



Valutazione dell'accuratezza della stampa 3D di ossa del carpo prelevate da cadavere

The Accuracy of 3D Printed Carpal Bones Generated from Cadaveric Specimens

Cory Lebowitz¹, Joseph Massaglia¹, Christopher Hoffman², Ludovico Lucenti³ (foto), Sachin Dheer⁴, Michael Rivlin⁵, Pedro K. Beredjikian⁶

¹ Rowan University School of Osteopathic Medicine, 1 Medical Dr, Stratford, NJ, USA; ² Thomas Jefferson University, Department of Hand & Upper Extremity Surgery, Rothman Orthopaedics, Thomas Jefferson University, Philadelphia, PA, USA; ³ Policlinico Casilino di Roma, Roma; ⁴ Reparto di Radiologia, Thomas Jefferson University Hospitals, Cherry Hill, NJ, USA; ⁵ Reparto di chirurgia della mano e del gomito, Rothman Orthopaedics, Thomas Jefferson University, Philadelphia, PA, USA; ⁶ Reparto di Chirurgia della Mano e del Gomito, Rothman Orthopaedics, Thomas Jefferson University, Philadelphia, PA, USA

Riassunto

Introduzione. La stampa tridimensionale (3D) di modelli anatomici creati utilizzando le tecniche di imaging, trova ampie applicazioni in ortopedia. Lo scopo di questo studio è quello di valutare l'accuratezza della stampa 3D delle ossa carpali.

Materiali e metodi. Sette polsi prelevati da cadavere sono stati sottoposti ad esame TC, successivamente sono state dissezionate alcune ossa carpali prestabilite (scafoide, capitato, semilunare e trapezio). Parametri quali la lunghezza, la circonferenza ed il volume sono stati misurati direttamente nelle ossa prelevate dal cadavere. Le immagini TC sono state convertite in file STL (Standard Triangulation Language). I file STL sono stati convertiti in stampe solide utilizzando una stampante 3D disponibile in commercio. Le dimensioni delle ossa carpali stampate sono state misurate e confrontate con quelle delle ossa carpali cadaveriche.

Risultati. In media, la lunghezza e la circonferenza delle ossa stampate in 3D si discostavano di 2,3 mm (9,8%) e 2,2 mm (4,4%), rispettivamente, dalle dimensioni dell'osso cadaverico. Si è riscontrata una maggiore discrepanza nel volume misurato, che in media era 0,65 cc (15,9%) differente rispetto alle ossa cadaveriche. Queste differenze non sono risultate statisticamente significative (valore $p > 0,05$).

Conclusione. La stampa tridimensionale può aggiungere valore alla cura del paziente e migliorare i risultati. Questo studio dimostra che la stampa 3D può fabbricare in modo accurato e riproducibile modelli ossei che assomigliano molto alla loro corrispondente anatomia cadaverica.

Parole chiave: Stampa 3D, ossa del carpo, cadavere, esame TC

Summary

Introduction. Computer assisted three-dimensional (3D) printing of anatomic models using advanced imaging has wide applications within orthopaedics. The purpose of this study is to evaluate the 3D printing accuracy of carpal bones.

Methods. Seven cadaveric wrists underwent CT scanning, after which select carpal bones (scaphoid, capitate, lunate, and trapezium) were dissected in toto. Dimensions including length, circumference, and volume were measured directly from the cadaver bones. The CT images were

Ricevuto: 20 ottobre 2020
Accettato: 30 giugno 2020

Corrispondenza

Ludovico Lucenti
Policlinico Casilino di Roma, via Casilina 1049,
00169 Roma
Tel.: 06 2318 8305
E-mail: ludovico.lucenti@gmail.com

Conflitto di interessi

Gli Autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interesse con l'argomento trattato nell'articolo.

