricostruttiva, nell'ortopedia e soprattutto nella chirurgia maxillo-facciale. L'uso della stampa 3D si è rivelato uno strumento eccellente per il chirurgo per migliorare la qualità e la precisione delle procedure chirurgiche che richiedono grande accuratezza. La stampa 3D consente di creare dispositivi medici, guide di resezione, protesi e impianti personalizzati, migliorando il risultato della chirurgia sia in termini funzionali che estetici [16-19].

Fasi del processo di stampa 3D

Per creare un modello 3D da utilizzare in chirurgia maxillo-facciale, si seguono diverse fasi ben definite che uniscono imaging medico, ingegneria e progettazione digitale (fig. 7). Il punto di partenza è l'acquisizione di immagini del paziente tramite tomografia computerizzata (TC) o risonanza magnetica (RM). Queste scansioni forniscono una serie di immagini in sezione (i cosiddetti dati DICOM, acronimo di Digital Imaging and Communications in Medicine) che rappresentano l'anatomia interna del volto o del cranio [20, 21]. Attraverso software specializzati, tali dati vengono elaborati per ottenere una ricostruzione tridimensionale dell'area di interesse. Questo processo è chiamato segmentazione: consiste nell'iso-

lare digitalmente, per esempio, le ossa, i denti o altre strutture anatomiche, trasformandole in un modello virtuale completo. A questo punto entra in gioco la progettazione CAD (Computer-Aided Design), ovvero la modellazione assistita al computer, con la quale si definisce nei minimi dettagli la forma dell'anatomia o dei dispositivi da produrre [20, 21]. Utilizzando piattaforme di Virtual Surgical Planning, il chirurgo può simulare l'intervento: effettuare osteotomie virtuali, cioè tagli ossei digitali, spostare segmenti scheletrici, correggere asimmetrie e valutare l'esito estetico e funzionale in anticipo. In questa fase si progettano anche dispositivi personalizzati, come stecche occlusali, dime chirurgiche e persino impianti su misura, adattati perfettamente all'anatomia del paziente [20, 21]. Una volta conclusa la progettazione, il modello 3D virtuale viene esportato in un formato standard, solitamente .STL (Standard Tessellation Language), compatibile con le stampanti 3D. Questo file viene quindi inviato alla macchina di stampa, selezionando il tipo di materiale più adatto: resine biocompatibili per i modelli anatomici, polimeri rigidi per le guide chirurgiche o titanio per gli impianti definitivi [20, 21]. Dopo la stampa, il modello richiede una fase di post-processing, che può includere la rimozione dei supporti strutturali, la lucidatura, l'indurimento in forno (per materiali fotosensibili), e talvolta trattamenti chimici o meccanici. Prima di essere utilizzati in sala operatoria, i dispositivi destinati al contatto con il paziente vengono sterilizzati secondo protocolli rigorosi, per garantirne la sicurezza [20, 21]. Infine, il modello o la guida chirurgica stampata può essere portata in sala operatoria, dove diventa uno strumento fondamentale per guidare il chirurgo con precisione, replicando fedelmente ciò che è stato pianificato al computer. Questa sinergia tra imaging, modellazione e manifattura digitale è il cuore della chirurgia del futuro (fig. 7).



- 7 Rappresentazione grafica delle fasi per la stampa di un modello 3D.

Applicazioni pratiche nella chirurgia maxillo-facciale

Negli ultimi dieci anni, l'ingresso della stampa 3D nel mondo medico ha rappresentato una vera rivoluzione, in particolare in ambito chirurgico. Questa tecnologia ha reso possibile la produzione di modelli anatomici tridimensionali, dispositivi medici personalizzati, protesi su misura e persino impianti impiantabili, trasformando radicalmente la pianificazione e l'esecuzione degli interventi.

In chirurgia maxillo-facciale, la stampa 3D è diventata un alleato prezioso per affrontare traumi complessi, deformità ossee, malattie oncologiche, patologie dell'articolazione temporo-mandibolare (ATM) e malocclusioni scheletriche. Grazie alla possibilità di modellare le strutture anatomiche esatte di ciascun paziente, il chirurgo può studiare il caso con maggiore precisione, riducendo tempi operatori, complicanze e incertezze intraoperatorie. Ma non solo: la stampa 3D ha anche un ruolo fondamentale nella formazione delle nuove generazioni di chirurghi, grazie alla possibilità di simulare le procedure su modelli reali stampati, migliorando così l'apprendimento pratico e la sicurezza [22-28]. Le principali applicazioni pratiche includono:

- impianti su misura (PSI - Patient-Specific Implants): si tratta di protesi personalizzate realizzate in titanio o altro materiale biocompatibile. Vengono utilizzate, ad esempio, per ricostruire zigomi, pareti orbitarie, mandibole dopo resezione oncologica o per ricostruzioni complesse post-traumatiche. La loro forma è perfettamente adattata all'anatomia del singolo paziente.
- dime chirurgiche (guide chirurgiche): strumenti personalizzati che guidano con precisione il chirurgo durante i tagli ossei (osteotomie), ad esempio nella chirurgia ortognatica o nella ricostruzione con innesti di perone. Queste dime garantiscono che l'intervento rispecchi fedelmente quanto pianificato al computer.
- modelli 3D anatomici: riproduzioni fisiche delle strutture ossee del paziente, utili per pianificare

l'intervento, valutare l'accesso chirurgico e simulare le manovre operatorie. Sono anche impiegati a scopo educativo per studenti e specializzandi (fig. 8).

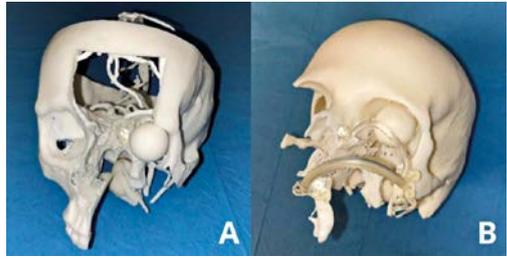
- **splint chirurgici:** dispositivi fondamentali in chirurgia ortognatica, servono a guidare i movimenti delle ossa mascellari e a mantenere correttamente l'occlusione durante l'intervento. Sono realizzati sulla base della simulazione preoperatoria (fig. 9).
- **stampi per cranioplastiche:** in alcuni casi, la stampa 3D viene utilizzata per produrre stampi non impiantabili che servono come matrice per modellare materiali impiantabili, come il PMMA (polimetilmetacrilato), molto usato in neurochirurgia per ricostruire porzioni craniche (fig. 10).

Nel complesso, queste applicazioni rientrano nella più ampia visione della medicina di precisione e personalizzata, in cui ogni strumento, ogni movimento, ogni scelta è calibrata sulla specificità del paziente. La stampa 3D consente di unire tecnologia e artigianalità, trasformando la chirurgia maxillo-facciale in un atto ancora più sicuro, efficace e rispettoso dell'unicità di ogni volto umano.

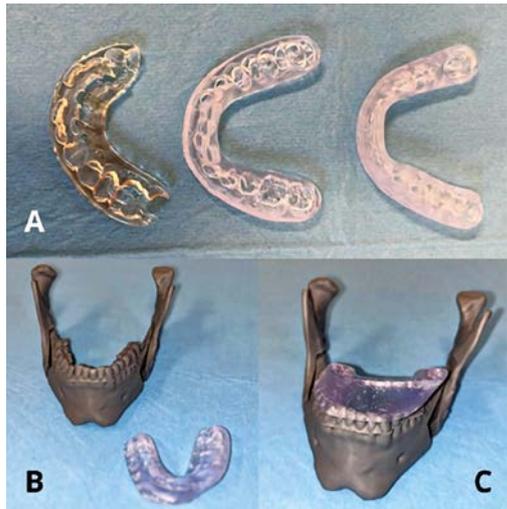
La stampa 3D nella pratica quotidiana: l'esperienza di Udine

Nel contesto della chirurgia maxillo-facciale italiana, l'Azienda Sanitaria Universitaria di Udine rappresenta oggi una realtà d'avanguardia per l'integrazione della stampa 3D nella pratica clinica quotidiana (fig. 11). Non si tratta di un progetto sperimentale o teorico, ma di una routine consolidata, in cui tecnologia e chirurgia collaborano attivamente per offrire ai pazienti interventi più precisi, personalizzati e sicuri.

All'interno del nostro reparto disponiamo di un laboratorio dedicato alla stampa 3D, equipaggiato con tre stampanti SLA (stereolitografia) e una stampante FDM (a deposito di filamento fuso). Questi due sistemi di stampa, seppur differenti, si integrano perfettamente tra loro per rispondere a esigenze diverse.

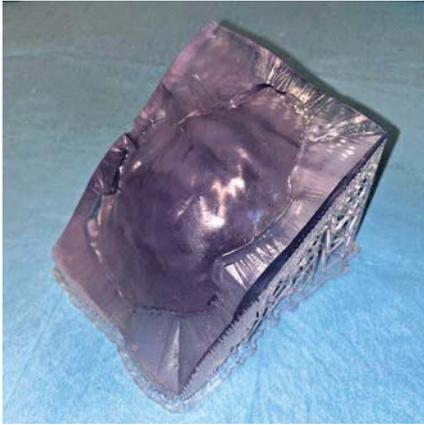


8



9

- 8 Modelli anatomici che permettono al chirurgo una preparazione preoperatoria migliore e più accurata. A: rappresentazione di una osteotomia fronto-orbito-mascellare. B: rappresentazione di una osteotomia mascellare sotto la guida di una dima chirurgica tripartita.
- 9 Splint chirurgici. A: tre diversi tipi di splint. B e C: rappresentazione di una mandibola in resina con lo specifico splint chirurgico posizionato sull'arcata dentaria.



10



11

10 Stampo 3D per la realizzazione di cranioplastiche. Con lo stampo complementare viene inserito materiale impiantabile per la realizzazione di una protesi con la quale ricostruire il difetto osseo a livello della scatola cranica.

