

Progettare la salute: le tecnologie 3D in prima linea per il paziente

Monica Carfagni

Le tecnologie 3D stanno rivoluzionando il campo della medicina, offrendo soluzioni innovative per migliorare l'efficacia e la personalizzazione dei trattamenti. Permettono la creazione di modelli anatomici altamente precisi utilizzati per la pianificazione pre-operatoria, la simulazione chirurgica e la formazione medica e consentono la produzione di dispositivi medici su misura, come protesi, ortesi e strumenti chirurgici, che si adattano perfettamente alle esigenze specifiche dei pazienti.

In questo contesto, i ricercatori del gruppo TIP «Team per l'Innovazione di Processo e Prodotto» del DIEF, afferenti alla Sezione di Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale (IIND-03/B) operano nell'ambito dei Laboratori T3Ddy e Custom3D, che vedono la collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Firenze e le aziende ospedaliere universitarie Meyer e Careggi, rappresentando un punto di riferimento per la ricerca e l'innovazione in medicina, offrendo un ponte tra ingegneria e clinica per sviluppare tecnologie all'avanguardia che migliorano significativamente le cure mediche.

Il primo nucleo del gruppo nacque nel 1998 quando l'allora laureando in ingegneria, Lapo Governi, con la supervisione dell'allora Professoressa Associata Monica Carfagni, applicò tecniche di visione artificiale nell'ambito della propria tesi di laurea. Durante questa attività, che può essere considerata come il primo caso di ricerca sul biomedicale del gruppo, vennero sviluppati algoritmi automatici per individuare la taglia ottimale della protesi d'anca destinata ad un paziente analizzando la sua radiografia. Le competenze del gruppo sulla visione artificiale ebbero un ulteriore impulso grazie all'attivazione di un dottorato di ricerca sulla visione artificiale applicata al settore tessile. Il dottorando in questione, l'attuale Professore Associato Rocco Furferi, si occupò di sviluppare algoritmi per l'elaborazione delle immagini per l'individuazione in automatico dei difetti su componenti tessili. In questo contesto il gruppo accrebbe le proprie competenze grazie all'applicazione di algoritmi genetici.

Monica Carfagni, University of Florence, Italy, monica.carfagni@unifi.it, 0000-0002-3393-7014

Referee List (DOI 10.36253/fup_referee_list)

FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup_best_practice)

Monica Carfagni, *Progettare la salute: le tecnologie 3D in prima linea per il paziente*, © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4.13, in Bruno Facchini, Giovanni Ferrara, Rocco Furferi (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 1. Ingegneria Industriale*, pp. 77-88, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0972-4, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4

Nel 2002 avvenne un ulteriore incremento delle competenze del gruppo con l'inserimento delle metodiche di scansione 3D nel proprio bagaglio di competenze. Questo avvenne grazie ad una attività di tesi, svolta dall'attuale Prof. Yary Volpe in collaborazione con Piaggio s.p.a. La tesi, volta alla ricerca di soluzioni progettuali ergonomiche, vide l'esecuzione di scansioni 3D delle selle di veicoli a due ruote. La padronanza delle tecnologie di scansione 3D e Reverse Engineering si è sviluppata negli anni fino ad arrivare alla progettazione e realizzazione di scanner specifici impiegati sia in ambito industriale che nel settore medicale.

La Fabbricazione Additiva venne introdotta, a partire dal 2004, nell'allora Facoltà di Ingegneria, grazie all'attivazione, fortemente voluta dalla Prof. Monica Carfagni, del corso di Prototipazione Rapida (come veniva chiamata allora la Stampa 3D poiché praticamente applicata al solo campo dei prototipi). Il corso, uno dei primi in Italia su queste tematiche, ebbe grande successo tra gli studenti e consentì alla Sezione di avviare molteplici attività di ricerca e collaborazioni con enti ed aziende. La svolta nel settore biomedicale avvenne nel 2014 quando l'Ospedale Pediatrico Meyer si interessò alle competenze disponibili all'interno del gruppo TIP e volle avviare una collaborazione che nel corso degli anni si è sempre più consolidata. Nel 2016 nacque quindi il Laboratorio T3Ddy (Personalized pediatrics by inTegrating 3D aDvanced technology) in collaborazione con l'Azienda Ospedaliera Universitaria Meyer. Il campo di applicazione si è poi esteso ai pazienti adulti con l'istituzione del Laboratorio Custom3D (Customized 3D in Medicine) in collaborazione con l'Azienda Ospedaliera Universitaria Careggi di Firenze.

