



UNIVERSITÀ DI PISA

LAUREA MAGISTRALE IN  
INFORMATICA UMANISTICA

SEMINARIO DI CULTURA DIGITALE A.A. 2016/17

# Prototipazione rapida e stampa 3D

*Francesco Danesi*

*Matricola: 567390*

*Sommario*

---

*Prototipazione rapida e utilizzo delle tecnologie di stampa 3D in numerosi  
campi d'impiego.*

---

# Indice

<b>1. ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>2. KEYWORDS</b>	<b>3</b>
<b>3. INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE</b>	<b>3</b>
<b>2.1. FABBRICAZIONE DIGITALE</b>	<b>3</b>
<b>2.2. FRESATRICE</b>	<b>3</b>
<b>2.3. LASER CUTTER</b>	<b>4</b>
<b>2.4. STAMPA 3D</b>	<b>5</b>
<b>2.5. I METODI DELLA STAMPA 3D</b>	<b>5</b>
<b>2.6. SOFTWARE DI MODELLAZIONE 3D</b>	<b>6</b>
<b>3. PROTOTIPAZIONE</b>	<b>6</b>
<b>3.1. PROCEDURA DI PROTOTIPAZIONE RAPIDA</b>	<b>7</b>
<b>4. FOTOGRAMMETRIA DIGITALE</b>	<b>9</b>
<b>4.1. CAPI D'IMPIEGO DELLA FOTOGRAMMETRIA DIGITALE</b>	<b>12</b>
<b>5. CAMPI D'IMPIEGO DELLE STAMPANTI 3D</b>	<b>13</b>
<b>5.1. STAMPANTI 3D PER USO ALIMENTARE</b>	<b>13</b>
<b>5.2. STAMPANTI 3D PER USO EDILIZIO</b>	<b>13</b>
<b>5.3. STAMPANTI 3D PER USO SPAZIALE</b>	<b>14</b>
<b>5.4. STAMPANTI 3D IN CAMPO MEDICO</b>	<b>15</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>17</b>

## **Abstract:**

La seguente relazione prende in esame le nuove tecnologie digitali volte alla prototipazione rapida e all'impiego delle stampanti 3D, nell'industria, in medicina, nel settore alimentare e nella valorizzazione e recupero del patrimonio culturale.

## **Keywords:**

Fabbricazione digitale, Tecnologie 3D, Accessibilità, Biotecnologie, Prototipazione rapida, Software 3d, Industria alimentare, Fotogrammetria, Applicazioni mediche, Edilizia.

## **Introduzione:**

«La stampa tridimensionale rende economico creare singoli oggetti tanto quanto crearne migliaia e quindi mina le economie di scala. Essa potrebbe avere sul mondo un impatto così profondo come lo ebbe l'avvento della fabbrica... Proprio come nessuno avrebbe potuto predire l'impatto del motore a vapore nel 1750 — o della macchina da stampa nel 1450, o del transistor nel 1950 — è impossibile prevedere l'impatto a lungo termine della stampa 3D. Ma la tecnologia sta arrivando, ed è probabile che sovverta ogni campo che tocchi.»<sup>1</sup> Seguirà una panoramica sulla tecnologia della stampa 3D, sui software che ne permettono l'impiego e sugli ambiti, non solo collegati alla cultura, nei quali si sta rapidamente affermando.

---

<sup>1</sup> The Economist, editoriale 10/02/2011

## **Fabbricazione digitale:**

Il termine Fabbricazione Digitale fa riferimento al processo attraverso cui è possibile creare oggetti solidi e tridimensionali, partendo da disegni digitali o da immagini acquisite dalla realtà, digitalizzate con appositi software. Il processo di prototipazione può sfruttare diverse tecniche, sia sottrattive (taglio laser e fresatura), sia additive (stampa 3D). Le prime creano un oggetto partendo da un blocco di materiale grezzo, asportando quello in eccesso, mentre le seconde lo creano attraverso la deposizione di materiale in strati sovrapposti.

## **Fresatrice:**

La fresatrice è una macchina CNC (computer numerical control) usata per la lavorazione di parti metalliche o di altri materiali in forme complesse. Nella sua forma più semplice una fresatrice non è altro che un motore su cui è fissato un utensile dotato di bordi smussati (fresa), che ruota sull'asse della fresa stessa. Il principio è lo stesso del trapano, ma le frese sono progettate per svolgere l'azione di taglio sul lato dell'utensile invece che sulla punta, quindi asportano il materiale invece di forarlo.

Le fresatrici CNC più moderne sono dotate di sistemi automatici per la sostituzione degli utensili e sono in grado di rendere interamente automatizzato il processo produttivo: ciò rende le lavorazioni più veloci ed economiche, anche senza l'intervento di un tecnico.

Il pregio principale delle fresatrici è di avere pochissimi limiti in termini di forme realizzabili e di poter svolgere con un solo programma di lavoro diverse operazioni complesse quali forature, rettifiche, alesature, tagli, arrotondamenti ecc. A seconda della fresatrice a disposizione, possiamo scegliere tra molti tipi di materiali diversi: pietra, legno, metallo, plastica.