11 Il laboratorio di stampa 3D presso il nostro presidio ospedaliero.

Le **stampanti a stereolitografia (SLA)** utilizzano una resina liquida che viene solidificata strato dopo strato da un raggio laser UV, creando oggetti con un livello di dettaglio molto elevato. Questo tipo di stampa è ideale per produrre modelli anatomici realistici, splint chirurgici, dime di taglio e dispositivi guida, fondamentali nelle ricostruzioni complesse del volto. La precisione millimetrica della tecnologia SLA consente di lavorare su strutture sottili e intricate, come le orbite o le articolazioni temporo-mandibolari.

Accanto alle SLA, utilizziamo una **stampante FDM** (Fused Deposition Modeling), che crea gli oggetti fondendo e stratificando un filamento plastico, solitamente PLA o ABS. Sebbene meno precisa della SLA, questa tecnologia è perfetta per stampi chirurgici, modelli ossei robusti o prototipi funzionali, offrendo velocità, resistenza meccanica e costi contenuti.

Dopo la stampa, i modelli richiedono una fase di post-processing per essere rifiniti, puliti e, quando necessario, resi biocompatibili.

Nel nostro laboratorio, per la processazione dei modelli stampati in 3D utilizziamo:

- due centrifughe ad alcol: servono per rimuovere i residui di resina liquida dalle superfici appena stampate. Il modello viene immerso in alcol isopropilico e centrifugato a velocità controllata, garantendo una pulizia uniforme e profonda senza danneggiare i dettagli più fini.
- due camere di polimerizzazione a raggi UV: dopo il lavaggio, i modelli vengono esposti a luce ultravioletta in camere chiuse, che completano la polimerizzazione della resina. Questo processo conferisce al modello la sua stabilità meccanica e resistenza finale, rendendolo adatto alla manipolazione clinica o all'uso in sala operatoria.

La nostra attività di stampa si concentra principalmente sulla realizzazione di modelli anatomici personalizzati, usati nella pianificazione preoperatoria per lo studio della morfologia del volto e per valutare

gli approcci chirurgici, dime chirurgiche (ossia guide di taglio), strumenti personalizzati che guidano il chirurgo nell'esecuzione precisa delle osteotomie. Inoltre stampiamo splint chirurgici, ossia dispositivi su misura per garantire una corretta occlusione della bocca e l'allineamento durante interventi di chirurgia ortognatica, e stampi per la realizzazione di cranioplastiche o modellazione di altri materiali impiantabili. L'obiettivo non è solo produrre oggetti, ma costruire soluzioni per migliorare la vita dei pazienti. Ogni modello stampato nel nostro laboratorio rappresenta un passo avanti verso una medicina più personalizzata, più ragionata, più efficace.

Il nostro approccio integra competenze cliniche, ingegneristiche e digitali, in una sinergia che oggi ci consente di affrontare con maggiore sicurezza casi complessi, traumi estesi, patologie oncologiche e malformazioni congenite. È una tecnologia che non sostituisce il giudizio del chirurgo, ma lo potenzia, guidandolo con strumenti fatti su misura.

Vantaggi concreti per medici e pazienti

L'introduzione della stampa 3D nella chirurgia maxillo-facciale ha rappresentato una delle innovazioni più significative degli ultimi anni. Non si tratta solo di una nuova tecnologia: è un vero cambio di paradigma nel modo in cui si pianificano, si comprendono e si realizzano gli interventi chirurgici. La possibilità di creare modelli tridimensionali realistici e dispositivi personalizzati sta trasformando profondamente la pratica clinica, rendendola più precisa, sicura e personalizzata, offrendo diversi vantaggi [29-33]:

- pianificazione preoperatoria più efficace. Uno dei benefici principali è la possibilità di simulare l'intervento prima ancora di entrare in sala operatoria. Utilizzando i dati ottenuti da una TC o da una risonanza magnetica, è possibile costruire una riproduzione fedele dell'anatomia del paziente. Questo modello digitale, e successivamente

quello fisico stampato in 3D, permette al chirurgo di visualizzare con chiarezza il problema da risolvere, studiarne le dimensioni, i rapporti con le strutture vicine, valutare diverse opzioni chirurgiche e scegliere quella più sicura ed efficace. In altre parole, la chirurgia smette di essere un atto parzialmente esplorativo per diventare un processo progettato nei minimi dettagli, come un architetto che disegna la ristrutturazione di un edificio prima di iniziare i lavori;

- maggiore precisione durante l'intervento. Grazie alle guide chirurgiche personalizzate, dette anche dime, il chirurgo può eseguire tagli ossei (osteotomie) e posizionamenti con una precisione millimetrica, replicando esattamente ciò che è stato pianificato al computer. Questo riduce la possibilità di errore umano e permette una riproducibilità tecnica che prima era difficile da ottenere, soprattutto in casi complessi come le ricostruzioni post-oncologiche o i traumi facciali multipli;
- tempi operatori più brevi. Un intervento ben pianificato è anche più veloce da eseguire. La riduzione dei tempi in sala operatoria significa minori rischi legati all'anestesia, minore esposizione ai contaminanti e uso più efficiente delle risorse ospedaliere. Questo vantaggio ha ricadute positive sia per il singolo paziente sia per l'intero sistema sanitario;
- migliori risultati estetici e funzionali. Nel trattamento del volto umano, l'equilibrio estetico e la funzionalità vanno di pari passo. Grazie alla stampa 3D, è possibile ottenere simmetrie perfette, allineamenti corretti e ricostruzioni armoniose, in particolare nella chirurgia ortognatica (correzione delle malocclusioni) o nella ricostruzione orbito-zigomatica. Il paziente ne trae beneficio sia dal punto di vista estetico, sia per quanto riguarda le funzioni fondamentali come la masticazione, la fonazione, la respirazione e l'espressività;

- riduzione delle complicanze postoperatorie. Un intervento più preciso, mirato e meno invasivo comporta generalmente meno dolore postoperatorio, minori infezioni, cicatrici più contenute e un recupero più rapido. Anche il rischio di dover effettuare un secondo intervento (revisione chirurgica) diminuisce sensibilmente, con un impatto positivo sulla qualità della vita del paziente;
- un potente strumento di comunicazione con il paziente. I modelli stampati in 3D permettono al chirurgo di mostrare concretamente al paziente l'area da trattare, spiegare la natura del problema e illustrare le fasi dell'intervento. Questo migliora la comunicazione medico-paziente, riduce l'ansia preoperatoria e consente al paziente di partecipare più attivamente alle decisioni, rafforzando il rapporto di fiducia e il consenso informato;
- uno strumento in più per la formazione dei giovani chirurghi. Nella didattica, la stampa 3D ha aperto nuovi scenari. Gli studenti e i medici in formazione possono esercitarsi su modelli realistici, provare manovre chirurgiche, apprendere l'anatomia complessa del volto e prepararsi agli interventi reali senza rischi per i pazienti. È una didattica più concreta, immersiva, efficace.

In sintesi, la stampa 3D ha portato nella chirurgia maxillo-facciale una nuova cultura dell'accuratezza, dove ogni intervento non è solo eseguito, ma progettato, simulato e personalizzato. È la dimostrazione che l'innovazione tecnologica, quando è al servizio della medicina, può contribuire non solo a fare meglio, ma anche a curare in modo più umano, più consapevole e più rispettoso dell'unicità di ogni paziente.

Limiti attuali e sfide future

Nonostante il grande entusiasmo che circonda l'uso della stampa 3D in medicina, è importante riconoscere che questa tecnologia, per quanto rivoluzionaria, non è priva di ostacoli. La sua adozione su larga scala richiede il superamento di alcune barriere tecniche,

economiche, organizzative e normative. Allo stesso tempo, gli sviluppi futuri, già in parte in atto, aprono scenari straordinari per la chirurgia del volto e per l'intera medicina rigenerativa [34-37]. Purtroppo si riscontrano i seguenti limiti:

- tempi di produzione e pianificazione. La stampa 3D non è un processo immediato. Dalla raccolta delle immagini radiologiche alla segmentazione, fino alla progettazione, stampa e sterilizzazione dei dispositivi, possono passare diversi giorni. Questo la rende poco adatta alle urgenze chirurgiche, dove il tempo è una variabile critica;
- costi e accessibilità. Le stampanti 3D di uso medico professionale, i software di modellazione, i materiali biocompatibili e il personale tecnico formato comportano costi significativi. Non tutti i centri ospedalieri sono attrezzati per integrare questa tecnologia nella routine clinica. Inoltre, alcuni dispositivi personalizzati, come gli impianti in titanio su misura, possono avere costi elevati non sempre rimborsati dal sistema sanitario;
- bisogno di competenze multidisciplinari. L'uso efficace della stampa 3D richiede una collaborazione stretta tra medici, ingegneri, tecnici, informatici. Serve una nuova cultura condivisa, capace di integrare le competenze cliniche con quelle digitali e progettuali.

Nonostante questi limiti, il potenziale di crescita è enorme. La stampa 3D è destinata a diventare una componente stabile della medicina personalizzata, man mano che le tecnologie si semplificano, i costi si riducono e le competenze si diffondono. In futuro ci si aspetta stampanti più rapide, più intelligenti, con maggiore automazione nei processi di progettazione e stampa grazie all'ausilio dell'intelligenza artificiale e l'integrazione più stretta tra stampa 3D, realtà aumentata e chirurgia robotica, per interventi guidati in tempo reale.

Inoltre accanto alla stampa 3D 'tradizionale', che

usa materiali inerti per creare strutture fisiche, si sta affermando un campo ancora più ambizioso: il bioprinting, ovvero la stampa di tessuti viventi [38]. Il principio è lo stesso: si parte da un progetto digitale e si costruisce un oggetto strato per strato. Ma invece di plastica o titanio, si utilizzano bio-ink, ossia inchiostri composti da cellule viventi, idrogel e sostanze nutritive. L'obiettivo? Ricostruire tessuti biologici funzionali come osso, cartilagine, pelle, vasi sanguigni e – in prospettiva – organi complessi. In chirurgia maxillo-facciale, le applicazioni potenziali sono straordinarie: rigenerare ossa mandibolari dopo resezioni oncologiche, ricostruire cartilagini nasali o auricolari, o creare tessuti vascolarizzati su misura per impianti complessi.