Come citare questo articolo: Lebowitz C, Massaglia J, Hoffman C, et al. Valutazione dell'accuratezza della stampa 3D di ossa del carpo prelevate da cadavere. *Giornale Italiano di Ortopedia e Traumatologia* 2022;48:171-175; <https://doi.org/10.32050/0390-0134-N401>

© Copyright by Pacini Editore Srl



OPEN ACCESS

L'articolo è OPEN ACCESS e divulgato sulla base della licenza CC-BY-NC-ND (Creative Commons Attribuzione – Non commerciale – Non opere derivate 4.0 Internazionale). L'articolo può essere usato indicando la menzione di paternità adeguata e la licenza; solo a scopi non commerciali; solo in originale. Per ulteriori informazioni: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

converted into 3D printable stereolithography (STL) files. The STL files were converted into solid prints using a commercially available 3D printer. The printed carpal bones' dimensions were measured and compared to those of the cadaveric carpal bones.

Results. On average, the length and circumference of the 3D printed bones were within 2.3 mm (9.8%) and 2.2 mm (4.4%), respectively, of the cadaveric bone dimensions. There was a larger discrepancy in the volume measured, which on average was within 0.65 cc (15.9%) of the cadaveric bones. These differences were not statistically significant (p -value > 0.05).

Conclusion. Three-dimensional printing can add value to patient care and improve outcomes. This study demonstrates that 3D printing can both accurately and reproducibly fabricate boney models that closely resemble their corresponding cadaveric anatomy.

Key words: Three-dimensional (3D), cadaver, computed tomography (CT), carpal bones

Introduzione

La stampa tridimensionale (3D) è un processo che prevede la fabbricazione di un oggetto da un modello computerizzato, un concetto che è stato introdotto per la prima volta negli anni '80 e da allora è diventato uno dei metodi più efficienti per fabbricare prodotti personalizzati per vari usi. Più recentemente, le fonti di dati provenienti da tecniche avanzate di imaging medico come la tomografia computerizzata (TC) e la risonanza magnetica (RMN), hanno guadagnato popolarità. La scansione radiologica, che viene spesso generata in un formato di file *Digital Imaging and Communications in Medicine* (DICOM), può essere elaborata e convertita in un file Standard Tessellation Language (STL) riconosciuto dalle stampanti 3D¹.

La stampa 3D di modelli anatomici partendo dall'imaging, ha ampie applicazioni in campo medico e in particolare nell'ambito dell'ortopedia². Questi modelli anatomici possono essere creati (a partire dall'imaging) e successivamente stampati, diventando così sempre più popolari per il loro uso nell'educazione medica, nella pianificazione preoperatoria, nella formazione chirurgica e nella creazione di guide, impianti e protesi specifiche per il paziente. Un modello anatomico stampato in 3D può aiutare nel *planning* preoperatorio consentendo al chirurgo di visualizzare l'anatomia dei tessuti, simulare il processo chirurgico, selezionare e manipolare le apparecchiature chirurgiche e dimostrare queste tecniche ai pazienti prima dell'intervento offrendo una migliore comprensione del tipo di operazione³.

George et al.⁴ hanno descritto gli errori che si verificano durante ogni fase del processo di stampa 3D: imaging, segmentazione, generazione STL, post-elaborazione STL, stampa 3D e pulizia/preparazione del modello anatomico. Un modello impreciso di stampa 3D dell'anatomia di un paziente può potenzialmente comportare un piano di trattamento inappropriato che porta a conseguenze negative per il paziente e il medico⁴. Precedenti lavori hanno cercato di determinare l'accuratezza dimensionale di questi modelli anatomici stampati in 3D rispetto agli studi di imaging e alle stesse ossa da cadavere^{5,6}. Tuttavia, è presente una letteratura limitata sull'accuratezza dei modelli

anatomici stampati in 3D rispetto ai campioni prelevati da cadavere, specialmente nel polso.

Lo scopo di questo studio è di indagare l'accuratezza dei modelli anatomici stampati in 3D di ossa carpali selezionate rispetto ai loro corrispondenti campioni prelevati da cadavere. Ipotizziamo che i modelli stampati in 3D siano molto precisi e non mostrino differenze statisticamente significative nella lunghezza, circonferenza e volume misurati rispetto a quella delle ossa cadavere.

Materiali e metodi

Sette polsi da cadavere sono stati sottoposti ad un esame TC utilizzato nella pratica clinica standard. I cadaveri con evidenza di lesione ossea o precedente intervento chirurgico sono stati esclusi. Dopo aver ottenuto le scansioni, ogni cadavere è stato dissezionato e sono stati rimossi lo scafoide, il capitato, il semilunare ed il trapezio, ottenendo 28 campioni ossei per la valutazione. La dissezione è stata eseguita con cura per rimuovere il più possibile i tessuti molli su ciascuna delle ossa, mantenendo la cartilagine nativa (Fig. 1).