## **Laser cutter:**

La laser cutter è una macchina CNC (computer numerical control) che utilizza una sorgente laser per tagliare i materiali. Il raggio laser viene facilmente concentrato attraverso diverse lenti,

raggiungendo così una potenza termica altissima. Nel momento in cui interagisce con il materiale, questo si surriscalda localmente fino alla fusione, causando l'espulsione della porzione fusa o la sua vaporizzazione. A differenza dei processi convenzionali non si ha usura e la rimozione del materiale non dipende dalla sua durezza, ma dalle proprietà ottiche del laser e da quelle ottiche e termofisiche del materiale. A seconda della potenza della macchina è possibile scegliere tra molti tipi di materiali diversi: legno, metallo, cartone, plexiglass, tessuti.



### **Stampa 3D:**

Le stampanti 3D sono macchine che consentono di creare un oggetto attraverso la deposizione progressiva e sovrapposta di strati di materiale. La macchina lavora prendendo il file 3D relativo ad un oggetto, acquisito tramite immagini o elaborato dal nuovo, e lo utilizza per fare una serie di porzioni in sezione trasversale. Le porzioni sono poi stampate e sovrapposte per creare l'oggetto. A partire dal 2009, con la scadenza del brevetto sulla tecnologia FDM, il costo delle stampanti 3D si è considerevolmente contratto, rendendole, unitamente ai materiali usati per la realizzazione tridimensionale del progetto, economicamente accessibili. Un altro elemento da tenere presente è che, fino a pochi anni fa, i software per la gestione e l'utilizzo delle stampanti 3D erano pochi ed inefficienti, ma ora iniziano ad essere presenti sul mercato programmi in grado di guidare l'ugello della macchina per eseguire oggetti di ogni tipo e dimensione, purché questo sia adeguatamente voluminoso e adatto a trattare il materiale da utilizzare.

A differenza delle tecnologie sottrattive, la tecnologia della stampa 3D presenta alcuni notevoli vantaggi: queste macchine sono generalmente più veloci, più affidabili e più semplici da usare rispetto alle che sfruttano tecnologie per la produzione sottrattiva. Offrono inoltre la possibilità di stampare e assemblare parti composte da diversi materiali con diverse proprietà fisiche e meccaniche in un singolo processo di costruzione.

### **I metodi della stampa 3D:**

Esistono diverse tecnologie per la stampa 3D e le loro differenze principali riguardano il modo in cui sono stampati gli strati. Alcuni metodi usano materiali che si sinterizzano, si fondono, o si ammorbidiscono tramite il calore (prodotto per irraggiamento da una sorgente di radiazione elettromagnetica, oppure da un fascio di elettroni) nel produrre gli strati, mentre altri depongono materiali liquidi che sono fatti indurire con tecnologie diverse. Nel caso dei sistemi di laminazione, si hanno strati sottili che vengono tagliati secondo la forma voluta e uniti insieme.

Ogni metodo ha i suoi vantaggi e inconvenienti in relazione a fattori quali la velocità di stampa del prototipo, il costo del prototipo stampato, il costo della stampante 3D, la scelta dei materiali e le colorazioni disponibili.

I metodi più utilizzati sono:

1. Stampa ad estrusione di materiale: il modello viene stampato uno strato alla volta, spargendo uno strato di polvere (gesso o resine) legato per mezzo di un inchiostro speciale inserito nella sezione trasversale della parte. Il processo viene ripetuto finché non è stampato ogni strato. Questa tecnologia permette anche di realizzare sporgenze ed è l'unica che consente prototipi interamente a colori. È inoltre riconosciuto come il metodo più veloce.
2. Digital Light Processing (DLP): una vasca di polimero liquido è esposta alla luce di un proiettore DLP in condizioni di luce inattinica, causandone l'indurimento del materiale. La piastra di costruzione poi si muove verso il basso per piccoli incrementi e il polimero liquido è di nuovo esposto alla luce. Il processo viene reiterato finché il modello non è costruito. Il materiale liquido in esubero è poi drenato dalla vasca, lasciando il modello solido.
3. Fused deposition modeling (FDM): Il metodo FDM è basato su un ugello che deposita un polimero fuso, strato dopo strato, per creare la geometria del pezzo. Un approccio simile è l'SLS: fusione selettiva di un mezzo stampato in un letto granulare. In questa variazione, il mezzo non fuso serve a sostenere le sporgenze e le pareti sottili nella parte che viene prodotta, riducendo il bisogno di supporti ausiliari temporanei per il pezzo da lavorare.
4. Micro fabbricazione 3D: In questo approccio, l'oggetto 3D desiderato è evidenziato in un blocco di gel da un laser concentrato. Il gel è fatto indurire in un solido dov'era proiettato il laser, grazie alla natura non lineare della foto-eccitazione, e quello in eccesso rimosso.

## Software di modellazione 3D:

Per poter stampare in 3D un oggetto bisogna avere un modello prodotto con appositi software di modellazione 3D come Blender, AutoCAD e OpenSCAD. Quindi, o si hanno buone doti di modellazione, oppure ci sono delle soluzioni con scanner 3D per poter replicare l'oggetto che si desidera stampare. Successivamente il modello digitale viene caricato tramite un apposito software, detto Slicer. Ne esistono di diversi tipi, sia open source sia proprietari, e tra i più famosi possiamo trovare CURA, Slic3R e Repetier host. Tramite questi software si possono impostare tutti i parametri della stampante 3D come lo spessore del layer, l'infill e la velocità di stampa.