Oggi, il bioprinting è ancora in fase sperimentale, ma alcuni prototipi di tessuti sono già stati impiantati con successo su modelli animali, e diversi trial clinici sono in fase di avvio. La strada è lunga, ma il futuro è promettente: un domani potremmo non solo stampare strutture per guidare la chirurgia, ma stampare direttamente il tessuto da ricostruire [39].

Il futuro è stampato su misura, riflessione conclusiva

La stampa 3D ha trasformato la chirurgia maxillo-facciale in un atto sempre più preciso, personalizzato e – sorprendentemente – umano. In un'epoca in cui spesso si teme che la tecnologia allontani medico e paziente, questa innovazione dimostra l'esatto contrario: è proprio grazie alla tecnologia che la cura può diventare più vicina alla persona.

Ogni volto racconta una storia, ogni volto è diverso. La stampa 3D consente di rispettare questa unicità, progettando interventi 'su misura', pensati non per una patologia generica, ma per quel singolo paziente, con il suo volto, le sue paure e le sue speranze. Non si tratta solo di ottenere un risultato tecnico perfetto, ma di restituire identità, espressività, fiducia in sé stessi. In questo senso, la stampa 3D è uno strumento straor-

dinario di umanizzazione delle cure: rende il paziente protagonista del percorso terapeutico, lo coinvolge nella pianificazione, gli permette di 'vedere' in anticipo il proprio intervento e di comprenderlo meglio. Il chirurgo, da parte sua, può dialogare con maggiore consapevolezza, condividendo modelli e simulazioni che facilitano la comunicazione.

Il consiglio, per chi legge, è uno solo: non smettere di essere curiosi. Dietro ogni nuova tecnologia in medicina non c'è solo ingegneria, ma anche una profonda aspirazione a curare meglio, con più rispetto, più precisione e più umanità. Il futuro della chirurgia non sarà solo robotico o digitale: sarà profondamente personale. Perché ogni volto è unico, e oggi la medicina ha finalmente gli strumenti per trattarlo come tale.

La chirurgia incontra l'intelligenza delle macchine: l'uso dell'AI



Cos'è l'intelligenza artificiale? [40]

L'espressione 'intelligenza artificiale' – o AI, per usare l'abbreviazione inglese di Artificial Intelligence – è diventata ormai familiare: la troviamo nei titoli dei giornali, nelle app dei nostri telefoni e persino nei dispositivi di casa. Ma cosa significa davvero? E, soprattutto, come può un'intelligenza essere 'artificiale'? In parole semplici, l'intelligenza artificiale è la capacità di una macchina di compiere operazioni che richiederebbero, se svolte da un essere umano, intelligenza: come riconoscere un volto, comprendere un linguaggio, prendere decisioni, fare previsioni o risolvere problemi. L'AI non è un cervello umano 'sintetico', ma piuttosto un insieme di algoritmi – cioè regole matematiche – capaci di apprendere da grandi quantità di dati.

Per decenni, i computer hanno funzionato secondo istruzioni rigide e predeterminate: 'se succede A, allora fai B'. L'intelligenza artificiale ha rotto questo schema introducendo un concetto chiave: l'apprendimento automatico (*machine learning*). Invece di dire al computer esattamente cosa fare, gli si danno esempi, e lui impara a riconoscere da solo delle regole. Facciamo un esempio concreto. Se vogliamo che una macchina riconosca un volto umano in una fotografia,

non le diciamo come è fatto un occhio o dove si trova il naso. Le forniamo migliaia di immagini con la dicitura 'volto' o 'non volto'. Il sistema analizza questi esempi, trova da solo delle regolarità e impara a riconoscere nuovi volti mai visti prima.

Per far sì che l'intelligenza artificiale impari a riconoscere oggetti, parole o strutture anatomiche complesse, si utilizzano modelli chiamati reti neurali artificiali, ispirati in modo molto semplificato al funzionamento del cervello umano [41].

Queste reti sono composte da strati di 'neuroni' artificiali che comunicano tra loro. Ogni strato elabora l'informazione ricevuta e la passa al successivo, in una catena di trasformazioni sempre più sofisticate. Più strati ha la rete, più è 'profonda' – da qui il termine 'deep learning' (apprendimento profondo). È proprio grazie al deep learning che oggi le AI possono riconoscere tumori in una radiografia, tradurre in tempo reale una conversazione o guidare un'auto [41].

L'AI non è magia, ma matematica applicata. Dietro l'apparente 'intelligenza' c'è un lavoro enorme di calcolo, probabilità e ottimizzazione. L'AI funziona solo se ha grandi quantità di dati su cui esercitarsi, e se viene 'allenata' (o addestrata) in modo corretto. Proprio come uno studente che migliora facendo esercizi, anche una rete neurale si perfeziona a ogni errore, imparando gradualmente a fare scelte più corrette [42].

Per questo, l'AI non si improvvisa: ha bisogno di dati clinici di qualità, di competenze interdisciplinari, e di un uso etico e trasparente, soprattutto in ambito medico.

È importante chiarire un equivoco diffuso: l'intelligenza artificiale, oggi, non pensa, non ha coscienza, non ha emozioni. È un insieme sofisticato di strumenti predittivi, in grado di analizzare dati, trovare schemi e suggerire decisioni. Ma il giudizio clinico resta nelle mani del medico. In questo senso, l'AI non sostituisce il chirurgo, ma lo affianca. Lo aiuta a interpretare im-

magini complesse, a scegliere il piano chirurgico più adatto, a prevedere l'esito di un intervento. In chirurgia maxillo-facciale, dove ogni millimetro conta e ogni volto è diverso, questa sinergia uomo-macchina sta già portando risultati sorprendenti.

Come l'AI viene addestrata a 'leggere' il volto umano

Il volto umano è una struttura straordinariamente complessa. In chirurgia maxillo-facciale, saper 'leggere' le sue geometrie, asimmetrie, densità ossee e proporzioni è una delle abilità più raffinate che un chirurgo possa sviluppare. Ma cosa accade quando chiediamo a una macchina di interpretare un volto? Addestrare un'intelligenza artificiale a comprendere l'anatomia del volto umano è un processo che ha poco a che vedere con l'estetica, e molto con la matematica. Richiede immagini, algoritmi, modelli e una fase cruciale: l'apprendimento supervisionato.

Tutto inizia da un'immagine radiologica, solitamente una tomografia computerizzata (TC) o una risonanza magnetica (RM). A un occhio inesperto, può sembrare solo una sequenza di 'slices' in bianco e nero. Ma per un algoritmo, ogni pixel è un numero, ogni variazione di intensità è un'informazione [43].

Perché l'AI possa analizzare questa immagine, deve prima riconoscere dove inizia e dove finisce ogni struttura rilevante: mandibola, mascella, orbita, zigomo, denti, articolazione temporo-mandibolare, ecc. Questo processo si chiama segmentazione, ed è simile a 'ritagliare' digitalmente ogni osso o tessuto [44].

La segmentazione 3D basata su deep learning – ad esempio con reti come U-Net – consente di automatizzare un processo che prima richiedeva ore di lavoro manuale. La rete viene addestrata su centinaia di immagini già annotate da esperti, imparando a distinguere e colorare ciascuna struttura anatomica in modo accurato [45].

Una volta identificate le strutture, l'AI passa alla fase successiva: comprendere la morfologia, ovvero la

forma, la posizione e la relazione spaziale tra le diverse componenti del volto. Questo avviene usando reti neurali convoluzionali (CNN) o architetture più evolute come ResNet o V-Net, che analizzano i pattern spaziali a vari livelli di profondità [46].

Perché un'AI diventi davvero utile in chirurgia, non basta che 'veda'. Deve anche capire a cosa serve ogni struttura: la simmetria orbitaria è importante per l'estetica, l'articolazione temporo-mandibolare per la masticazione, la posizione mandibolare per l'occlusione dentaria. Ecco perché i dataset usati per addestrare queste AI includono non solo immagini, ma anche informazioni cliniche, dati funzionali e indicatori chirurgici.

In alcuni progetti l'AI viene istruita non solo a segmentare, ma a prevedere movimenti ossei, simulare l'effetto di un'osteotomia, o proporre la traiettoria più sicura per una ricostruzione orbitale. In altre parole, impara non solo a vedere il volto, ma a pensare come un chirurgo.

Quando l'AI ha completato l'analisi, il suo output può essere usato in diversi modi: per creare un modello 3D stampabile, per generare guide chirurgiche su misura, o per simulare l'intervento in ambiente virtuale. A quel punto, il chirurgo prende il controllo, integrando i suggerimenti dell'algoritmo con la propria esperienza clinica.

In questo modo, la lettura del volto da parte dell'AI non è un esercizio teorico, ma una base concreta per la chirurgia personalizzata.

Le applicazioni dell'AI nella chirurgia maxillo-facciale

L'intelligenza artificiale sta progressivamente trasformando la chirurgia maxillo-facciale, non come un elemento marginale, ma come un vero e proprio cambio di paradigma. Se un tempo l'esperienza del chirurgo, l'analisi delle immagini e la pianificazione dell'intervento si basavano interamente sulla capacità umana di osservazione e di giudizio, oggi l'AI si

propone come uno strumento capace di amplificare queste abilità, rendendo l'atto chirurgico più preciso, più predittivo e più personalizzato.

Nel panorama delle applicazioni mediche dell'intelligenza artificiale, si possono individuare tre grandi aree che stanno rivoluzionando il modo in cui vengono gestiti diagnosi, trattamento e comunicazione clinica: i sistemi di supporto alle decisioni cliniche (Clinical Decision Support Systems - CDSS), le tecnologie di elaborazione del linguaggio naturale (Natural Language Processing - NLP) e i modelli per il miglioramento dei flussi di lavoro (Workflow Enhancement). Queste tre applicazioni rappresentano il ponte tra i dati clinici grezzi e un'assistenza più intelligente, veloce e personalizzata.