Per ogni osso è stato misurato il volume (cc), la lunghezza



Figura 1. Un osso scafoide prelevato da cadavere (a sinistra) mostrato accanto al corrispondente modello stampato in 3D (a destra)

(mm) e la circonferenza (mm), ottenendo un totale di 84 misurazioni da cadavere come segue: (a) Il volume di ciascun osso è stato misurato usando una tecnica di spostamento del volume, misurando l'acqua spostata dopo che l'osso carpale è stato posto in un bicchiere riempito con la massima quantità di acqua; (b) La lunghezza di ciascun osso, determinata dallo sperimentatore, è stata considerata come la sua dimensione più lunga; (c) La circonferenza di ciascun osso, determinata dallo sperimentatore, è stata misurata avvolgendo una sutura in seta attorno a parti specifiche di ciascun osso carpale.

Parallelamente, sono stati generati da un altro ricercatore, modelli anatomici 3D delle 28 ossa cadavere. I dati DICOM di ciascuna scansione TC sono stati elaborati e convertiti manualmente in un file STL con segmentazione, modifica della soglia, isolamento dell'isola e *smoothing*. 3D Slicer (www.slicer.org), una piattaforma software open source di informatica medica, è stata utilizzata per l'elaborazione dei dati DICOM. Il file STL risultante per ciascun osso carpale è stato quindi modificato e preparato per la stampa 3D utilizzando Meshmixer (www.meshmixer.com) e Netfabb (www.autodesk.com/netfabb), software di modellazione open source. Le ossa carpal individuali generate in 3D sono state quindi stampate utilizzando una stampante 3D di modellazione della deposizione fusa (FDM) disponibile in commercio (www.ultimaker.com) con una risoluzione dello strato di 20-200 micron e una precisione XYZ di 12,5/12,5/2,5 micron. Il materiale di stampa utilizzato per generare ciascun osso è stato di filamento di acido polilattico (PLA) da 3,0 mm e 0,75 kg.

Ognuna delle 28 ossa carpal stampate in 3D è stata mi-

surata allo stesso modo delle ossa da cadavere. In totale, sono stati valutati 56 campioni e sono state registrate 168 misurazioni. Le dimensioni delle ossa carpal stampate in 3D sono state quindi confrontate con quelle delle ossa da cadavere corrispondenti per valutare l'accuratezza del processo di conversione e stampa. La differenza nelle misurazioni è stata riportata come differenza percentuale rispetto alle dimensioni dell'osso cadaverico ed è stata valutata la significatività statistica.

Risultati

Le misurazioni delle ossa prelevate da cadavere e quelle dei modelli stampati sono state eseguite in modo analogo da due diversi ricercatori. Un lavoro di Heinzelmann et al.⁷ ha stabilito i parametri morfometrici dello scafoide definendo la lunghezza e la larghezza rispettivamente come la distanza dal polo prossimale alla superficie articolare distale e la misura dell'ampiezza al terzo medio. Allo stesso modo, Vaezi et al.⁸ hanno valutato i normali indici radiografici del polso inclusa la lunghezza del capitato, che è stata definita come la distanza dal suo polo distale al polo prossimale su una radiografia in AP del polso. Queste misurazioni anatomiche dello scafoide e del capitato corrispondono alle dimensioni utilizzate nel nostro studio; tuttavia, rimane una scarsità di dati sulla lunghezza e sulla circonferenza del trapezio e del semilunare accettate in letteratura per guidare la nostra misurazione di queste ossa.

Le misurazioni delle ossa carpal del cadavere e quelle dei corrispondenti modelli stampati in 3D sono mostrate nella Tabella I. Le ossa prelevate da cadavere hanno mostrato

Tabella I. Le misurazioni delle ossa prelevate da cadavere e quelle stampate in 3D: volume (cc), lunghezza (mm) e circonferenza (mm). Sono incluse le medie e le deviazioni standard per ogni osso.