## Prototipazione:

La prototipazione rapida (*rapid prototyping* abbreviata in RP) è un insieme di tecniche ad uso industriale volte alla realizzazione di un prototipo, in tempi brevi e a costi ridotti, a partire da una definizione matematica tridimensionale dell'oggetto, ottenuta tramite i software di modellazione 3D.

Lo sviluppo delle prime macchine RP è dovuto a Charles W. Hull, che realizzò la prima macchina di tipo SLA-1 (StereOLitographic Apparatus). Ricerche successive e sviluppi tecnici hanno permesso il superamento della tecnologia SLA e la messa a punto di tecnologie differenti quali LOM (*Laminated Object Manufacturing*), SLS (*Selective Laser Sintering*), FDM (*Fused Deposition Modeling*), LENS (*Laser engineered net shaping*), molte delle quali sono state descritte nel paragrafo precedente.

La prototipazione rapida si differenzia dalle tecniche tradizionali di lavorazioni meccaniche, perché, mentre queste ultime operano per asportazione di materiale (come nel caso della fresatrice), le tecniche RP operano su una base concettuale inversa, ossia per addizione di materiale, con la possibilità di ottenere forme anche molto complesse, impossibili da realizzare con le lavorazioni tradizionali.

## Procedura di Prototipazione rapida

La prototipazione rapida è una tecnica piuttosto recente, ma non del tutto standardizzata. Infatti ogni azienda ha sviluppato e continua a svilupparne una propria a causa dei materiali che deve lavorare, spesso molto differenti tra loro. Infatti la classificazione principale delle tecniche RP è sulla natura dei materiali impiegati, in particolare polveri, liquidi, solidi. Oggi l'impiego di polveri sta assumendo sempre maggiore importanza, poiché teoricamente la macchina può rimanere la stessa e, cambiando il tipo di materiale, si possono ottenere oggetti con caratteristiche differenti, sia estetiche che meccaniche.

Oltre alle polveri, che possono essere a uno o due componenti per la presenza di un legante, ci sono tecniche che si basano su liquidi, quali resine che vengono fatte polimerizzare, o materiali solidi quali fili o fogli speciali di carta.

Le fasi che portano alla realizzazione del prototipo sono le seguenti:

1. Creazione del file STL
2. Gestione del file STL
3. Costruzione del prototipo *layer by layer* (strato dopo strato)
4. Post trattamenti

La creazione del file STL (*Standard Triangulation Language To Layer*) è una fase preliminare alla prototipazione vera e propria, che consiste nella generazione del file STL e nella sua verifica. Questo è uno standard grafico che descrive l'oggetto tramite una scomposizione in triangoli delle superfici che lo compongono. Le superfici del pezzo vengono meshate ("magliate") con elementi triangolari. Un maggior numero di questi triangoli rende la superficie dell'oggetto da stampare meglio approssimata e definita. Lo standard STL fu sviluppato inizialmente dalla "3D Systems" ed è attualmente lo standard accettato da quasi tutti i sistemi di prototipazione rapida in commercio.

La fase di generazione del file STL è scomponibile in due sotto-processi:

1. La prima sotto-fase impegna l'intelletto del progettista e consiste nel realizzare il modello matematico, esclusivamente in ambiente CAD, partendo da due strade ben distinte: mediante l'ausilio integrale di software o mediante l'impiego di tecniche di reverse engineering. Nel primo caso si realizza un prodotto che si ha già in mente e che si vuole concretizzare in formato digitale, oppure si deve procedere alla modifica di un prodotto

esistente di cui si ha già il modello matematico. Nel secondo, in mancanza di un modello, si procede mediante tecniche di ingegneria inversa (reverse engineering), ossia, mediante appositi strumenti, si scansiona la superficie dell'oggetto di cui si vuole il modello CAD. Viene così acquisito un certo numero di punti appartenenti alle superfici scansionate, detti "nuvola di punti". La nuvola viene elaborata tramite software dedicati per ottenere il modello matematico tridimensionale.

2. La seconda sotto-fase consiste nel realizzare il file di estensione .STL mediante apposite utility di esportazione o direttamente dal CAD, qualora questo plug-in sia integrato; in alternativa si deve prima salvare il file in un formato intermedio (Iges, Acis-Sat) e poi realizzare l'STL. In questo caso bisogna fare attenzione a non effettuare troppi passaggi prima di arrivare all'STL, per evitare un deterioramento eccessivo della matematica del modello.

Successivamente è necessario gestire il file STL in modo da verificare che sia esente da errori. Il controllo si fa attraverso software dedicati, come il Magics RP, atti a individuare e correggere gli errori presenti, progettare i supporti per le parti a sbalzo, orientare gli oggetti (operazione che può influenzare fortemente il risultato), modificarli ed eseguire lo slicing, cioè generare gli strati che, sovrapposti gli uni agli altri daranno vita al solido finale. Questa è un'operazione critica, perché determina le caratteristiche superficiali dell'oggetto finito. Questo processo può essere di tipo uniforme oppure adattativo, quando lo spessore delle fette è variabile e lo si sceglie in funzione della curvatura della superficie al fine di adattare meglio la geometria finale, riducendo così l'effetto staircase (le superfici inclinate sono approssimate tramite scalini).