Da allora l'attività di ricerca nel settore biomedicale del gruppo TIP è cresciuta anno dopo anno, potendo vantare grandi soddisfazioni sia dal punto di vista scientifico che da quello umano, avendo contribuito in modo sostanziale a migliorare le applicazioni cliniche nell'ottica della salute del paziente. I principali punti di forza del gruppo sono sicuramente la multidisciplinarietà e la modalità operativa in stretto contatto con il personale medico coinvolto nelle singole attività.

I due laboratori si concentrano sulle seguenti linee di ricerca:

- Integrazione delle tecnologie 3D (CAD, Scansione 3D, Stampa 3D, ecc.) nella pratica clinica
- Dispositivi medici personalizzati
- Strumentazione chirurgica personalizzata
- Simulazione per training chirurgico
- Sviluppo task trainer per la formazione medica
- Metodi basati su intelligenza artificiale per la diagnosi e la valutazione dell'outcome chirurgico.

A queste linee di ricerca si aggiungono attività collaterali di ricerca di base, quindi senza un'applicazione immediata nella pratica clinica, ma che il gruppo mira a trasferire in ospedale in tempi rapidi.

La prima attività svolta in collaborazione con l'Ospedale Meyer ha visto lo sviluppo di una nuova metodologia semiautomatica per la progettazione di placche craniche personalizzate utilizzate per gli interventi di cranioplastica (Volpe et al. 2018) (Figura 39). A partire dalla TAC del paziente viene ricavato il modello digitale del cranio e, impiegando tecniche interattive basate su CAD, viene ricavata la geometria della protesi necessaria per coprire la parte mancante di osso. La placca viene quindi realizzata in lega di titanio utilizzando stampanti 3D e, previa sterilizzazione, portata in sala operatoria. Questa innovativa metodologia di progettazione delle protesi ha costituito una rivoluzione per questo tipo di interventi: il chirurgo non è più costretto ad intervenire sulla parte ossea per adattare questa alla placca ma deve solo fissare la nuova placca che, in quanto progettata per lo specifico paziente, si adatta perfettamente ai bordi della

zona mancante. La placca estremamente sottile consente inoltre di appoggiarsi sui bordi dell'osso invece di venire annegata nello spazio mancante con notevoli benefici nel post-intervento. Con l'uso di questa innovativa tecnica operatoria gli interventi sono anche molto più brevi con una importante riduzione dei costi e una maggiore sicurezza del paziente. Il decorso post-operatorio per i molti interventi realizzati è stato ottimale.

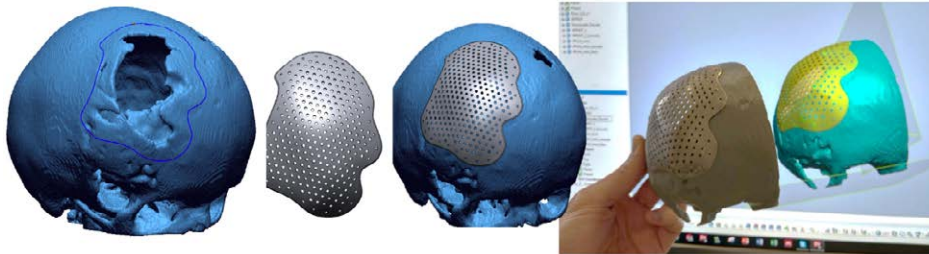


Figura 39.

Sulla base delle metodologie sviluppate e grazie all'esecuzione di numerose prove in ambito clinico, gli strumenti interattivi sviluppati per la realizzazione delle placche craniche proseguono ancora oggi mediante lo sviluppo di metodi e strumenti per automatizzare e migliorare il processo di ricostruzione 3D, impiegando sia metodi CAD avanzati che tecniche basate su Statistical Shape Modelling (SSM). Attualmente è in corso presso l'Ospedale Pediatrico Meyer uno studio clinico, in collaborazione con l'azienda tedesca Bellaseno GmbH, per la valutazione dell'impianto di scaffold custom-made in policaprolattone (PCL), usati in combinazione con trasferimento di tessuto adiposo autologo, per la correzione del petto scavato (Figura 40). Il petto scavato (o *pectus excavatum* in termini medici) è una malformazione della parete toracica in cui lo sterno è infossato (Servi et al. 2019) o incavato, creando una depressione al centro del torace. La soluzione proposta rappresenta un approccio innovativo che permette di correggere la malformazione con impianti su misura, adattati alla forma e alle esigenze del paziente, in modo meno invasivo rispetto alle tecniche tradizionali che prevedono l'uso di barre metalliche o protesi permanenti in silicone.