	Capitato			Semilunare			Scafoide			Trapezio		
	V (cc)	L (mm)	C (mm)	V (cc)	L (mm)	C (mm)	V (cc)	L (mm)	C (mm)	V (cc)	L (mm)	C (mm)
Cadaveri												
Media	4,5	24,2	54,5	3,1	19,2	49,0	3,9	29,7	42,8	3,8	21,1	44,6
DS	1,0	2,1	4,5	0,5	2,8	7,2	1,1	4,4	4,6	1,0	4,0	5,9
Modelli 3D												
Media	4,3	26,1	55,0	3,6	20,0	49,2	4,4	29,8	44,5	3,9	21,0	44,9
DS	1,0	2,7	4,8	1,1	3,4	8,9	1,1	3,8	4,6	1,1	3,1	6,4
Differenze	0,2	1,9	0,5	0,5	0,8	0,2	0,5	0,1	1,7	0,1	0,0	0,3
% errore	5,3	7,6	0,9	15,5	4,3	0,4	12,4	0,4	4,0	3,8	0,1	0,7
p	0,3	0,1	0,7	0,2	0,3	0,8	0,1	0,9	0,1	0,6	0,7	0,7

Abbreviazioni: V, volume; L, lunghezza; C, circonferenza; cc, centimetri cubi; mm, millimetri; DS, deviazione standard.

una grandezza media maggiore di 0,50 cc (12,1%) per quanto riguarda il volume del capitato e di 2,5 mm (12,8%) per la lunghezza trapezio; in modo opposto, tutte le altre misurazioni dei modelli stampati in 3D in media erano più grandi delle corrispondenti ossa cadaveriche. La lunghezza e la circonferenza media delle ossa stampate in 3D erano rispettivamente entro 2,3 mm (9,8%) e 2,2 mm (4,4%) rispetto alle dimensioni dell'osso cadaverico. Si è riscontrata una maggiore discrepanza nel volume misurato, che in media era entro 0,65 cc (15,9%) confrontato con le ossa cadaveriche. Non si sono evinte differenze significative (valore $p > 0,05$) tra le misurazioni di lunghezza, circonferenza e volume tra le ossa di cadavere e i modelli stampati in 3D, confrontati utilizzando un t-test.

Non era prevedibile che quasi tutte le misurazioni dei modelli stampati in 3D fossero in media più grandi delle corrispondenti misurazioni delle ossa carpali. I tessuti molli e la cartilagine sono scarsamente visualizzati e differenziati l'uno dall'altro durante all'immagine TC. Al contrario, la TC è molto efficace nel delineare le strutture ossee. Pertanto, poiché i modelli sono stati stampati sulla base di scansioni TC, si può supporre che un modello stampato in 3D sia esso stesso una rappresentazione puramente ossea dell'osso cadaverico privato dei tessuti molli circostanti come cartilagine, legamenti e tendini. Se ciò fosse vero, le misurazioni di lunghezza, circonferenza e volume in media sarebbero probabilmente ridotte nei modelli stampati in 3D, dato che i campioni di cadavere potevano presentare residui dei tessuti molli nonostante un'accurata scheletrizzazione dell'osso durante la dissezione cadaverica in toto eseguita da un ricercatore.

Discussione

Attualmente nel campo dell'ortopedia, l'uso della tecnologia di stampa 3D sta guadagnando molta popolarità; tuttavia, la sua conoscenza è limitata, la curva di apprendimento è lenta ed il costo è elevato. Tutto ciò ha impedito alla sua moltitudine di applicazioni di diventare di utilizzo comune nella pratica clinica⁹. Le complicanze intraoperatorie nella maggior parte dei casi ortopedici complessi sono dovute a tempi di intervento e anestesia prolungati, eccessivo sanguinamento intraoperatorio e somministrazione di farmaci ad alto dosaggio, alcuni eventi dei quali possono essere attribuiti ad una pianificazione preoperatoria inadeguata e imprecisa¹⁰. Sempre più studi hanno dimostrato che l'uso di modelli stampati in 3D per la pianificazione chirurgica ha portato a un aumento del tasso di successo chirurgico, a una riduzione del tempo operatorio e a una migliore comunicazione medico-paziente. La stampa 3D potrebbe aggiungere un enorme valore alla cura del paziente e migliorare i risultati. Per questo motivo,

la stampa 3D dovrebbe essere accurata, riproducibile ed efficiente, pertanto, sono necessari studi per confermare l'affidabilità della stampa 3D al fine di giustificarne l'uso quotidiano nella pratica clinica.