I **Clinical Decision Support Systems** sono sistemi progettati per affiancare il medico nelle decisioni diagnostiche e terapeutiche. In chirurgia maxillo-facciale, questi strumenti stanno trovando spazio nella gestione di casi complessi come i traumi orbito-zigomatici o le ricostruzioni post-oncologiche, offrendo raccomandazioni fondate su modelli predittivi allenati su grandi dataset clinici. L'algoritmo è in grado di analizzare immagini, parametri biometrici e linee guida, restituendo al chirurgo un supporto decisionale che può migliorare l'appropriatezza della cura e ridurre la variabilità tra operatori. Secondo quanto descritto in recenti studi, l'utilizzo di reti neurali profonde in questi sistemi ha dimostrato ottime performance nel riconoscimento automatico delle fratture orbitarie e nella predizione di complicanze postoperatorie [47, 48].

Accanto a questi sistemi, il **Natural Language Processing** rappresenta una delle frontiere più promettenti. Questa tecnologia consente ai computer di comprendere, estrarre e strutturare informazioni contenute in testi liberi come referti radiologici, note cliniche o resoconti operatori. In ambito maxillo-facciale, il NLP può essere utilizzato per trasformare automati-

camente un referto TC in un insieme di dati numerici utilizzabili per l'addestramento di modelli predittivi, per la generazione automatica di report preoperatori, o per monitorare l'andamento clinico di un paziente nel tempo. Alcuni modelli, descritti nella letteratura recente, sono stati già impiegati per analizzare in modo retrospettivo migliaia di casi clinici, migliorando l'identificazione precoce di pattern patologici o la codifica automatica delle diagnosi [49-50].

Infine, una terza area di applicazione riguarda il miglioramento dei flussi di lavoro clinico, ossia il **Workflow Enhancement**. L'intelligenza artificiale potrebbe essere integrata nei software di pianificazione chirurgica, nei sistemi PACS, ossia sistemi per l'archiviazione e trasmissione di immagini mediche digitali, e nei laboratori di stampa 3D, con l'obiettivo di automatizzare passaggi finora manuali e ridurre i tempi tecnici. È possibile, ad esempio, eseguire la segmentazione automatica dell'anatomia da una TC, generare in tempo reale un modello STL pronto per la stampa e predisporre dispositivi personalizzati come dime chirurgiche o impianti PSI, tutto all'interno di un unico flusso digitale coordinato. Questo approccio non solo migliora l'efficienza, ma consente anche una tracciabilità più accurata, una riduzione del rischio di errore e una valorizzazione del tempo clinico a disposizione del medico [51-53].

Nel loro insieme, queste tre applicazioni rendono l'AI una presenza sempre più pervasiva ma silenziosa, capace di ottimizzare il lavoro del team clinico, aumentare la sicurezza per il paziente e facilitare l'adozione di una medicina sempre più personalizzata e precisa.

AI e la personalizzazione della cura

Ogni volto è unico. Ogni paziente porta con sé una storia clinica, ma anche biologica, estetica, funzionale e psicologica. Per decenni, la chirurgia maxillo-faciale ha cercato di adattarsi a questa complessità,

pur dovendo operare spesso su basi standardizzate: immagini bidimensionali, modelli anatomici generici, protocolli chirurgici rigidi. Con l'avvento dell'intelligenza artificiale, però, sta cambiando tutto. Oggi, l'obiettivo non è più solo curare, ma curare meglio, in modo più preciso e profondamente personalizzato. L'AI consente di andare oltre la classificazione delle malattie: ci permette di riconoscere i dettagli che rendono ogni paziente diverso dall'altro. Grazie alla sua capacità di analizzare grandi quantità di dati – immagini mediche, informazioni cliniche, segnali funzionali, modelli anatomici – l'intelligenza artificiale potrebbe essere in grado di costruire profili terapeutici su misura, adattando diagnosi, planning e trattamento a ciascun individuo.

Una delle manifestazioni più tangibili di questa rivoluzione è l'elaborazione di modelli tridimensionali del volto e del cranio, costruiti a partire da TC, RM, o scansioni 3D del volto. Questi modelli virtuali, arricchiti da segmentazioni automatiche e da algoritmi di simulazione, diventano delle vere e proprie repliche digitali del paziente: non semplici copie, ma 'gemelli digitali' su cui è possibile esplorare diversi scenari chirurgici, testare soluzioni e prevedere con realismo l'aspetto postoperatorio. Con la guida dell'AI, il chirurgo può valutare millimetricamente gli effetti di uno spostamento mandibolare, prevedere la simmetria finale dopo una ricostruzione orbitale, o simulare la traiettoria di un impianto personalizzato.

Ma la personalizzazione non si ferma all'anatomia. L'AI è potenzialmente in grado di incrociare anche dati clinici e biologici, aiutando a identificare fattori di rischio individuali o prefigurare complicanze. Un paziente oncologico, ad esempio, non viene più trattato solo in base al tipo di tumore, ma anche in base alla sua risposta biologica prevista, al rischio di recidiva stimato dal modello, alla capacità di recupero del tessuto in quella specifica regione anatomica. In questo modo, l'intervento può essere modulato in

modo più conservativo o più radicale, con margini chirurgici personalizzati e ricostruzioni mirate.

Anche l'aspetto estetico della chirurgia – spesso sottovalutato nei protocolli classici – viene oggi valorizzato grazie all'AI. Attraverso modelli generativi (come le GAN - Generative Adversarial Networks), è possibile generare previsioni ultra-realistiche del volto postoperatorio, che tengano conto sia delle modifiche ossee che dei tessuti molli. Queste simulazioni sono utili sia al chirurgo, che può orientare le sue scelte, sia al paziente, che può visualizzare e comprendere meglio l'intervento a cui si sottoporrà. Questo aumenta la fiducia, la consapevolezza e il coinvolgimento attivo del paziente nella definizione del piano terapeutico [40].

La personalizzazione della cura passa anche per la creazione di dispositivi fisici su misura. Oggi, grazie alla combinazione di AI e stampa 3D, è possibile produrre splint occlusali, dime chirurgiche e impianti in titanio perfettamente adattati all'anatomia del singolo paziente, riducendo il rischio di errori intraoperatori e migliorando la stabilità dei risultati nel tempo.

Tutto questo porta alla realizzazione concreta di una medicina delle 5P: Predittiva, Personalizzata, Preventiva, Partecipativa e Precisa. L'AI rende possibile prevedere esiti, identificare terapie ottimali per ogni paziente, prevenire complicazioni, coinvolgere attivamente il malato nelle decisioni e garantire risultati chirurgici più affidabili e calibrati.

In sintesi, l'intelligenza artificiale non solo potenzia le mani e la mente del chirurgo, ma potrebbe trasformare il volto stesso della chirurgia. Da disciplina tecnica, si fa arte della precisione e della personalizzazione, riportando al centro la persona nella sua interezza. In un'epoca in cui la tecnologia rischia di disumanizzare, l'AI ci offre l'occasione opposta: curare meglio, perché curiamo ciascuno per ciò che è, non per ciò che rappresenta in una statistica.

Vantaggi pratici per chirurghi e pazienti [54]

L'ingresso dell'intelligenza artificiale (AI) nella chirurgia maxillo-facciale sta segnando un punto di svolta per tutta la disciplina. Non si tratta semplicemente dell'adozione di nuovi strumenti digitali, ma dell'inizio di una nuova mentalità clinica, più precisa, più predittiva e più orientata alla personalizzazione della cura. I vantaggi di questa tecnologia non si misurano solo in termini di innovazione, ma soprattutto in risultati clinici migliori, tempi ridotti e maggiore sicurezza per il paziente.

Uno dei principali punti di forza dell'AI è la capacità di analizzare in tempi rapidissimi grandi volumi di dati medici. Dove l'occhio umano fatica a cogliere certe sfumature – come microfratture, asimmetrie sottili o variazioni volumetriche nei tessuti – l'algoritmo può individuare pattern ricorrenti, confrontare migliaia di casi e restituire una valutazione accurata in tempo reale. Questo può migliorare notevolmente la diagnosi precoce di traumi e patologie complesse del distretto facciale, riducendo gli errori e rendendo la presa in carico del paziente più tempestiva.

Un altro beneficio tangibile è rappresentato dalla pianificazione chirurgica assistita. Grazie all'integrazione con software di imaging tridimensionale, l'AI consente di simulare in modo preciso spostamenti ossei, osteotomie e ricostruzioni. Il chirurgo può visualizzare il risultato previsto dell'intervento prima ancora di entrare in sala operatoria, valutando eventuali alternative e correggendo criticità già in fase preoperatoria. Questo non solo riduce il margine d'errore, ma consente una maggiore serenità nell'atto chirurgico, con una diminuzione documentata dei tempi operatori e delle complicanze.

La produzione automatica di dispositivi personalizzati è un altro fronte in cui l'AI sta facendo la differenza. Una volta che le immagini sono state segmentate e il piano chirurgico definito, l'intelligenza artificiale potenzialmente è in grado di generare i file per stampare

dime chirurgiche, splint o impianti su misura. Il tutto in modo automatico, senza necessità di modellazione manuale, abbattendo tempi di produzione e costi tecnici. In passato, ottenere un dispositivo personalizzato poteva richiedere giorni di lavoro.

Dal punto di vista della sicurezza clinica, l'AI può contribuire a un controllo oggettivo del postoperatorio, confrontando automaticamente le immagini acquisite dopo l'intervento con quelle preoperatorie e con il piano simulato. Questo permette di misurare scostamenti, valutare la precisione dell'intervento ed eventualmente intervenire precocemente in caso di deviazioni. È un modo per trasformare il follow-up in un processo non più solo clinico, ma anche analitico e misurabile, basato su dati reali.

Importante anche il ruolo dell'AI nella formazione dei giovani chirurghi. L'analisi automatica di grandi archivi di immagini e la creazione di percorsi di simulazione guidata permette di apprendere con maggiore efficacia, visualizzando le possibili soluzioni a un problema clinico, valutando le variabili anatomiche e confrontando le opzioni chirurgiche in modo interattivo.

Infine, c'è un vantaggio trasversale che riguarda l'intero ecosistema sanitario: l'ottimizzazione del tempo e delle risorse. Molte delle attività che l'AI può automatizzare – come la segmentazione delle immagini, la produzione di modelli 3D o l'elaborazione di referti – liberano tempo prezioso per il personale clinico, che può così concentrarsi su ciò che nessuna macchina potrà mai fare: ascoltare il paziente, valutare nel contesto, decidere con responsabilità e curare nella sua accezione più umana.