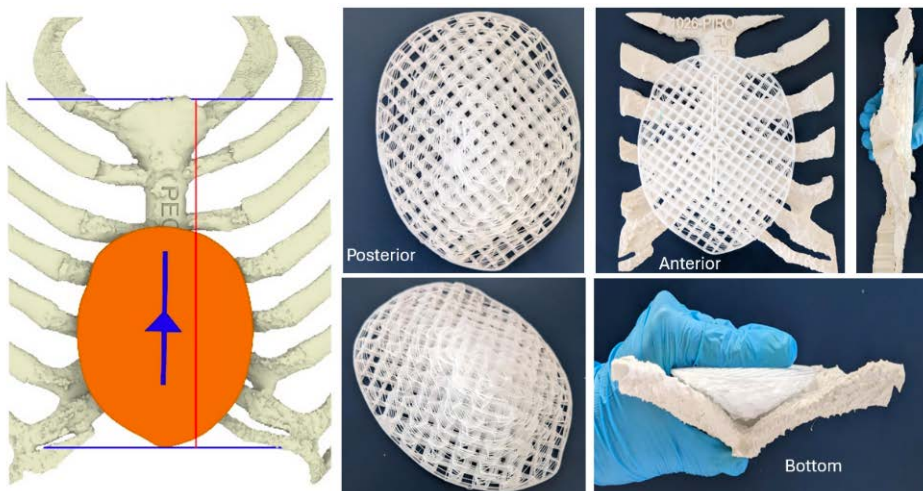


Figura 40 – Protesi riassorbibili per la correzione del Pectus Excavatum.

I ricercatori del gruppo TIP, con il coordinamento del Ricercatore Francesco Buonamici, hanno sviluppato un metodo per la prototipazione rapida di protesi personalizzate per interventi complessi di ortopedia oncologica (Servi et al. 2024) (Figura 41). L'elevata capacità di personalizzazione garantita dall'uso di tecnologie additive per la fabbricazione di protesi ha consentito, in questo campo, la progettazione di impianti per ossa lunghe particolarmente innovativi. La geometria delle protesi mostrate in Figura 3 è stata, in ogni caso, prodotta ricavando il dato di riferimento da esami diagnostici del paziente, riprendendo quindi la forma delle ossa. La progettazione eseguita a fianco del chirurgo consente la produzione di forme complesse, in grado di adattarsi a una superficie di resezione articolata e studiata per minimizzare la quantità di osso asportata, garantendo al tempo stesso la sicurezza del paziente grazie ad una accurata pianificazione. Salvare il tessuto osseo del paziente ha una importanza fondamentale, specialmente nel caso delle superfici articolari che giocano un ruolo primario nel preservare la funzionalità motoria dell'arto.

Le protesi progettate dal gruppo hanno esplorato diverse soluzioni modulari, rappresentate in Figura 42 per consentire al chirurgo la massima flessibilità possibile nelle scelte terapeutiche da applicare. Speciali protesi, anch'esse modulari, hanno persino consentito al chirurgo, in qualche caso, di compiere la scelta finale sul tipo di taglio da effettuare direttamente in sala operatoria, valutando la situazione del paziente «con mano» in tempo reale. Lo sviluppo di metodologie per la progettazione e la stampa 3D di protesi personalizzate ha consentito agli ingegneri di TIP di aggiungere, su indicazione del chirurgo, feature geometriche avanzate con la finalità di aumentare l'efficacia della protesi; fori per il passaggio di legamenti e tendini o per l'ancoraggio di strutture muscolari, trattamenti superficiali locali studiati per massimizzare l'osteointegrazione, accoppiamenti di forma e soluzioni per il fissaggio dei dispositivi sono alcuni esempi notevoli che rientrano in questa categoria e che, in ultima analisi, rappresentano una possibilità di un percorso terapeutico migliore per il paziente.



Figura 41 – Protesi personalizzate per ortopedia.

Una delle principali attività di sviluppo di dispositivi medici personalizzati non impiantabili ha riguardato le ortesi per il trattamento delle fratture del polso (Buonamici et al. 2018). Questa attività, portata avanti soprattutto con il contributo della Ricercatrice Michaela Servi, ha visto lo sviluppo sia di un innovativo scanner (denominato Oplà) sia di un software per la modellazione interattiva dell'ortesi personalizzata. L'elemento distintivo di questo scanner è la velocità di acquisizione. Grazie all'impiego simultaneo di otto sensori di profondità, lo strumento è in grado di ricostruire l'anatomia del paziente in meno di un secondo. Questa caratteristica si rivela particolarmente preziosa nell'acquisizione di immagini degli arti di pazienti pediatriche, notoriamente inclini al movimento durante le procedure diagnostiche tradizionali. Il sistema è gestito da un software appositamente sviluppato che non si limita alla sola scansione ma che integra una procedura CAD innovativa che consente la creazione semi-automatica del modello dell'ortesi pronto per la stampa 3D.