La costruzione del prototipo "Layer by Layer" consiste nell'inviare alla macchina il file STL o le slices che compongono l'oggetto, a seconda della tecnologia di stampa impiegata. Questa fase può durare alcune ore (in funzione delle dimensioni dell'oggetto e in particolare dell'altezza), pertanto un'accurata scelta dell'orientamento è importante sia per la finitura superficiale sia per ridurre i tempi di lavoro della macchina.

I post trattamenti sono operazioni manuali il cui scopo è togliere l'oggetto stampato dalla macchina e liberarlo dal supporto o dal materiale in eccesso, ed eventualmente operare ulteriori finiture. Queste possono essere semplici, nel caso in cui si tratti di rimuovere dal prototipo le polveri in eccesso, o leggermente più complicate, come (nel caso della tecnica PolyJET) dove è necessario ricorrere a un'idropulitrice per rimuovere il liquido di supporto. In altri casi si può procedere a un miglioramento delle superfici ricorrendo all'impiego di carta abrasiva o verniciatura.

Come ogni attività anche la RP è soggetta ad alcuni problemi che influenzano il risultato, pertanto un'attenta analisi preliminare e una corretta applicazione delle metodologie derivanti da queste analisi, aiutano a diminuire di molto gli inconvenienti che potrebbero verificarsi.

Il primo problema può essere quello legato alla generazione del file STL, dato che un eccesso di errori durante la modellazione tramite software può determinare un deterioramento della rappresentazione dell'oggetto tale che il risultato è un prototipo inutilizzabile. Gli errori più comuni e le cause che li generano sono:

1. Discontinuità del verso della normale dei triangoli; i triangoli presentano differente orientazione che genera rugosità superficiale sul prototipo finito.
2. Overlapping (sovrapposizione) dei triangoli: alcuni triangoli risultano parzialmente o completamente sovrapposti.



3. *Holes* (fori): Si possono creare dei fori in fase di lavorazione che devono essere chiusi manualmente
4. *Bad contours* (contorni imperfetti): i triangoli, per effetto di una errata scelta della tolleranza e delle caratteristiche della superficie, risultano discontinui e pertanto si deve ricorrere a una operazione di *stitching* (ricucitura), ossia la superficie o una parte di essa deve essere tirata in modo da far combaciare i bordi.
5. Problemi di *slicing*: Data la particolare metodologia di lavorazione, la superficie finale del pezzo presenterà un aspetto a gradini. È evidente che a differenti spessori delle *slice* corrisponderanno differenti risultati finali, in particolare per le superfici curve. L'ideale sarebbe disporre di spessori infinitesimali e di macchine capaci di stampare tali *slice* in modo velocissimo. Per macchine a spessore di *slice* costante, dette *slice* uniformi, il problema non si pone più di tanto, dato che il campo d'intervento dell'operatore è relegato alla sola scelta dell'orientazione del pezzo sulla tavola di lavoro. Discorso differente nel caso di sistemi a *slice* adattative; in questi casi appositi software si occupano di modulare l'altezza delle *slice* in base alla curvatura del pezzo, per cui si avranno *slice* più spesse di fronte a superfici a grande raggio di curvatura e più sottili nelle zone con un raggio inferiore. Il risultato è una superficie a gradini, effetto denominato *staircase* (letteralmente: scalinata, gradinata).
6. Problemi di contenimento: un altro importante inconveniente è il mancato contenimento della superficie nominale del prototipo in sé stesso.
7. Problemi d'interfacciamento: sono i problemi che si riscontrano durante il passaggio dei dati dal software di modellazione 3D alla macchina.

Infine, sono stati sviluppati dei metodi volti a ottimizzare la fase di stampa consistenti nello scegliere la corretta orientazione per tutti i corpi messi sulla tavola di lavoro. Ad esempio, cambiare l'angolo che una superficie forma con la base di lavoro aumenta o diminuisce la rugosità del prototipo (effetto *staircase* più marcato). Inoltre, i tempi di lavorazione dipendono molto dalla macchina impiegata. Una disposizione con i pezzi lungo l'asse y, ha un tempo di costruzione molto superiore a quello necessario a realizzare gli stessi pezzi disposti lungo l'asse x della macchina.

Le linee guida che si possono delineare per la disposizione dei pezzi sono le seguenti:

1. Valutare preventivamente l'orientazione ottimale e tenere presenti le disposizioni possibili, compatibilmente con le specifiche imposte dal committente.
2. Tra le orientazioni ammissibili, scegliere quelle che presentano altezza inferiore.
3. Disporre sulla tray (tavola di appoggio) pezzi che presentano altezza il più possibile omogenea, cercando di coprire la maggior superficie possibile, al fine di ridurre le passate necessarie a completare ogni slice

## Fotogrammetria digitale

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che permette di acquisire dei dati metrici di un oggetto (forma e posizione), tramite l'impiego e l'analisi di una coppia di fotogrammi stereometrici. In tempi più recenti, grazie all'aumento della potenza a disposizione dei calcolatori di uso comune, questa tecnica si è "digitalizzata" e ha aperto nuovi scenari in diversi campi di ricerca.

Il termine fotogrammetria automatica è stato sdoganato di recente nella letteratura specialistica: fino a poco tempo fa si cercava di mantenere ben separata la fotogrammetria tradizionale dalle tecniche di elaborazione automatica, per le quali si parlava di foto-modellazione. Nella letteratura scientifica è comunemente diffuso il termine Image-Based Modeling and Rendering, al quale si è affiancato il termine automatic photogrammetry. Si parla anche di Structure-from-Motion, anche se questa dicitura è imprecisa, in quanto riguarda solamente la prima parte del processo di elaborazione delle immagini (image matching e sparse reconstruction).