In conclusione, l'intelligenza artificiale non è solo una tecnologia avanzata: è una leva per migliorare concretamente l'efficienza e la qualità della chirurgia maxillo-facciale, riducendo gli errori, potenziando la precisione e offrendo ai pazienti percorsi di cura sempre più su misura. Il suo valore, in fondo, si basa non tanto nella complessità degli algoritmi, quanto

nella semplicità con cui riesce a restituire al chirurgo ciò che davvero conta: più tempo, più controllo, più qualità per il paziente.

Limiti e criticità dell'uso dell'AI in chirurgia [54]

Per quanto l'intelligenza artificiale stia cambiando il volto della chirurgia maxillo-facciale, è fondamentale mantenere uno sguardo critico e realistico. Nessuna tecnologia, per quanto sofisticata, è priva di limiti. E se l'AI è in grado di offrire supporti straordinari nella diagnosi, nella pianificazione e nella realizzazione dell'intervento, è altrettanto vero che il suo utilizzo porta con sé delle criticità tecniche, etiche, cliniche e organizzative che non possono essere ignorate. Uno dei principali ostacoli riguarda la qualità e la quantità dei dati disponibili. L'intelligenza artificiale ha bisogno di essere addestrata su dataset ampi, vari e ben etichettati per funzionare correttamente. Tuttavia, in medicina – e in particolare in chirurgia maxillo-facciale – i dati realmente utilizzabili sono spesso pochi, non standardizzati, eterogenei per qualità o provenienza. Immagini TC acquisite con protocolli diversi, referti scritti con stili variabili, nomenclature anatomiche non uniformi: tutto questo può compromettere l'accuratezza dell'algoritmo. Inoltre, quando i dati usati per addestrare un modello non rappresentano tutta la varietà reale dei pazienti (per età, sesso, etnia, tipo di patologia), si rischia di introdurre dei *bias* (ossia degli errori) che rendono il sistema meno affidabile e persino ingiusto.

C'è poi un limite concettuale che riguarda la comprensibilità del processo decisionale. Molti algoritmi AI – in particolare quelli basati su reti neurali profonde – funzionano come vere e proprie 'scatole nere': sono in grado di fornire un risultato estremamente preciso, ma senza spiegare in modo chiaro come siano arrivati a quella conclusione. Questo pone un problema di trasparenza: in medicina, ogni decisione deve essere giustificabile, comprensibile e tracciabile, soprattutto

to quando si tratta di scelte chirurgiche complesse. L'uso di modelli cosiddetti 'black-box' può entrare in conflitto con l'etica clinica e con la necessità, da parte del chirurgo, di assumersi la responsabilità dell'atto medico.

Un'altra criticità importante è la dipendenza tecnologica. La crescente integrazione dell'AI nei flussi di lavoro rischia di generare un eccessivo affidamento sui sistemi automatizzati. In altre parole, se non si mantengono aggiornate le competenze cliniche e chirurgiche tradizionali, esiste il pericolo che il medico diventi un semplice esecutore passivo delle indicazioni fornite dalla macchina. È invece fondamentale che l'AI venga sempre utilizzata come strumento di supporto e non come sostituto della decisione clinica. Dal punto di vista clinico, alcuni modelli predittivi sono ancora in fase sperimentale e non hanno ricevuto validazione su larga scala. I rischi di errori diagnostici, sovrastima o sottostima dei risultati, oppure suggerimenti non appropriati, sono ancora presenti. Inoltre, l'adozione dell'AI in sala operatoria richiede spesso formazione specifica, aggiornamento continuo e una cultura del dato che non è ancora diffusa in tutte le strutture sanitarie.

Non meno rilevante è la questione della privacy e della protezione dei dati. I sistemi AI funzionano analizzando grandi quantità di dati sensibili: immagini radiologiche, cartelle cliniche, fotografie del volto. È fondamentale che questi dati vengano gestiti nel rispetto del regolamento europeo GDPR, protetti da attacchi informatici e impiegati esclusivamente a fini clinici o di ricerca, con il pieno consenso informato del paziente.

Infine, va considerato il costo iniziale di implementazione delle tecnologie basate su AI. Non tutte le strutture ospedaliere dispongono di risorse economiche, infrastrutture informatiche e personale formato per utilizzare questi sistemi in modo efficace. La conseguenza è un'adozione disomogenea sul territorio, che

rischia di aumentare il divario tra centri di eccellenza e realtà meno strutturate.

In sintesi, l'intelligenza artificiale offre enormi potenzialità, ma il suo impiego richiede consapevolezza, spirito critico e soprattutto un approccio medico centrato sull'uomo. Solo mantenendo il chirurgo al centro del processo decisionale – e non la macchina – sarà possibile integrare la tecnologia nel percorso di cura in modo etico, responsabile e realmente utile. L'AI è una risorsa preziosa, ma non è (né deve diventare) una guida autonoma: deve restare uno strumento al servizio della conoscenza, della competenza e dell'empatia clinica.

Uno sguardo al futuro: chirurgia aumentata e medicina predittiva

Guardare al futuro dell'intelligenza artificiale in chirurgia maxillo-facciale non significa immaginare scenari fantascientifici, ma riconoscere una traiettoria già in atto. Se oggi l'AI è ancora vista come un supporto tecnico o come un ausilio per specifici compiti, nei prossimi anni il suo ruolo diventerà sempre più integrato, continuo, trasversale. Non sarà più una 'tecnologia in più', ma parte integrante dell'identità professionale del chirurgo del futuro.

Uno dei principali sviluppi riguarderà la standardizzazione e l'interoperabilità. I sistemi AI non lavoreranno più come strumenti separati, ciascuno con il proprio software e flusso dati, ma saranno integrati in ecosistemi clinici completi, in grado di scambiare informazioni in tempo reale tra piattaforme di imaging, sistemi di pianificazione, stampa 3D, cartelle cliniche elettroniche e sale operatorie digitali. Questo permetterà una vera medicina connessa, in cui il dato segue il paziente lungo tutto il suo percorso di cura, senza interruzioni.

Parallelamente, si assisterà a una crescente personalizzazione dinamica della chirurgia, dove l'intelligenza artificiale non solo suggerirà le strategie più efficaci,

ma sarà anche in grado di adattarle continuamente in base ai dati raccolti in tempo reale. La chirurgia ortognatica, per esempio, potrà beneficiare di modelli predittivi in grado di correggere le simulazioni man mano che cambiano le condizioni del paziente o emergono nuove evidenze. In oncologia, invece, sarà possibile integrare AI con dati molecolari e genetici per proporre resezioni e ricostruzioni sempre più individualizzate e biologicamente mirate.

Un'ulteriore frontiera sarà l'interazione tra AI e tecnologie immersive, come la realtà aumentata e la chirurgia guidata in tempo reale. Grazie a queste sinergie, il chirurgo potrà vedere sovrapposte alle immagini anatomiche del paziente – durante l'intervento stesso – informazioni generate dall'intelligenza artificiale: margini di resezione consigliati, percorsi vascolari critici, angolazioni ottimali per un'osteotomia. Tutto questo contribuirà a una chirurgia più precisa, meno invasiva e più sicura.

Un ambito in forte crescita sarà anche quello dei modelli predittivi a lungo termine, che non si limiteranno più a stimare l'esito immediato di un intervento, ma potranno suggerire strategie per ridurre il rischio di recidiva, migliorare la qualità della vita, ottimizzare i tempi di recupero. L'obiettivo non sarà più solo correggere una malformazione o rimuovere un tumore, ma anticipare gli effetti sul futuro del paziente, anche sul piano estetico, funzionale, psicologico.

Dal punto di vista organizzativo, è lecito aspettarsi una progressiva democratizzazione dell'accesso all'AI. Oggi, molte tecnologie sono disponibili solo nei centri ad alta specializzazione; domani, grazie a modelli open-source, piattaforme cloud e algoritmi leggeri, anche ospedali periferici o ambulatori potranno integrare l'intelligenza artificiale nel loro quotidiano. Questo ridurrà le disuguaglianze e permetterà una chirurgia di qualità anche in contesti con meno risorse.

Ma il futuro dell'AI in chirurgia maxillo-facciale non

è fatto solo di tecnica. Crescerà l'attenzione verso l'etica, la trasparenza e la sostenibilità. Gli algoritmi diventeranno più interpretabili, più controllabili, più sicuri. Saranno costruiti con attenzione ai *bias*, verificati su campioni rappresentativi, progettati per essere al servizio – e non al posto – del medico. E con l'introduzione dell'AI Act europeo e di nuove normative bioetiche, sarà sempre più chiaro il ruolo dell'uomo come garante della responsabilità clinica.

In questo scenario, la figura del chirurgo maxillo-facciale si evolverà. Non sarà più solo un tecnico esperto nell'atto operatorio, ma un professionista in grado di dialogare con la tecnologia, interpretare i dati, guidare l'AI nella direzione giusta, costruendo insieme al paziente un percorso di cura più umano, più consapevole, più efficace.

Il futuro è già in cammino. E se lo affrontiamo con competenza, etica e visione, l'intelligenza artificiale sarà molto più che uno strumento: sarà la chiave per una chirurgia maxillo-facciale più moderna, più inclusiva e, soprattutto, più vicina alle persone.

Intelligenza artificiale sì, ma con intelligenza umana

La chirurgia maxillo-facciale è una delle discipline più complesse e affascinanti della medicina: ricostruisce, corregge, restituisce funzione, ma soprattutto ridà volto e dignità alla persona. In questo contesto, l'intelligenza artificiale non è solo uno strumento tecnico: è una sfida culturale. È la possibilità di amplificare le nostre capacità, di prendere decisioni più consapevoli, di offrire cure più precise. Ma è anche – e deve rimanere – una tecnologia al servizio dell'essere umano, mai un suo sostituto.

Abbiamo visto come l'AI possa segmentare immagini, riconoscere patologie, prevedere esiti, suggerire trattamenti, automatizzare compiti ripetitivi. Eppure, nessun algoritmo è in grado di cogliere l'inquietudine di un paziente prima di un intervento, la delicatezza di una comunicazione postoperatoria, l'intuizione clini-

ca maturata in anni di esperienza, il 'sesto senso' del chirurgo quando tutto sembra perfetto ma qualcosa ancora non torna.