Un'altra attività che ha già visto la realizzazione di oltre 40 interventi, ma che ha richiesto l'applicazione di molte delle tecnologie padroneggiate dal gruppo in molti anni di attività prima del suo utilizzo in sala operatoria, è la ricostruzione del padiglione auricolare (Mussi et al. 2019). Questo campo di ricerca ha previsto lo studio approfondito dell'anatomia auricolare a seguito del quale i ricercatori si sono concentrati sulla progettazione di guide di taglio ottimizzate, con l'obiettivo di assistere il chirurgo nel creare un orecchio che si avvicini il più possibile all'aspetto di quello sano controlaterale e che si armonizzi perfettamente con i tratti del viso del paziente (Mussi et al. 2021).



Figura 42 – Orttesi personalizzate per la frattura del polso.

Un aspetto cruciale di questa ricerca è stata l'identificazione delle tecniche di acquisizione 3D più adatte per catturare con precisione la complessa morfologia della regione auricolare. Parallelamente, il team ha sviluppato routine per la modellazione CAD che consentono di creare guide di taglio in grado di adattarsi con estrema precisione alle specifiche caratteristiche anatomiche di ciascun individuo, garantendo così risultati ottimali e altamente personalizzati.



Figura 43 – Ricostruzione del padiglione auricolare.

Nel campo della chirurgia ricostruttiva, un'innovativa procedura per la ricostruzione della piramide nasale di un bambino utilizzando come riferimento il naso del gemello ha recentemente attirato l'attenzione per il suo approccio all'avanguardia. Il metodo sviluppato dal team ha visto la combinazione di tecnologie di imaging avanzate, progettazione ingegneristica e stampa 3D per creare una soluzione altamente personalizzata. In una fase iniziale sono stati acquisiti dati anatomici utilizzando tomografia computerizzata del tessuto osseo del paziente. Questi dati sono stati sovrapposti digitalmente alla scansione 3D del volto del gemello permettendo una ricostruzione virtuale accurata della piramide nasale. La progettazione delle componenti della piramide nasale ha seguito due importanti obiettivi: da un lato la distribuzione efficace delle tensioni sui fianchi e sul dorso della struttura; dall'altro un accoppiamento univoco e preciso delle varie parti durante la fase di costruzione in sala operatoria. Gli elementi della piramide nasale sono poi stati realizzati in stampa 3D utilizzando opportuni materiali polimerici (ad esempio poliuretano termoplastico – TPU) con caratteristiche meccaniche simili a quelle dei tessuti cartilaginei, in particolare per quanto riguarda l'elasticità. Grazie a un modello di simulazione costituito da un pad che ha ricreato fedelmente la faccia del paziente senza il naso, comprensivo sia della struttura ossea che dei tessuti molli, gli elementi della piramide sono stati validati. Questo modello ha permesso ai chirurghi di testare e perfezionare la forma e il posizionamento degli elementi stampati in 3D. Infine, i pezzi precedentemente validati durante la simulazione sono poi stati utilizzati in sala operatoria come modelli per sagomare con precisione le cartilagini costali del paziente.



Figura 44 – Ricostruzione del naso di un bambino.

La capacità di fabbricare dispositivi di forma complessa e in singole unità, garantita dalla stampa 3D, ha consentito lo sviluppo di strumenti chirurgici personalizzati di vario tipo (Figura 45). In questa categoria rientrano le dime di taglio: dispositivi mo-

dellati e progettati in modo da adattarsi perfettamente all'anatomia del paziente e di offrire al chirurgo una serie di superfici funzionali, opportunamente posizionate, per l'esecuzione guidata di tagli complessi. Molto utili nel caso di interventi di resezione oncologica, queste guide possono essere ancorate dal chirurgo direttamente sull'osso; il posizionamento corretto è assicurato da un accoppiamento di forma tra la superficie ossea e una superficie della dima, modellata con la stessa forma. Il posizionamento del dispositivo diventa così quindi questione di trovare il giusto allineamento e orientazione tra le due superfici. Una volta posizionate, l'inserimento di viti o di altre soluzioni per il fissaggio assicura la loro stabilità per tutta la durata dell'intervento. Il chirurgo può quindi usufruire di fessure di spessore controllato per l'inserimento della sega per ossa o di piani che possono essere usati come riferimento o battuta per evitare il taglio della parte sana dell'osso.