La caratteristica fondamentale che il modello digitale 3D deve possedere è di essere metricamente corretto, cioè deve essere nella giusta scala e deve essere misurabile in maniera precisa. Una questione a parte è quella del colore. Nel caso di un modello che deve essere fruito tramite internet o su applicazioni per tablet e smartphone, è importante che il colore sia realistico; non è invece fondamentale nel caso di un modello realizzato in funzione di una riproduzione in stampa 3D con una tecnologia che non permette di riprodurre il colore (ad esempio SLA, DLP o FFF).

I passaggi attraverso cui i software di fotogrammetria automatica oggi disponibili elaborano immagini bidimensionali per estrarre modelli tridimensionali sono sempre gli stessi. Questo significa che una volta che si è ben compreso cosa c'è alla base dell'elaborazione, si è in grado di utilizzare qualsiasi software. Inoltre, è importante conoscere quali sono i passaggi dell'elaborazione, per sapere come scattare correttamente le fotografie e per riuscire a intervenire qualora si presentino delle problematiche durante la creazione del modello 3D.

Il dato di partenza è sempre un insieme di fotografie, dunque un set di immagini digitali bidimensionali che vengono elaborate dal software per estrarre dati tridimensionali.

L'elaborazione delle immagini avviene attraverso quattro fasi distinte e successive:

1. Structure-from-motion (SfM) e Multiview Stereo Reconstruction (MVS): questa è la fase fondamentale, il momento più delicato e lungo da un punto di vista di tempo di elaborazione software. È in questa fase che viene ricostruita la geometria di presa delle fotografie ed elaborata la nuvola di punti, comunemente detta dense point cloud.
2. Mesh reconstruction: a partire da una nuvola di punti densa viene ricostruita una superficie continua, composta da poligoni i cui vertici sono i punti della nuvola;
3. Il colore viene applicato alla Mesh, che di base non lo possiede, secondo due modalità alternative: color-per-vertex, in cui il colore dei punti della dense point cloud viene trasferito ai poligoni del mesh; texture mapping, nella quale le immagini utilizzate nel rilievo vengono applicate sui poligoni del mesh;
4. Il modello 3D deve essere messo in scala utilizzando almeno una distanza di riferimento, perché il software non è in grado di dedurre le dimensioni degli oggetti che compaiono nelle fotografie.

#### 1. Structure-from-motion (SfM) e Multiview Stereo Reconstruction (MVS)

Per poter ricostruire la tridimensionalità è necessario ricostruire la posizione da cui sono state scattate le singole fotografie (la cosiddetta geometria di presa) in modo tale da poter in seguito dedurre per triangolazione la posizione degli oggetti presenti in esse. Mentre la fotogrammetria tradizionale utilizza i dati GPS delle immagini o punti di controllo di coordinate note, la fotogrammetria automatica si basa sull'individuazione di punti chiave, ben riconoscibili in tre o più immagini, che serviranno per creare corrispondenze fra le fotografie e collegarle tra loro (image matching).

Partendo dai punti chiave, attraverso un procedimento di triangolazione fotogrammetrica a stelle proiettive (meglio noto come bundle adjustment), in maniera automatica viene calibrata la fotocamera e viene ricostruita la posizione di scatto delle singole fotografie. Per ogni punto chiave vengono ricavate le coordinate reali  $x,y,z$  che vengono materializzate tridimensionalmente in una sparse points cloud, cioè in una nuvola di punti a bassa densità (sparse reconstruction).

Nel passaggio successivo la nuvola di punti a bassa densità viene infittita aumentando il numero di punti (dense reconstruction): i dati relativi alla posizione  $x,y,z$  dei punti chiave vengono utilizzati come punti di partenza per estendere l'analisi delle immagini alle zone prossimali ai punti chiave e riconoscere ed estrarre la posizione  $x,y,z$  degli elementi circostanti. Il risultato sarà una dense points cloud, cioè una nuvola di punti densa.

Il dato grezzo, ottenuto da un qualsiasi sistema di rilievo 3D, è sempre una nuvola di punti: ciò significa che la superficie che stiamo rilevando è descritta da un insieme di punti tridimensionali. Nelle fasi successive di elaborazione questo dato grezzo viene utilizzato per realizzare una superficie poligonale continua, detta mesh, quindi un modello 3D solido. Se apriamo una nuvola di punti con un editor di testo vedremo generarsi un codice numerico: a ogni riga corrisponde un punto e le prime tre colonne sono le coordinate tridimensionali  $x$ ,  $y$  e  $z$  di quel punto; le successive tre colonne riguardano le informazioni sul colore: la prima colonna corrisponde all'intensità del rosso, la seconda del verde, la terza del blu; dunque si tratta della codifica di colore RGB classica di qualsiasi fotografia. Otterremo quindi un file in cui a ogni punto sono associati una posizione ben precisa nello spazio e un colore.

## 2. Mesh reconstruction

In questa fase si passa da un insieme disordinato di punti a una superficie continua, che compone il modello 3D vero e proprio. Partendo dai punti della dense point cloud, viene generata un mesh composta da un insieme di poligoni triangolari, i cui vertici corrispondono ai punti della nuvola. Il mesh è quindi un insieme di poligoni definiti da tre vertici descritti da coordinate tridimensionali  $x,y,z$ .