È qui che entra in gioco un concetto centrale, oggi più che mai attuale: la tecnoumanizzazione della medicina. Una visione che non contrappone la macchina all'uomo, ma che integra – armonizza – l'efficienza della tecnologia con la profondità dell'intelligenza emotiva, relazionale, etica. È la sintesi tra innovazione e cura, tra progresso e ascolto. Come scrivevamo nella prefazione di questo volume, non basta introdurre nuove tecnologie se non si tiene conto della persona nella sua interezza. Serve un approccio che metta davvero al centro il paziente, i suoi bisogni, le sue fragilità, le sue aspettative.

L'intelligenza artificiale potenzia le possibilità della chirurgia, ma non può guidarla da sola. Spetta a noi medici e chirurghi decidere quando fidarci del modello e quando dubitare, quando seguire l'indicazione algoritmica e quando modificarla in base a ciò che vediamo, sentiamo, intuiamo. L'AI può calcolare il volume ideale per un impianto orbitario, ma non può cogliere l'impatto psicologico di uno sguardo che cambia. Può prevedere il rischio oncologico con grande accuratezza, ma non sa come restituire speranza a chi lo vive.

Per questo, il futuro che immaginiamo non è fatto di intelligenza artificiale 'al posto' di quella umana, ma di intelligenza aumentata: una medicina potenziata dai dati, sì, ma radicata nella relazione, nella responsabilità, nella consapevolezza. Una chirurgia che sappia usare algoritmi per tagliare meglio, ricostruire meglio, ma che non dimentichi mai perché e per chi opera. L'adozione dell'AI in medicina richiede competenza, certo, ma anche umiltà. È facile farsi affascinare dalla precisione del calcolo e dalla bellezza delle simulazioni, ma dobbiamo ricordare che non tutto ciò che è misurabile è significativo, e non tutto ciò che è significativo può essere automatizzato. La cura è fatta anche di attese, di errori, di parole, di silenzi.

Di ciò che nessuna rete neurale potrà mai replicare. In definitiva, possiamo – e dobbiamo – dire sì all'intelligenza artificiale. Ma dobbiamo farlo con l'intelligenza umana. Con l'attenzione di chi non si accontenta dell'efficienza, ma cerca il senso. Con la prudenza di chi sa che ogni decisione incide su una persona reale. Con la consapevolezza che la chirurgia del futuro sarà davvero innovativa solo se saprà restare profondamente umana.

Realtà aumentata: quando la chirurgia incontra il digitale



Cos'è la realtà aumentata?

Fino a pochi anni fa, l'idea che un chirurgo potesse vedere attraverso i tessuti del viso, 'guidato' da immagini virtuali sovrapposte al campo operatorio, sembrava fantascienza. Oggi è realtà, anzi, realtà aumentata. In chirurgia maxillo-facciale, questa tecnologia si sta affermando come un alleato prezioso, capace di migliorare precisione, sicurezza e persino l'ergonomia del gesto operatorio.

La realtà aumentata (AR) è una tecnologia che sovrappone informazioni digitali (immagini, dati, modelli 3D) al mondo reale. In campo medico questo significa che un chirurgo può visualizzare, ad esempio, una ricostruzione tridimensionale dei nervi facciali o del tumore da asportare, proiettata direttamente sul volto del paziente o visibile tramite visori o schermi dedicati.

Non va confusa con la realtà virtuale (VR), che crea un ambiente completamente digitale. L'AR invece 'aumenta' ciò che si vede, arricchendolo con contenuti rilevanti per l'atto chirurgico [55].

Origini e sviluppo storico

Il concetto di AR nasce nei contesti militare e aerospaziale negli anni Novanta. La sua applicazione chirurgica

inizia con sperimentazioni in ortopedia, poi si evolve verso la maxillo-facciale grazie alla diffusione di scanner 3D ad alta risoluzione e visori ottici avanzati. Oggi la ricerca si concentra su come integrare AR nel flusso clinico quotidiano e non solo in studi sperimentali [55].

Come funziona nella pratica?

Il principio è semplice: si parte da una pianificazione chirurgica digitale (Virtual Surgical Planning), spesso basata su scansioni di TC, risonanza magnetica o scansioni 3D del paziente. Questa pianificazione viene trasformata in modelli virtuali che, durante l'intervento, possono essere sovrapposti in tempo reale al volto del paziente [55, 56].

Tutto ciò può avvenire in diversi modi:

- con visori Head-Mounted Display (HMD), come Microsoft HoloLens[®] (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) o MetaQuest 3[™] (Meta Platforms, Menlo Park, CA, USA), che proiettano ologrammi nello spazio (fig. 12);
- tramite schermi trasparenti, come i cosiddetti 'heads-up displays', integrati nei microscopi o nelle lenti operatorie;
- mediante tablet o telecamere chirurgiche, che restituiscono in tempo reale un'immagine aumentata del campo.

Uno studio recente ha proposto una classificazione dei sistemi AR in chirurgia maxillo-facciale, distinguendo quelli con realtà aumentata ottica (che sovrappongono le immagini all'occhio umano) da quelli con realtà aumentata video (che le integrano in una visualizzazione su schermo). Ognuno ha vantaggi e limiti, ma l'obiettivo comune è chiaro: migliorare l'accuratezza e la sicurezza dell'intervento [56].

A cosa serve la realtà aumentata?

Gli ambiti di applicazione sono molteplici e in rapida espansione [57-60]:

- oncologia testa-collo: la AR permette di visua-

lizzare margini di resezione, vasi e nervi prima ancora di incidere la pelle. Tel et al. (2023), hanno descritto l'uso di visori AR per 'navigare' nei compartimenti profondi della faccia, migliorando l'accesso a tumori difficili come quelli della base cranica o del massiccio zigomatico;

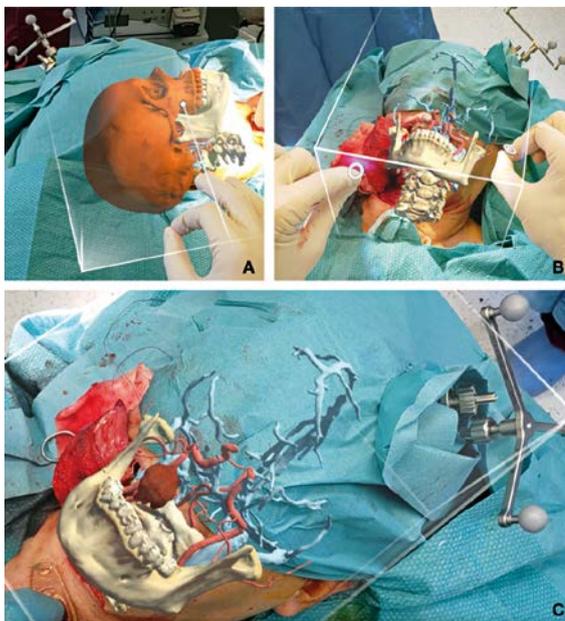
- **traumatologia:** in caso di fratture complesse, la ricostruzione tridimensionale proiettata sul volto guida la riduzione ossea come un GPS chirurgico. Laskay et al. (2023) hanno mostrato che l'AR può ridurre tempi operatori e complicanze in casi di fratture orbitarie e mandibolari;
- **chirurgia ortognatica e malformativa:** la realtà aumentata può aiutare a mantenere l'allineamento dei segmenti ossei secondo il piano virtuale, migliorando la simmetria e riducendo l'uso di guide fisiche;
- **educazione e formazione:** Ayoub e Pulijala (2019) sottolineano come AR e VR siano strumenti potentissimi per l'insegnamento chirurgico, simulando interventi in modo interattivo e personalizzato. Gli studenti possono esercitarsi su modelli virtuali, esplorare l'anatomia con un dito e osservare interventi 'aumentati' da casa (fig. 13).

Vantaggi concreti per chirurghi e pazienti

La realtà aumentata non è più una curiosità tecnologica, ma uno strumento che sta già cambiando il modo di operare in chirurgia maxillo-facciale. Le ricerche più recenti, mostrano come questa tecnologia offra benefici concreti sia per i chirurghi che per i pazienti. Innanzitutto, permette di lavorare con una precisione superiore, poiché le proiezioni tridimensionali direttamente sul campo operatorio aiutano a individuare con esattezza strutture delicate come nervi, vasi sanguigni e ossa. Ciò riduce sensibilmente il rischio di errori e aumenta la sicurezza dell'intervento. La maggiore chiarezza operativa si traduce anche in un risparmio di tempo: con meno incertezze e manovre superflue,



12



13

12 Meta Quest 3™ (Meta Platforms, Menlo Park, CA, USA).

13 Acquisizioni intraoperatorie in realtà aumentata.

l'intervento diventa più rapido e lineare, riducendo il tempo che il paziente trascorre in sala operatoria. La realtà aumentata migliora anche l'ergonomia per il chirurgo. Tutte le informazioni necessarie – immagini radiologiche, modelli 3D e dati clinici – sono disponibili direttamente nel suo campo visivo, senza la necessità di distogliere lo sguardo per consultare altri schermi. Infine, questa tecnologia facilita il dialogo con il paziente: visualizzare in 3D il proprio caso aiuta a comprendere meglio le fasi dell'intervento e a ridurre l'ansia che spesso accompagna il percorso chirurgico [58].

Le sfide da affrontare

Nonostante il suo grande potenziale, la realtà aumentata in chirurgia maxillo-facciale non è ancora una tecnologia del tutto matura. Restano diversi ostacoli tecnici e clinici da affrontare prima che diventi uno standard di uso quotidiano.

Uno dei principali problemi è la calibrazione: allineare con precisione il modello virtuale al paziente reale richiede strumenti di tracciamento estremamente accurati, e basta un piccolo errore per compromettere l'affidabilità della proiezione. Anche la latenza, cioè il ritardo con cui le immagini vengono aggiornate nel visore, può interferire con la concentrazione del chirurgo, soprattutto durante procedure complesse che richiedono movimenti rapidi e precisi. A ciò si aggiunge la questione dei visori stessi, che spesso risultano ancora costosi o ingombranti, anche se l'evoluzione tecnologica sta portando rapidamente a modelli più leggeri e accessibili.