TIP ha sviluppato dime di taglio per interventi di resezione di tumori ossei di diversa tipologia, ricercando per ogni caso la geometria ideale per minimizzare l'esposizione dell'osso (il corretto allineamento prevede infatti di dover ripulire la zona di accoppiamento durante l'intervento – operazione che comporta un certo impatto). Alcune delle immagini dei dispositivi sviluppati in quest'ambito sono riportati in Figura 7 sulla sinistra e al centro. TIP ha inoltre sviluppato algoritmi automatici per la progettazione di dime di taglio per interventi di ortopedia oncologica: il percorso terapeutico dei pazienti deve infatti prevedere, in questo caso, l'esecuzione dell'intervento nel minor tempo possibile. La stampa 3D consente la fabbricazione del dispositivo in tempi brevi, ma l'abbattimento dei tempi di progettazione rimane un ambito in cui innovazione e ricerca possono portare a vantaggi significativi. Gli ingegneri del gruppo hanno così realizzato metodi per la progettazione e la modellazione 3D automatici o interattivi tramite i quali, a partire da una serie di input forniti dall'utente (la geometria dell'osso del paziente, i piani di taglio da realizzare, la posizione dei punti per l'inserimento delle viti di fissaggio) è possibile produrre il modello 3D della dima (Leng et al. 2019; Guariento et al. 2022).

Altro filone di ricerca che è stato esplorato all'interno del laboratorio T3Ddy è la realizzazione di dime di taglio per interventi di correzione del Pectus Carinatum, una malformazione che comporta una forma pronunciata dello sterno, visibile in Figura 45c, che deve essere corretta attraverso un intervento in cui viene rimosso un segmento osseo per procedere al riposizionamento di due metà dello sterno nella configurazione corretta. La corretta esecuzione dell'intervento è legata all'accuratezza nella realizzazione di due tagli planari che devono sottintendere un angolo ben preciso, calcolato in funzione della situazione di partenza. TIP ha sviluppato una procedura accurata e ripetibile per il calcolo dell'angolo di taglio necessario in ogni intervento e la posizione ideale per il taglio. Queste informazioni hanno permesso di sviluppare una procedura in ambiente CAD in grado di eseguire una modellazione automatica del dispositivo personalizzato (come mostrato, ad esempio, a destra della Figura 45 in grigio). Una ulteriore importante attività svolta dai ricercatori della Sezione nell'ambito dei due laboratori è costituita dallo sviluppo di simulatori per la pianificazione chirurgica preoperatoria, che ha visto in particolare il coinvolgimento del Ricercatore Luca Puggelli (Figura 46). La possibilità di preparare interventi complessi utilizzando modelli digitali e fisici che riproducano le parti anatomiche interessate del paziente consente di pianificare accuratamente gli interventi chirurgici testando anche differenti approcci e permettendo al chirurgo di arrivare in sala operatoria con maggiore consapevolezza (Mencarelli et al. 2023).

Il grande sviluppo osservato nel mondo della produzione additiva negli ultimi anni ha infatti portato alla ricerca di materiali con caratteristiche sempre più avanzate; è

ora possibile usufruire di una grandissima varietà di materiali polimerici con proprietà meccaniche e ottiche diverse. Pertanto, tecnologie di stampa che consentono l'utilizzo di più materiali contemporaneamente e proprietà che possono essere controllate localmente all'interno dell'oggetto stampato hanno trovato grande applicazione nella realizzazione di repliche anatomiche. La fabbricazione di forme complesse e l'uso di materiali con molte caratteristiche diverse all'interno dello stesso oggetto hanno costituito i punti di forza per l'applicazione della stampa 3D per la realizzazione di simulatori.

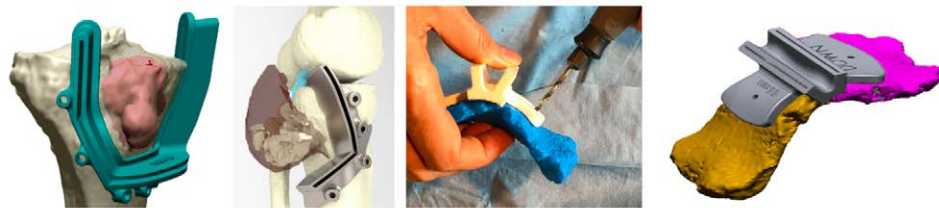


Figura 45 – Dime di taglio personalizzate.

I laboratori T3Ddy e CustoM3D hanno pertanto sviluppato negli anni una grande competenza nella realizzazione di simulatori per task chirurgiche e mediche in generale grazie al lavoro portato avanti in molti dottorati di ricerca. I laboratori prestano servizio ai chirurghi degli ospedali che si trovano ad affrontare interventi particolarmente complessi, con situazioni che necessitano di essere studiate con ogni mezzo a disposizione. La realizzazione di repliche anatomiche tridimensionali consente al chirurgo di «toccare con mano» il caso che si troverà ad affrontare in sala operatoria, permettendo la costruzione di una mappa mentale tridimensionale che solo la manipolazione di un oggetto fisico può, alle volte, consentire.