Il nostro studio presenta alcuni limiti. In primo luogo, due individui hanno eseguito la dissezione cadaverica del polso, in modo operatore-dipendente. Per questo motivo, quantità variabili di tessuti molli possono essere rimaste sulle ossa del cadavere con il potenziale rischio di distorcere le misurazioni. Al contrario, i modelli stampati in 3D rappresentavano una struttura puramente ossea senza tessuti molli o cartilagine date le diverse densità di segnale di questi tessuti all'esame TC. In secondo luogo, il suddetto protocollo utilizzato per misurare la lunghezza e la circonferenza delle ossa è imperfetto a causa della normale variazione anatomica riscontrata tra i sette polsi cadaverici. È discutibile se la lunghezza e la circonferenza siano state misurate nella posizione esatta sia per l'osso del cadavere che per il modello anatomico. In terzo luogo, sebbene non statisticamente significativo, la differenza del 15,9% nel volume medio tra cadavere e modelli stampati in 3D è probabilmente clinicamente significativa, specialmente quando si creano impianti personalizzati per la fissazione delle ossa carpali utilizzando modelli stampati in 3D come riferimento. La differenza nel volume medio può essere attribuita alla tecnica di misurazione adottata e alla dimensione limitata del campione del nostro studio ($n = 7$). La tecnica di spostamento del volume utilizzata potrebbe avere un margine di errore. È molto probabile che non tutto il fluido spostato sia stato misurato adeguatamente. Studi futuri sono necessari per aumentare la dimensione del campione, che in teoria diminuirebbe la deviazione standard e ridurrebbe gli effetti dell'errore umano sulla differenza nelle misurazioni tra le ossa di cadavere e i modelli stampati in 3D.

Nel presente studio, abbiamo confrontato le dimensioni (lunghezza, circonferenza e volume) di ossa carpali selezionate stampate in 3D (scafoide, capitato, semilunare e trapezio) sulla base di scansioni TC dei polsi cadaverici con le dimensioni delle loro ossa carpali corrispondenti originali. I nostri risultati indicano che non vi è alcuna differenza statisticamente significativa tra tutte le misurazioni dei modelli stampati in 3D e quelle delle loro ossa di cadavere corrispondenti, suggerendo che la stampa 3D basata su file STL generati da scansioni TC può essere sia accurata che riproducibile. Ci sono solo pochi articoli sulla stampa 3D in ambito medico che descrivono l'accuratezza e/o la riproducibilità, che sono elementi chiave che devono essere affrontati sia dai ricercatori che dai radiologi che si occupano della produzione di modelli stampati in 3D per la cura del paziente. Esiste un rischio di errore in ogni fase del processo di stampa 3D, che include l'imaging, la segmentazione, la generazione STL, il post-pro-

cessing STL, la stampa 3D e la pulizia/preparazione del modello anatomico⁴. Huutilainen et al.¹¹ hanno eseguito uno studio volto a dimostrare l'imprecisione del passaggio di conversione da DICOM a file STL. Nel loro studio, tre diverse istituzioni hanno convertito un identico set di dati DICOM del cranio di un singolo paziente in un file STL utilizzando il proprio software preferito, nessuno dei quali era lo stesso. Utilizzando la stessa stampante 3D, questi file STL sono stati successivamente utilizzati per fabbricare 3 singoli modelli di cranio. I tre crani fabbricati sono stati scansionati e le differenze nelle geometrie del modello sono state valutate utilizzando un software di ispezione. Gli autori hanno concluso che i modelli anatomici dello stesso individuo possono variare notevolmente a seconda del software utilizzato per la conversione da DICOM a STL e dei parametri tecnici utilizzati. Gli errori cumulativi che si verificano durante ogni fase del protocollo di lavoro vengono spesso trascurati a causa di un'eccessiva fiducia sulle tecnologie sottostanti. Man mano che l'uso della stampa 3D diventerà sempre più diffuso, i radiologi dovranno convalidare le loro tecniche utilizzando sistemi di accuratezza e riproducibilità standardizzati e tutti coloro che sono coinvolti nella stampa 3D clinica dovranno attenersi a delle linee guida ben stabilite.