Infine, un aspetto cruciale riguarda la validazione clinica. Gran parte degli studi disponibili è ancora preliminare, condotta su pochi casi o in contesti sperimentali, e serve quindi una base di evidenze più solida per confermare l'efficacia e la sicurezza di queste soluzioni. Nonostante queste sfide, la direzione è chiara: la realtà aumentata si sta muovendo verso

un'integrazione sempre più concreta nella pratica chirurgica, e i progressi tecnologici degli ultimi anni indicano che il suo impiego diventerà sempre più comune.

Il futuro: chirurgia aumentata, davvero

In futuro, la chirurgia maxillo-facciale sarà sempre più 'aumentata'. Le immagini radiologiche, il piano chirurgico, i margini di resezione e persino le indicazioni dinamiche (come il battito cardiaco o il tracciato nervoso) potranno essere visibili in tempo reale, in sovrapposizione al paziente.

Un passo ulteriore sarà l'integrazione tra realtà aumentata, intelligenza artificiale e robotica: il chirurgo vedrà il piano, ma anche le 'decisioni suggerite', e potrà applicarle con strumenti guidati da algoritmi predittivi.

In questa chirurgia del futuro, il sapere anatomico del chirurgo sarà amplificato da una visione digitale stratificata, capace di rendere l'invisibile... visibile.

Bibliografia



- [1] Hua J, Aziz S, Shum JW. Virtual Surgical Planning in Oral and Maxillofacial Surgery. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am.* 2019;31(4):519-530. doi:10.1016/j.coms.2019.07.011
- [2] Alkaabi S, Maningky M, Helder MN, Alsabri G. Virtual and traditional surgical planning in orthognathic surgery - systematic review and meta-analysis. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2022;60(9):1184-1191. doi:10.1016/j.bjoms.2022.07.007
- [3] Chen J, Abousy M, Girard A, et al. The Impact of Virtual Surgical Planning on Orthognathic Surgery: Contributions From Two Specialties. *J Craniofac Surg.* 2022;33(5):1418-1423. doi:10.1097/SCS.00000000000008607
- [4] Jones EA, Huang AT. Virtual Surgical Planning in Head and Neck Reconstruction. *Otolaryngol Clin North Am.* 2023;56(4):813-822. doi:10.1016/j.otc.2023.04.013
- [5] Parthasarathy J, Jonard B, Rees M, Selvaraj B, Scharschmidt T. Virtual surgical planning and 3D printing in pediatric musculoskeletal oncological resections: a proof-of-concept description. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2023;18(1):95-104. doi:10.1007/s11548-022-02745-6
- [6] Sembronio S, Tel A, Costa F, Isola M, Robiony M. Accuracy of custom-fitted temporomandibular joint

- alloplastic reconstruction and virtual surgical planning. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2019;48(8):1077-1083. doi:10.1016/j.ijom.2019.01.024
- [7] Tel A, Arboit L, De Martino M, Isola M, Sembronio S, Robiony M. Systematic review of the software used for virtual surgical planning in craniomaxillofacial surgery over the last decade. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2023;52(7):775-786. doi:10.1016/j.ijom.2022.11.011
- [8] Thakker JS, Pace M, Lowe I, Jung P, Herford AS. Virtual Surgical Planning in Maxillofacial Trauma. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am*. 2019;27(2):143-155. doi:10.1016/j.cxom.2019.05.006
- [9] Tel A, Robiony M, Sembronio S. Integrating Virtual Planning and three-dimensional Printing for Craniofacial Trauma Management. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*. Published online May 17, 2025:S1042-3699(25)00021-4. doi:10.1016/j.coms.2025.04.009
- [10] Tel A, Bagatto D, Tuniz F, et al. The evolution of craniofacial resection: A new workflow for virtual planning in complex craniofacial procedures. *J Craniomaxillofac Surg*. 2019;47(9):1475-1483. doi:10.1016/j.jcms.2019.06.016
- [11] Sembronio S, Tel A, Costa F, Robiony M. An Updated Protocol for the Treatment of Condylar Hyperplasia: Computer-Guided Proportional Condylectomy. *J Oral Maxillofac Surg*. 2019;77(7):1457-1465. doi:10.1016/j.joms.2019.02.008
- [12] Vyas K, Gibreel W, Mardini S. Virtual Surgical Planning (VSP) in Craniomaxillofacial Reconstruction. *Facial Plast Surg Clin North Am*. 2022;30(2):239-253. doi:10.1016/j.fsc.2022.01.016
- [13] Tel A, Costa F, Sembronio S, Robiony M. Contemporary management of complex craniofacial trauma: virtual planning, navigation and the novel thermoformed cage splints in a strategic, sequential, computer-guided protocol. *J Craniomaxillofac Surg*. 2022;50(11):837-847. doi:10.1016/j.jcms.2022.09.010
- [14] Tel A, Costa F, Sembronio S, Lazzarotto A, Robiony M. All-in-one surgical guide: A new method for cra-

- nia vault resection and reconstruction. *J Cranio-maxillofac Surg*. 2018;46(6):967-973. doi:10.1016/j.jcms.2018.03.020
- [15] Whitaker M. The history of 3D printing in healthcare. *Bulletin*. 2014;96(7):228-229. doi:10.1308/147363514X13990346756481
- [16] AlAli AB, Griffin MF, Butler PE. Three-Dimensional Printing Surgical Applications. *Eplasty*. 2015;15:e37.
- [17] Wong TM, Jin J, Lau TW, et al. The use of three-dimensional printing technology in orthopaedic surgery. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2017;25(1):2309499016684077. doi:10.1177/2309499016684077
- [18] Christensen A, Rybicki FJ. Maintaining safety and efficacy for 3D printing in medicine. *3D Printing in Medicine*. 2017;3:1. doi:10.1186/s41205-016-0009-5
- [19] Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online*. 2016;15(1):115. doi:10.1186/s12938-016-0236-4
- [20] Lin N, Gagnon M, Wu KY. The Third Dimension of Eye Care: A Comprehensive Review of 3D Printing in Ophthalmology. *Hardware*. 2024;2(1):1-32. doi:10.3390/hardware2010001
- [21] Della Bona A, Cantelli V, Britto VT, Collares KF, Stansbury JW. 3D printing restorative materials using a stereolithographic technique: a systematic review. *Dent Mater*. 2021;37(2):336-350. doi:10.1016/j.dental.2020.11.030
- [22] Wang X, Mu M, Yan J, Han B, Ye R, Guo G. 3D printing materials and 3D printed surgical devices in oral and maxillofacial surgery: design, workflow and effectiveness. *Regen Biomater*. 2024;11:rbae066. doi:10.1093/rb/rbae066
- [23] Annino DJ, Hansen EE, Sethi RK, et al. Accuracy and outcomes of virtual surgical planning and 3D-printed guides for osseous free flap reconstruction of mandibular osteoradionecrosis. *Oral Oncology*. 2022;135:106239. doi:10.1016/j.oraloncology.2022.106239

- [24] Malenova Y, Ortner F, Liokatis P, et al. Accuracy of maxillary positioning using computer-designed and manufactured occlusal splints or patient-specific implants in orthognathic surgery. *Clin Oral Investig*. 2023;27(9):5063-5072. doi:10.1007/s00784-023-05125-9
- [25] Chen H, Bi R, Hu Z, et al. Comparison of three different types of splints and templates for maxilla repositioning in bimaxillary orthognathic surgery: a randomized controlled trial. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2021;50(5):635-642. doi:10.1016/j.ijom.2020.09.023
- [26] Pu JJ, Choi WS, Yeung WK, Yang WF, Zhu WY, Su YX. A Comparative Study on a Novel Fibula Malleolus Cap to Increase the Accuracy of Oncologic Jaw Reconstruction. *Front Oncol*. 2022;11. doi:10.3389/fonc.2021.743389
- [27] Moiduddin K, Mian SH, Umer U, Alkhalefah H, Ahmed F, Hashmi FH. Design, Analysis, and 3D Printing of a Patient-Specific Polyetheretherketone Implant for the Reconstruction of Zygomatic Deformities. *Polymers*. 2023;15(4):886. doi:10.3390/polym15040886
- [28] Khorsandi D, Fahimipour A, Abasian P, et al. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. *Acta Biomater*. 2021;122:26-49. doi:10.1016/j.actbio.2020.12.044
- [29] Bachelet JT, Cordier G, Porcheray M, Bourlet J, Gleizal A, Foletti JM. Orbital Reconstruction by Patient-Specific Implant Printed in Porous Titanium: A Retrospective Case Series of 12 Patients. *J Oral Maxillofac Surg*. 2018;76(10):2161-2167. doi:10.1016/j.joms.2018.04.006
- [30] Kang S, Kwon J, Ahn CJ, et al. Generation of customized orbital implant templates using 3-dimensional printing for orbital wall reconstruction. *Eye (Lond)*. 2018;32(12):1864-1870. doi:10.1038/s41433-018-0193-1
- [31] Kim YC, Min KH, Choi JW, Koh KS, Oh TS, Jeong