Lo sviluppo è stato accompagnato anche dalla disponibilità del gruppo TIP di una serie di tecnologie di stampa avanzate, capaci di realizzare oggetti polimerici, integrandole, quando necessario, con materiali ad alta flessibilità e bassa durezza come, ad esempio, il silicone. I materiali siliconici sono infatti fondamentali per molte applicazioni in cui è necessario simulare un tessuto anatomico morbido (Mencarelli et al. 2024). Nella realizzazione di modelli preoperatori ogni caso è analizzato in modo diverso a partire dalle esigenze del medico che ha avanzato la richiesta di un modello e che sta seguendo il caso. Ogni situazione presenta delle complicazioni e dei punti critici che, idealmente, devono essere risolti tramite l'interpretazione del modello tridimensionale fisico. Modelli ortopedici realizzati in seguito a traumi devono ad esempio rappresentare la configurazione tridimensionale e la forma di vari segmenti ossei che si potrebbero trovare in posizioni innaturali. Per raggiungere questo risultato è solitamente sufficiente la stampa di un modello in plastica rigida monomateriale. Casi di tipologia diversa, come ad esempio il caso di un tumore nella zona del collo, visualizzato in Figura 8 sulla sinistra, richiedono repliche con proprietà diverse. Come è possibile vedere dalla figura, il modello rappresenta la zona di interesse e la sua relazione con elementi anatomici fondamentali, come arterie e vene del collo. In questi casi, l'uso di materiali con diverse caratteristiche e colori diversi è essenziale per comunicare le informazioni di interesse al medico.

Il laboratorio ha inoltre sviluppato repliche di tipologia più avanzata, che possono essere usate per simulare procedure operatorie: accessi chirurgici, suture, posizionamento di impianti, ecc. In quest'ambito, i ricercatori del gruppo hanno realizzato simulatori per verificare la validità di una direzione di approccio ad un intervento chirurgico invasivo o simulatori per l'esecuzione di procedure di asportazione di tumore in aree

estremamente delicate. In tutti i casi, la ricerca portata avanti negli anni dal laboratorio ha consentito la scelta dei materiali e del processo di fabbricazione più appropriato per la realizzazione delle repliche anatomiche necessarie. Nel caso della ricostruzione del naso citato in precedenza, ad esempio, è stato possibile realizzare una serie di strumenti per simulare l'intervento più volte prima dell'esecuzione vera e propria. Il chirurgo ha potuto così acquisire una elevatissima conoscenza dell'anatomia del paziente e dei gesti chirurgici che sarebbe stato necessario poi eseguire in sala. La forma del naso è stata utilizzata per progettare e stampare strumenti di ausilio al chirurgo: grazie alla tecnologia 3D sono state stampate delle «sagome» che – proprio come fossero delle dime di taglio – sono servite per prelevare frammenti di cartilagine costale del bambino con altissima precisione, rendendo l'intervento il meno invasivo possibile. Questi frammenti sono stati assemblati, un po' come le tessere di un puzzle, per costruire l'impalcatura ossea e cartilaginea della piramide nasale, successivamente ricoperta con lembi cutanei prelevati dalla fronte e dal tessuto mucoso.

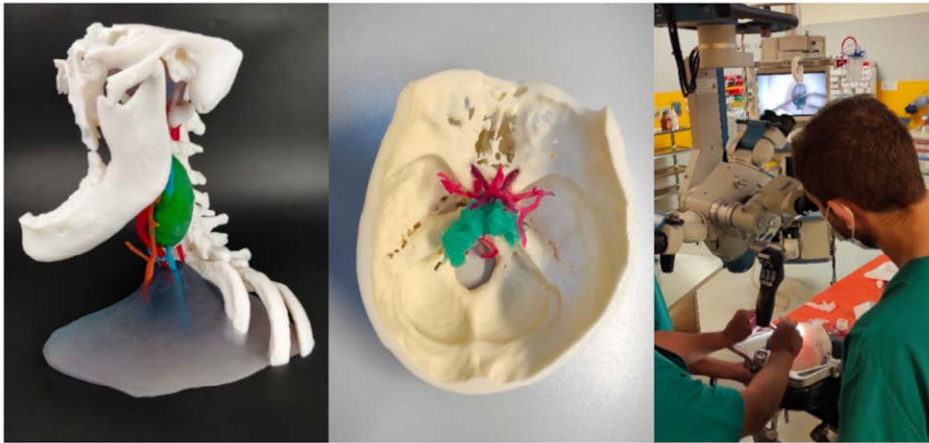


Figura 46 – Modelli per la simulazione chirurgica preoperatoria.