## 3. Attribuzione del colore

Il mesh in origine non ha colore, questo deve quindi essere assegnato ai poligoni. Per farlo esistono due modi differenti: tramite il color-per-vertex o il texture mapping.

Poiché i vertici di ciascun poligono corrispondono ai punti della nuvola di punti, il colore di questi ultimi può essere trasferito ai poligoni corrispondenti (ovviamente ogni poligono avrà un colore mediato tra quelli dei tre vertici). Questo metodo è comunemente indicato come color-per-vertex. La resa complessiva del colore della superficie è strettamente legata alla risoluzione del modello: maggiore è la sua risoluzione (alto numero di poligoni di piccole dimensioni), maggiore sarà la qualità "visiva" del colore della superficie; al contrario, se la risoluzione del modello è bassa (basso numero di poligoni di grandi dimensioni) la resa del colore sarà molto approssimata, con un effetto visivo sfumato o sfocato.

Il secondo metodo prevede l'utilizzo delle immagini di partenza. Poiché queste sono già orientate rispetto al modello, possono essere proiettate sul modello e applicate ai poligoni del mesh. Le immagini vengono così riunite in una nuova immagine quadrata, detta texture (una sorta di puzzle di tutte le immagini), che va a ricoprire, come un lenzuolo, il mesh. Il vantaggio di questo metodo è che la qualità visiva del colore è pari alla qualità delle fotografie, e che è slegata dalla risoluzione del

modello, in quanto la texture copre letteralmente la mesh e la qualità visiva sarà sempre la stessa, indipendentemente dalla risoluzione del modello.

#### 4. Scalatura del modello

Al termine delle precedenti fasi di elaborazione, il modello è geometricamente corretto, ma non è nella giusta scala: questo perché il software non ha modo di calcolare le dimensioni degli elementi presenti nelle immagini. Il modello 3D deve quindi essere portato alle dimensioni reali se vogliamo poter effettuare su di esso misure di precisione o trarne prodotti come piante e prospetti.

Mettere in scala un modello è piuttosto semplice e può essere fatto conoscendo almeno una distanza di riferimento all'interno della scena 3D ricostruita. Indicando infatti al software la misura reale di un elemento che compare nel modello, esso è in grado di riportare tutti gli elementi ricostruiti alla giusta scala. Ciò può essere fatto in vari modi: o esempio misurando la distanza tra due elementi del modello 3D (ad esempio la distanza tra due spigoli), oppure inserendo nella scena da fotografare un elemento di dimensioni note, come un metro o un righello, oppure, cosa più comune, applicando a fianco dell'oggetto che dobbiamo rilevare dei target, dei quali basterà misurare la distanza tra l'uno e l'altro.

## **Campi d'impiego della fotogrammetria**

In architettura la fotogrammetria costituisce oggi la metodologia più veloce per il rilievo di una struttura, grazie all'elevata velocità di acquisizione e all'immediata fase di elaborazione dei software SFM.

Dai modelli testurizzati sono facilmente estraibili fotopiani 2D, quali piante, sezioni e prospetti. È così possibile valutare dettagliatamente tutti gli elementi fondamentali per interventi di ristrutturazione o nuove costruzioni. Il modello 3D prodotto, inoltre, è idoneo ad essere importato in qualsiasi programma di rendering per poter produrre viste ed eventuali foto-inserimenti realistici o prototipi stampati per mezzo di stampanti 3D.

L'applicazione della fotogrammetria a tutti i campi dei Beni Culturali permette di ottenere in modo rapido informazioni metricamente precise, fondamentali per lo studio di opere di varie dimensioni. Le informazioni così acquisite possono essere consultate anche senza avere sotto controllo l'oggetto della ripresa fotografica. Inoltre, è un ottimo metodo per creare una banca dati dalla quale è possibile attingere ogni tipo di informazione anche dopo eventi che hanno modificato l'aspetto dell'oggetto.

Fra tutti, l'archeologia è sicuramente il campo che ottiene i maggiori benefici da questa tecnologia, se si tengono in considerazione tempi, risultati e qualità. Questo perché consente di documentare sia la forma effettiva sia l'aspetto cromatico del manufatto in maniera rapida, rendendo possibile l'analisi delle eventuali deformazioni subite nel tempo. Inoltre, non è raro che un manufatto debba essere ricoperto dopo il periodo di scavi. In questi casi la fotogrammetria permette di creare un modello virtuale facilmente interrogabile in qualsiasi momento, senza trovarsi in loco. È altresì possibile condurre indagini su reperti con lo scopo di ricostruirne le vestigia perdute, in modo da semplificare le fasi più complesse di un restauro.

In geologia la fotogrammetria permette la creazione rapida di Dem con elevato dettaglio, utile alla verifica della stabilità dei versanti e al calcolo caduta massi in condizioni di emergenza. Inoltre, l'interfacciamento con il GPS consente una georeferenziazione veloce ed automatica. Grazie alla combinazione dei sistemi APR con i moderni software SFM è possibile produrre ortofoto, fondamentali per la cartografia tecnica e per le carte tematiche.

## Campi d'impiego delle stampanti 3d

Riporto alcuni esempi relativi all'impiego in vari settori della tecnologia della stampa 3d.