- WS. Patient-specific puzzle implant preformed with 3D-printed rapid prototype model for combined orbital floor and medial wall fracture. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*. 2018;71(4):496-503. doi:10.1016/j.bjps.2017.11.016
- [32] Martinez-Seijas P, Díaz-Galvis LA, Hernando J, Leizaola-Cardesa IO, Aguilar-Salvatierra A, Gómez-Moreno G. Polymethyl Methacrylate Custom-Made Prosthesis: A Novel Three-Dimension Printing-Aided Fabrication Technique for Cranial and/or Orbital Reconstruction. *Journal of Craniofacial Surgery*. 2018;29(5):e438. doi:10.1097/SCS.0000000000004451
- [33] Le Clerc N, Baudouin R, Carlevan M, Khoueir N, Verillaud B, Herman P. 3D titanium implant for orbital reconstruction after maxillectomy. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2020;73(4):732-739. doi:10.1016/j.bjps.2019.11.014
- [34] Zhao Z, Bao J, Shen G, Cai M, Yu H. Integrating Virtual Surgical Planning and 3D-Printed Tools with Iliac Bone Grafts for Orbital and Zygomatic Reconstruction in Hemifacial Microsomia Patients. *Journal of Clinical Medicine*. 2023;12(24):7538. doi:10.3390/jcm12247538
- [35] Yo K, Nishimura K, Takahashi Y, et al. Comparison of the decompressive effect of different surgical procedures for dysthyroid optic neuropathy using 3D printed models. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. 2022;260(9):3043. doi:10.1007/s00417-022-05645-2
- [36] Rama M, Schlegel L, Wisner D, et al. Using three-dimensional printed models for trainee orbital fracture education. *BMC Medical Education*. 2023;23:467. doi:10.1186/s12909-023-04436-5
- [37] Lichtenstein JT, Zeller AN, Lemound J, et al. 3D-Printed Simulation Device for Orbital Surgery. *Journal of Surgical Education*. 2017;74(1):2-8. doi:10.1016/j.jsurg.2016.07.005
- [38] Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol*. 2014;32(8):773-785. doi:10.1038/nbt.2958
- [39] Michelutti L, Tel A, Robiony M, et al. The Properties and Applicability of Bioprinting in the Field of Max-

- illofacial Surgery. *Bioengineering*. 2025;12(3):251. doi:10.3390/bioengineering12030251
- [40] Michelutti L, Tel A, Zeppieri M, et al. Generative Adversarial Networks (GANs) in the Field of Head and Neck Surgery: Current Evidence and Prospects for the Future-A Systematic Review. *J Clin Med*. 2024;13(12):3556. doi:10.3390/jcm13123556
- [41] Chen MM, Terzic A, Becker AS, et al. Artificial intelligence in oncologic imaging. *European Journal of Radiology Open*. 2022;9:100441. doi:10.1016/j.ejro.2022.100441
- [42] Choi RY, Coyner AS, Kalpathy-Cramer J, Chiang MF, Campbell JP. Introduction to Machine Learning, Neural Networks, and Deep Learning. *Transl Vis Sci Technol*. 9(2):14. doi:10.1167/tvst.9.2.14
- [43] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015;521(7553):436-444. doi:10.1038/nature14539
- [44] Shen D, Wu G, Suk HI. Deep Learning in Medical Image Analysis. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2017;19(Volume 19, 2017):221-248. doi:10.1146/annurev-bioeng-071516-044442
- [45] Zhang L, Li W, Lv J, et al. Advancements in oral and maxillofacial surgery medical images segmentation techniques: An overview. *J Dent*. 2023;138:104727. doi:10.1016/j.jdent.2023.104727
- [46] Fontenele RC, Gerhardt M do N, Picoli FF, et al. Convolutional neural network-based automated maxillary alveolar bone segmentation on cone-beam computed tomography images. *Clin Oral Implants Res*. 2023;34(6):565-574. doi:10.1111/clr.14063
- [47] Katsoulakis E, Wang Q, Wu H, et al. Digital twins for health: a scoping review. *npj Digit Med*. 2024;7(1):1-11. doi:10.1038/s41746-024-01073-0
- [48] Saha A, Bosma JS, Twilt JJ, et al. Artificial intelligence and radiologists in prostate cancer detection on MRI (PI-CAI): an international, paired, non-inferiority, confirmatory study. *Lancet Oncol*. 2024;25(7):879-887. doi:10.1016/S1470-2045(24)00220-1
- [49] Chi WN, Reamer C, Gordon R, et al. Continuous Remote Patient Monitoring: Evaluation of the Heart Failure Cascade Soft Launch. *Appl Clin Inform*. 2021;12(5):1161-1173. doi:10.1055/s-0041-1740480

- [50] Ayers JW, Poliak A, Dredze M, et al. Comparing Physician and Artificial Intelligence Chatbot Responses to Patient Questions Posted to a Public Social Media Forum. *JAMA Intern Med.* 2023;183(6):589-596. doi:10.1001/jamainternmed.2023.1838
- [51] Khera R, Oikonomou EK, Nadkarni GN, et al. Transforming Cardiovascular Care With Artificial Intelligence: From Discovery to Practice. *JACC.* 2024;84(1):97-114. doi:10.1016/j.jacc.2024.05.003
- [52] Bizzo BC, Almeida RR, Alkasab TK. Computer-Assisted Reporting and Decision Support in Standardized Radiology Reporting for Cancer Imaging. *JCO Clin Cancer Inform.* 2021;(5):426-434. doi:10.1200/CCI.20.00129
- [53] Oh N, Kim JH, Rhu J, et al. Automated 3D liver segmentation from hepatobiliary phase MRI for enhanced preoperative planning. *Sci Rep.* 2023;13(1):17605. doi:10.1038/s41598-023-44736-w
- [54] Michelutti L, Tel A, Robiony M, et al. Updates, Applications and Future Directions of Deep Learning for the Images Processing in the Field of Cranio-Maxillo-Facial Surgery. *Bioengineering.* 2025;12(6):585. doi:10.3390/bioengineering12060585
- [55] Ayoub A, Pulijala Y. The application of virtual reality and augmented reality in Oral & Maxillofacial Surgery. *BMC Oral Health.* 2019;19(1):238. doi:10.1186/s12903-019-0937-8
- [56] Bosc R, Fitoussi A, Hersant B, Dao TH, Meningaud JP. Intraoperative augmented reality with heads-up displays in maxillofacial surgery: a systematic review of the literature and a classification of relevant technologies. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2019;48(1):132-139. doi:10.1016/j.ijom.2018.09.010
- [57] Laskay NMB, George JA, Knowlin L, Chang TP, Johnston JM, Godzik J. Optimizing Surgical Performance Using Preoperative Virtual Reality Planning: A Systematic Review. *World J Surg.* 2023;47(10):2367-2377. doi:10.1007/s00268-023-07064-8
- [58] Stucki J, Dastgir R, Baur DA, Quereshy FA. The use of virtual reality and augmented reality in oral and maxillofacial surgery: A narrative review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2024;137(1):12-18. doi:10.1016/j.oooo.2023.07.001

- [59] Tel A, Bagatto D, Costa F, Sembronio S, Robiony M. Anatomical Computerized Exploration to Excise Malignancies in Deep Facial Compartments: An Advanced Virtual Reality Protocol for a Tailored Surgical Approach. *Front Oncol.* 2022;12:875990. doi:10.3389/fonc.2022.875990
- [60] Tel A, Raccampo L, Vinayahalingam S, et al. Complex Craniofacial Cases through Augmented Reality Guidance in Surgical Oncology: A Technical Report. *Diagnostics (Basel)*. 2024;14(11):1108. doi:10.3390/diagnostics14111108

Collega—menti Quaderni

01 Giuseppina Azzarello, Sara Marmai, Anna Monte, *Le voci degli antichi. I papiri greci e latini raccontano*, 2025

02 Alberto Sdegno, *Città ideali città virtuali. Rappresentare l'architettura con le tecnologie digitali*, 2025

03 Salvatore Amaduzzi, Dario Bertocchi, Pietro Liberi, *Studiare il turismo tramite i Geo Big Data. Comportamenti, geografie e territori*, 2025

04 Lorenzo Passera, Elisabetta Scarton, *Gli antenati della firma digitale. Storia e uso del sigillo nel mondo antico e medievale*, 2025

05 Massimo Robiony, Alessandro Tel, Elisabetta Ocello, Lorenzo Marini, Luca Michelutti, *Quando la tecnologia incontra l'umano. La chirurgia tra realtà e ricerca*, 2025

06 Antonio Dell'Acqua, Alessandro Mortera, *Viaggio a Gerasa. Alla scoperta di una città romana d'Oriente*, 2025

07 Giada Rossi, *Comunicare l'acqua. Metodi e buone pratiche per una cultura consapevole*, 2025

L'antico dibattito tra il vecchio e il nuovo che avanza rappresenta da sempre un campo di battaglia per definire il senso profondo della parola 'progresso'. In chirurgia maxillo-facciale questo confronto si traduce nella sfida di integrare l'innovazione senza perdere di vista l'umano. Nasce in questo modo il concetto di 'tecnoumanizzazione', che ci guida verso la 'Società 5.0' in linea con l'agenda 2030: le innovazioni tecnologiche come intelligenza artificiale, stampa 3D, Virtual Surgical Planning, bioprinting e robotica convergono per rispondere ai bisogni reali delle persone, ponendo il cittadino al centro dello sviluppo.

Massimo Robiony

È docente di Chirurgia maxillo-facciale presso l'Università di Udine, dove dirige la Clinica e la Scuola di specializzazione in Chirurgia maxillo-facciale. Direttore del Dipartimento Testa Collo e Neuroscienze - ASUFC, è incaricato dal Ministero della Salute come esperto di due tavoli tecnici sull'umanizzazione delle cure e sui tumori del testa-collo. È membro del Comitato Etico della LILT Nazionale.

Alessandro Tel

È chirurgo maxillo-facciale presso l'Ospedale di Udine.

Esperto riconosciuto in pianificazione virtuale e stampa 3D, è vincitore del Mimics Innovation Award 2020 e 2022 e creatore del primo *Atlante di pianificazione chirurgica virtuale e stampa 3D per la chirurgia maxillo-facciale*.

Elisabetta Ocello

PMP e PhD in Ingegneria gestionale, Project Manager in ASUFC. Esperta in miglioramento organizzativo, umanizzazione delle cure e team building. Co-ideatrice del Master in Salute e Umanizzazione delle Cure (UniUd) e coautrice della *Carta di Udine*.

Lorenzo Marini

È medico in formazione specialistica presso la Clinica di Chirurgia maxillo-facciale di Udine. Si interessa di innovazione tecnologica applicata alla pratica clinico-chirurgica, come stampa 3D e bioprinting.

Luca Michelutti

È medico in formazione specialistica presso la Clinica di Chirurgia maxillo-facciale di Udine. Si occupa dell'applicazione della stampa 3D e dell'intelligenza artificiale nella gestione clinica, con particolare attenzione al paziente oncologico.

ISBN 978-88-3283-553-3



9 788832 835533 >

€ 14,00