Le repliche anatomiche rappresentano inoltre un supporto fondamentale nella formazione degli specializzandi in medicina, poiché consentono loro di acquisire competenze pratiche in un ambiente sicuro e controllato, prima di operare su pazienti reali. Questo approccio formativo non solo riduce il rischio di errori durante le prime esperienze cliniche, ma garantisce che, al momento del primo intervento su un paziente, il medico abbia già acquisito una padronanza sufficiente delle procedure per garantire alti standard di sicurezza e qualità delle cure. A tale scopo, sono stati sviluppati strumenti specifici come i task trainer (Figura 47), che permettono al discente di concentrarsi sull'apprendimento e sulla pratica di abilità tecniche precise. T3Ddy e Custom3D sono in prima linea nello sviluppo di questi dispositivi, sviluppando e realizzando simulatori altamente efficaci per esercitarsi in skill specifiche come la sutura su differenti tratti anatomici, la puntura intraossea o la tracheotomia.

Questi simulatori sono frutto di una continua ricerca tecnologica che punta a migliorare la precisione e la fedeltà dei modelli anatomici, rendendoli sempre più realistici e funzionali per l'insegnamento. Grazie all'impiego della stampa 3D con materiali che replicano fedelmente la consistenza e la resistenza dei tessuti umani, è possibile riprodurre con grande accuratezza le condizioni anatomiche su cui i medici si troveranno a intervenire. La combinazione di un'accurata ricerca e sviluppo con l'applicazione pra-

tica consente di progettare soluzioni formative che preparano i futuri medici non solo alla comprensione teorica delle procedure, ma anche alla loro esecuzione con un elevato grado di sicurezza e competenza.

Per pratiche cliniche più avanzate, vengono sviluppati manichini ad alta fedeltà in grado di riprodurre con notevole precisione l'anatomia umana e le caratteristiche fisiche dei tessuti, offrendo una simulazione estremamente realistica (Figura 48). Questi manichini avanzati sono progettati per formare medici e specialisti su procedure complesse, migliorando la loro competenza e la sicurezza del paziente.

Il laboratorio T3Ddy, ad esempio, ha realizzato un manichino innovativo per la simulazione della resezione polmonare, che consente agli operatori sanitari di esercitarsi sia su casi di sequestro polmonare extra-lobare che intra-lobare. Questa tipologia di manichino offre la possibilità di ricreare scenari complessi, aiutando i medici a perfezionare le tecniche chirurgiche in un ambiente sicuro prima di operare su pazienti reali. Tale manichino è frutto di anni di ricerca e sviluppo, che hanno permesso di ottimizzare la fedeltà anatomica e la risposta meccanica dei tessuti simulati, rendendolo uno strumento essenziale per la formazione avanzata.

In ambito pediatrico, il laboratorio ha anche sviluppato la serie di manichini ABU (Advanced Bronchoscopy Unit), concepiti per la formazione sul trattamento delle vie aeree difficili. Questa serie è caratterizzata da una struttura modulare che consente di riprodurre differenti quadri clinici sullo stesso manichino, come malformazioni del tratto tracheale, ostruzioni delle vie respiratorie, tracheotomie e fistole tracheoesofagee. Grazie a questa versatilità, i manichini ABU offrono un'esperienza formativa completa e realistica, permettendo ai medici di affrontare una vasta gamma di situazioni cliniche complesse. Anche per questi modelli, la ricerca nel campo della simulazione medica ha portato allo sviluppo di materiali sempre più avanzati, capaci di imitare con estrema accuratezza i tessuti umani, garantendo un'esperienza didattica che si avvicina sempre di più alla realtà clinica.



Figura 47 – Task Trainer.

Parallelamente, il laboratorio Custom3D sta sviluppando un manichino specificamente progettato per l'uso della sonda ecografica EBUS (Endobronchial Ultrasound) su pazienti adulti, per la stadiazione del tumore al polmone mediante biopsia di materiale agoaspirato da linfonodi target. Questo manichino sarà in grado di simulare interventi avanzati come la broncoscopia con guida ecografica, offrendo ai medici una piattaforma altamente realistica per acquisire le competenze necessarie. L'EBUS è una tecnica cruciale per la diagnosi e la gestione di patologie toraciche, inclusi tumori e altre lesioni polmonari, e la simulazione di tale procedura in un ambiente controllato aiuterà gli operatori a perfezionare la loro tecnica senza rischi per i pazienti. Questi sviluppi sono il risultato di un impegno costante nella ricerca e nell'innovazione.