### Stampanti 3D per uso alimentare

La stampa 3D si è dimostrata, sin dalla sua prima evoluzione, molto interessante per il settore alimentare, tanto che negli Stati Uniti sono già stati aperti alcuni ristoranti che preparano piatti mediante l'utilizzo di stampanti 3D. Queste pietanze vanno dallo zucchero al cioccolato, dai biscotti alla pizza, dalla pasta alle verdure.

Anche la Barilla si è dimostrata intenzionata a sviluppare una stampante 3D in grado di stampare delle paste in formati personalizzabili per qualsiasi ristorante e per questo nel 2014 ha indetto a termine un concorso al quale hanno partecipato oltre cinquecento designer, che hanno creato 216 modelli di pasta unici.

A Cibus 2016 (Salone internazionale sulle ultime tendenze riguardanti il food tenutosi a Parma), la stessa ditta ha presentato un nuovo prototipo di stampante 3D con la quale, utilizzando degli ingredienti contenuti all'interno di una cartuccia, è ora in grado di stampare la pasta fresca impastando sul momento acqua e semola di grano duro. Tale prototipo potrà essere utilizzato in ambito domestico o all'interno di ristoranti o aziende.



### Stampanti 3D per uso edilizio

Dal 2016 si stanno testando materiali e stampanti 3D interamente ad uso edilizio. In maniera non dissimile dal funzionamento di una stampata 3D tradizionale, quelle sviluppate per l'industria edile

depositano strato per strato le pareti degli edifici, stabilizzandole a mano a mano con supporti di metallo, rimossi una volta che il materiale si è solidificato. In Italia, l'azienda D-Shape è riuscita a stampare la pietra. WASP, altra azienda nostrana, è riuscita a stampare oggetti in argilla.

Al di fuori dell'Italia si registrano notevoli sviluppi soprattutto nella messa a punto del materiale cementizio: in Cina si è riusciti a stampare dieci case in calcestruzzo in 24 ore; nella California del Sud, durante il progetto Contour Crafting, è stata ideata una stampante di dimensioni massive in grado di costruire, in maniera del tutto autonoma, una casa di 100 m<sup>2</sup>.

In Spagna, durante il progetto Minibuilders, sono stati progettati e impiegati piccoli robot che, muovendosi su cingoli, rilasciano materiale da costruzione. A differenza delle stampanti 3D, queste piccole macchine semoventi potrebbero stampare volumi di dimensioni infinite.



## **Stampanti 3D per uso spaziale**

Nel 2013 nasce il progetto AMAZE (Produzione efficiente di prodotti di Metallo ad alta tecnologia con Manifattura additiva attraverso "Spazzatura Zero"), con l'obiettivo di portare la stampa 3D nello spazio, in modo da poter stampare autonomamente pezzi di ricambio metallici, contenendo i costi e minimizzando gli sprechi.

È attualmente in fase di test, da parte dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), la costruzione di componenti satellitari ad uso spaziale, mediante l'utilizzo della tecnologia della Stampa 3D. Ad oggi si stanno effettuando dei controlli su antenne radio 3D ad uso satellitare.

Sempre da parte dell'ESA è in fase di studio la possibilità di inviare robot sulla Luna per poter costruire da remoto basi sulla superficie Lunare, in preparazione all'invio di equipaggio umano. Tale opera verrebbe realizzata con dei moduli gonfiabili fungenti da supporto e robot con la capacità di trasportare e sinterizzare la sabbia lunare in modo da creare uno scudo all'esterno del modulo gonfiabile. Nel novembre 2014 è stata portata a bordo della stazione spaziale internazionale una stampante 3D, denominata POP3D (Portable On-Board Printer), con cui è stato stampato il primo oggetto della storia nello spazio. Il progetto, principalmente italiano, è volto allo studio della tecnologia additiva per future applicazioni in ambito spaziale. Infine, NASA fa sapere che sta pensando ad un sistema per inviare la stampante 3D Contour Crafting su altri pianeti (sempre che se ne trovino di adatti), in modo da realizzare abitazioni in totale autonomia prima dell'arrivo degli astronauti.

## **Stampanti 3D in campo medico**

Nel settore medico la stampa 3D ha prodotto un fiorire di nuovi progetti, specialmente nel ramo della combinazione della stampa additiva con tecniche di imaging 3D: è, infatti, così possibile 'digitalizzare' il paziente tramite le tecnologie tradizionali (ad esempio TAC) e modellare al computer una protesi o un pezzo di organo perfettamente su misura, con costi e tempi ridotti. In precedenza, era invece necessario ricorrere alla produzione di stampi e/o costose opere di lavorazione meccanica per cui la 'personalizzazione' della protesi risultava molto costosa, data la necessità di ammortizzare, con un singolo intervento chirurgico, la spesa di tutte le complesse lavorazioni impiegate per la realizzazione di una singola protesi. Ad Utrecht è stato effettuato il primo trapianto di cranio stampato in 3D. La calotta cranica è stata realizzata con una resina speciale, tramite l'utilizzo di una stampante 3D. Altri possibili utilizzi della stampante 3D applicata alla medicina sono quelli di supporto alle attuali tecniche chirurgiche: ad esempio, grazie alla ricostruzione in 3D del cuore di un bambino di 14 mesi, un team specializzato è riuscito ad effettuare un'operazione prima impensabile.