Nell'ambito della chirurgia della mano, Schweizer et al.¹² hanno confrontato l'accuratezza delle riduzioni delle pseudoartrosi e delle fratture di scafoide trattate chirurgicamente utilizzando guide di riduzione stampate in 3D specifiche per il paziente (create utilizzando come modello lo scafoide sano controlaterale), con la tecnica a mano libera. Gli autori hanno concluso che, sebbene lo scafoide sia piccolo, è possibile utilizzare guide di riduzione personalizzate stampate in 3D che, se utilizzate, portano a una ricostruzione anatomica significativamente migliore rispetto a quella risultante da una tecnica a mano libera.

Conclusioni

La stampa 3D è uno strumento specifico per il paziente e risulta non solo utile, ma anche conveniente. Nonostante ciò, modelli stampati in 3D non perfetti possono potenzialmente portare a una pianificazione preoperatoria inappropriata, portando infine a complicanze per il paziente e il medico⁴. Questo studio dimostra che il processo di stampa 3D può creare modelli ossei sia in modo accurato che riproducibile la cui anatomia corrispondente si presenta in modo pressoché sovrapponibile a quella cadaverica.

Bibliografia

- 1 Eltorai AEM, Nguyen E, Daniels AH. Three-Dimensional Printing in Orthopedic Surgery. *Orthopedics* 2015;38:684-687. <https://doi.org/10.3928/01477447-20151016-05>.
- 2 Liaw C-Y, Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine. *Biofabrication* 2017;9:024102. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa7279>.
- 3 Galvez M, Asahi T, Baar A, et al. Use of Three-dimensional Printing in Orthopaedic Surgical Planning. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev* 2018;2:e071. <https://doi.org/10.5435/JAOSGlobal-D-17-00071>
- 4 George E, Liacouras P, Rybicki FJ, Mitsouras D. Measuring and Establishing the Accuracy and Reproducibility of 3D Printed Medical Models. *Radiographics* 2017;37:1424-1450. <https://doi.org/10.1148/rg.2017160165>
- 5 Ogden KM, Aslan C, Ordway N, et al. Factors Affecting Dimensional Accuracy of 3-D Printed Anatomical Structures Derived from CT Data. *J Digit Imaging* 2015;28:654-663. <https://doi.org/10.1007/s10278-015-9803-7>
- 6 Wu A-M, Shao Z-X, Wang J-S, et al. The accuracy of a method for printing three-dimensional spinal models. *PLoS ONE* 2015;10:e0124291. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124291>
- 7 Heinzelmann AD, Archer G, Bindra RR. Anthropometry of the human scaphoid. *J Hand Surg Am* 2007;32:1005-1008. <https://doi.org/10.1016/j.jhssa.2007.05.030>
- 8 Vaezi T, Hassankhani GG, Ebrahimzadeh MH, et al. Evaluation of Normal Ranges of Wrist Radiologic Indexes in Mashhad Population. *Arch Bone Jt Surg* 2017;5:451-458.
- 9 Vaish A, Vaish R. 3D printing and its applications in Orthopedics. *J Clin Orthop Trauma* 2018;9(Suppl 1):S74-S75. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.02.003>
- 10 Zambouri A. Preoperative evaluation and preparation for anesthesia and surgery. *Hippokratia* 2007;11:13-21.
- 11 Huutilainen E, Jaanimets R, Valášek J, et al. Inaccuracies in additive manufactured medical skull models caused by the DICOM to STL conversion process. *J Craniomaxillofac Surg* 2014;42:e259-265. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2013.10.001>
- 12 Schweizer A, Mauler F, Vlachopoulos L, et al. Computer-Assisted 3-Dimensional Reconstructions of Scaphoid Fractures and Nonunions With and Without the Use of Patient-Specific Guides: Early Clinical Outcomes and Postoperative Assessments of Reconstruction Accuracy. *J Hand Surg Am* 2016;41:59-69. <https://doi.org/10.1016/j.jhssa.2015.10.009>