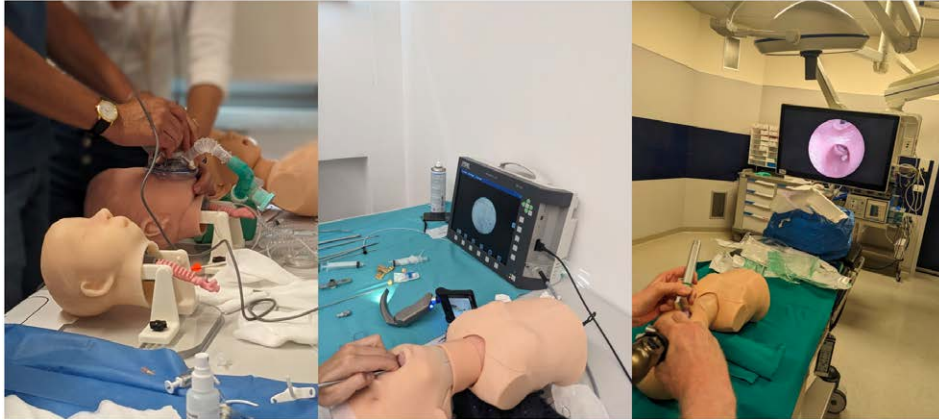


Figura 48 – Manichini per la simulazione ed il training.

Queste e molte altre le attività dei due laboratori che hanno consentito un notevole miglioramento del Tasso di Successo Chirurgico, la riduzione dei tempi di preparazione operatoria grazie a strumenti di simulazione personalizzati, il miglioramento degli esiti clinici attraverso l'utilizzo di modelli preparatori realistici, l'aumento della precisione chirurgica con la conseguente riduzione delle complicanze operative, la riduzione della Curva di Apprendimento del personale ospedaliero e l'incremento dell'Efficienza della Diagnosi e della Pianificazione.

In futuro, grazie all'evoluzione significativa delle tecnologie utilizzate e al potenziamento del know-how del gruppo T3DDY, si prevedono ulteriori sfide da affrontare sempre in prima linea per la salute del paziente.



Figura 49 – Il gruppo T3DDY al Convegno ADM 2023.

Riferimenti bibliografici

- Buonamici, F. et al. 2018. "A CAD-based Procedure for Designing 3D Printable Arm-wrist-hand Cast." *Computer-Aided Design and Applications* 16: 25-34.
- Guariento, L. et al. 2022. "A Semi-Automatic CAD Procedure to Design Custom-made Surgical Cutting Guides." *Computer-Aided Design and Applications* 19: 733-40.
- Leng, S. et al. 2019. "Customized Cutting Template to Assist Sternotomy in Pectus Arcuatum." *Annals Of Thoracic Surgery* 107: 1253-58.
- Mencarelli, M. et al. 2024a. "Preliminary Study of a 3D-Printed High-Fidelity Simulator for the Training on the EBUS TBNA Procedure." In *ADM 2023, Firenze, 6-8 settembre 2023*, vol. III, 146-53. Springer.
- Mencarelli, M. et al. 2024b. "Acoustic Velocity and Stability of Tissue-Mimicking Echogenic Materials for Ultrasound Training Phantoms." *Journal Of Materials Science*.
- Mussi, E. et al. 2019. "Ear Reconstruction Simulation: From Handcrafting to 3D Printing." *Bioengineering* 6: 1-19.
- Mussi, E. et al. 2021. "A Rapid Prototyping Approach for Custom Training of Autologous Ear Reconstruction." *Ijidem* 15: 577-85.
- Privitera, A. et al. 2022. "Geminate and Nongeminate Pathways for Triplet Exciton Formation in Organic Solar Cells." *Adv. Energy Mater.* 12: 2103944.
- Santanni, F. e A. Privitera. 2024a. "Metalloporphyrins as Building Blocks for Quantum Information Science." *Adv. Mater.* 12: 2303036.
- Serrano, S. et al. 2020. "Quantum Dynamics Of A Single Molecule Magnet On Superconducting Pb(111)." *Nat. Mater.* 19: 546-51.
- Serrano, S. et al. 2022. "Magnetic Molecules as Local Sensors of Topological Hysteresis of Superconductors." *Nat. Commun.* 13: 3838.
- Servi, M. et al. 2019. "Pectus Carinatum: A Non-Invasive and Objective Measurement of Severity." *Medical & Biological Engineering & Computing* 57: 1727-35.
- Servi, M. et al. 2024. "A CAD Procedure for Planning and Modelling Custom Surgical Guides for Tumor Resection." *Computer-Aided Design and Applications* 21: 487-98.
- Volpe, Y. et al. 2018. "Surgery of Complex Craniofacial Defects: A Single-Step AM-Based Methodology." *Computer Methods and Programs In Biomedicine* 165: 225-33.
- Wang, Y. et al. 2023. "The Critical Role of The Donor Polymer in The Stability of High-Performance Non-Fullerene Acceptor Organic Solar Cells." *Joule* 7: 810-29.