In Brasile, alla cerimonia di apertura dei Mondiali di Calcio 2014, un giovane paraplegico ha potuto calciare un pallone grazie ad un esoscheletro controllato mentalmente. Il punto nevralgico dell'esoscheletro, il casco, è stato stampato in 3D.

Craig Gerrard, chirurgo presso il Newcastle Upon Tyne Hospital NHS Trust, ha operato per la prima volta al mondo una persona malata di tumore sfruttando i vantaggi della stampa 3D. Al paziente

doveva essere rimosso metà bacino per evitare che il cancro continuasse a svilupparsi nel corpo. Tramite una precisa ricostruzione in 3D della parte ed una stampa realizzata con una stampante laser, che utilizza polvere di titanio, è stato possibile creare la protesi di mezzo bacino, impiantandola successivamente nel corpo del paziente.



Presso la Washington University of St. Louis è stato realizzato un arto robotico sfruttando la stampa 3D. L'aspetto interessante di questa vicenda riguarda soprattutto i costi: una protesi "normale" sarebbe costata oltre 5000\$ in più. Grazie alla stampa 3D è dunque possibile realizzare protesi artificiali risparmiando una notevole quantità di denaro.



Per quanto concerne poi il grave problema dell'osteoartrite, anche in questo caso la stampa 3D sta fornendo soluzioni un tempo impensabili. Il 27 aprile 2014, alla Experimental Biology Conference 2014 di San Diego, è stato mostrato un sistema che permette la sostituzione delle parti colpite dall'osteoartrite con cartilagine derivata dalle cellule staminali. Questa tecnica prevede l'utilizzo di



stampanti 3D per modellare la cartilagine. Un caso simile è avvenuto in Cina, dove una sessantaduenne, colpita da metastasi ossee, è stata operata con un complicato intervento di ricostruzione pelvica, in cui il tessuto osseo colpito dal tumore è stato sostituito con una protesi in titanio stampata in 3D.

Un altro esempio è la ricostruzione facciale effettuata su di un ragazzo colpito da un terribile incidente: si è proceduto con la ricostruzione e successiva stampa in 3D della faccia grazie a delle fotografie precedenti al fatto.

Grazie alla stampa 3D, inoltre, alcuni medici del St. Thomas' Hospital di Londra hanno potuto salvare la vita ad una bambina di due anni. Pare, infatti, che la bambina fosse nata con una malformazione cardiaca data da un foro tra i ventricoli del cuore. I medici non potevano agire direttamente sul cuore della piccola Mina, anche perché il cuore era ancora troppo piccolo perché si potesse osare un intervento di simile importanza. Tramite la tecnologia della stampa 3D, invece, i medici hanno potuto costruire una copia esatta del cuore della bambina, in maniera tale da studiare il modo ottimale per "rattoppare" il foro tra i ventricoli del cuore. Inoltre, è stato possibile conoscere le eventuali risposte del muscolo in fase di operazione. L'intervento chirurgico ha avuto esito positivo.

L'uso di stampanti 3D per ricreare gli organi dei pazienti potrebbe essere uno strumento fondamentale per studiare la riproduzione degli organi umani prima di agire chirurgicamente, ed in futuro anche per la creazione di organi completamente artificiali. A titolo di esempio si cita l'azienda statunitense Organovo che sta testando la stampa 3D di materiali organici per la riproduzione di organi umani.

## Bibliografia e sitografia

1. Andrea Maietta, Stampa 3D: Guida completa. LSW
2. Carlo Monti, Attilio Selvini, Topografia, fotogrammetria e rappresentazione all'inizio del ventunesimo secolo. Maggioli Editore; I edizione (1° gennaio 2015)
3. Carola Esposito Corcione, PROTOTIPAZIONE RAPIDA (RP),  
[http://www.antonio.licciulli.unisalento.it/Corso\\_Ceramici/relazioni/prototipazione.pdf](http://www.antonio.licciulli.unisalento.it/Corso_Ceramici/relazioni/prototipazione.pdf) ,  
data di consultazione 12/07/2018
4. Università degli Studi di Roma 3, Prototipazione Rapida,  
[http://www.uniroma2.it/didattica/CTM/deposito/17\\_Prototipazione\\_Prototipazione\\_Rapida.pdf](http://www.uniroma2.it/didattica/CTM/deposito/17_Prototipazione_Prototipazione_Rapida.pdf), data di consultazione 8/07/2018
5. Makers lab, GUIDA ALLA STAMPA 3D, <http://www.hubout.it/makerslab/wp-content/uploads/Guida-stampa-3D.pdf>, data di consultazione 05/07/2018
6. Eagle3d tech digital manufacturing, GUIDA AI MATERIALI PER LA STAMPA 3D,  
<https://www.ddstudioservice.com/wp-content/uploads/2015/06/eagle3d-material-guide-2016.pdf>, data di consultazione 03/07/2018
7. Wikipedia, Laser cutting, [https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_cutting](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_cutting), data di consultazione 04/07/2018
8. Wikipedia, Fresatrice <https://it.wikipedia.org/wiki/Fresatrice>, data di consultazione 05/07/2018
9. 3D ArcheoLab, La fotogrammetria automatica: come funziona e a cosa serve,  
<http://www.3d-archeolab.it/2017/04/tutorial-la-fotogrammetria-automatica-come-funziona-a-cosa-serve/>, data di consultazione 16/07/2018