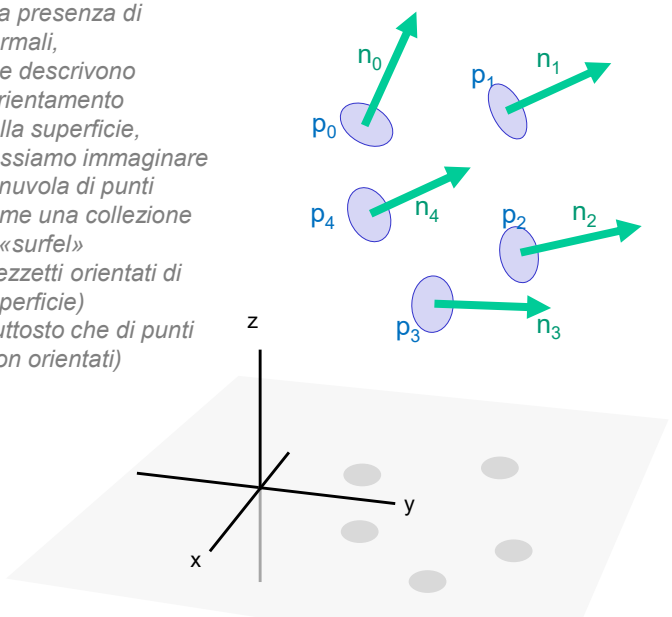
Point cloud: osservazioni

- ✓ Come si definisce la sua risoluzione?
  - ⇒numero di punti (o vertici)
- ✓ Può avere una risoluzione adattiva?
  - ⇒si! campionamento non necesserariamente uniforme
- ✓ Si presta ad una multi-risoluzione?
  - ⇒si! basta prendere un sottoinsieme dei punti (vedi poi)
  - ⇒quindi si tratta di una multi-risoluzione continua
- ✓ Può essere re-illuminata?
  - ⇒si, grazie alle normali
- ✓ Può essere facilmente editata?
  - ⇒con molta difficoltà. In pratica, no
- ✓ L'oggetto rappresentato può essere 3D printed?
  - ⇒no (o almeno, non direttamente). Non sappiamo nulla su quali posizioni del volume siano piene o vuote

8

Point Cloud

Grazie alla presenza di normali, che descrivono l'orientamento della superficie, possiamo immaginare la nuvola di punti come una collezione di «surfel» (pezzetti orientati di superficie) piuttosto che di punti (non orientati)



VEDERE
LA LEZIONE
Su algebra di punti e vettori

10

Point Clouds: note

- ✓ Ogni campione rappresenta un piccolo intorno di una *superficie* (detto un "surfel") attorno ad un punto **p**
  - ⇒ Grazie a l'orientamento locale, la "normale" **n**
- ✓ Le nuvole di punti sono facili da **acquisire** – da qui la loro popolarità come rappresentazione di modelli 3D
  - ^ vedi per es tecniche di fotogrammetria
- ✓ Non sono però agevoli da utilizzare direttamente nelle applicazioni, a causa di problemi come…
  - ⇒ **non** definiscono rigorosamente una superficie
    - Per es, una point-cloud non separa un esterno da un interno.
    - Quindi, non è possibile determinare il *volume* dell'oggetto rappresentato
  - ⇒ da un punto di vista algoritmico: non esiste una relazione esplicita di vicinato fra i surfel
    - per es, non è immediato trovare i campioni vicini ad un campione dato
  - ⇒ ambiguità nella rappresentazione: ad es, dati due surfel vicini fra loro, non sappiamo se siano pezzi di superficie contigui o se fra fra loro vi sia un gap non rappresentato nel modello

11

Storage di point cloud

- ✓ Esempio di formato di file per point cloud: <filename>.xyz

Posizione del primo campione (x y z)

Normale del primo campione (x y z)

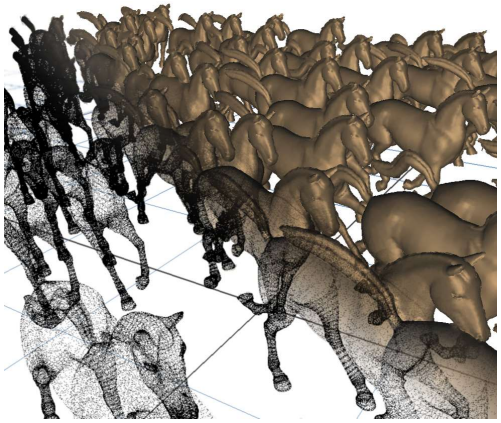
```
-93.588310 384.453247 8.672122 -0.750216 0.605616 0.265339
-93.365311 384.456879 9.228838 -0.766408 0.558148 0.317947
-92.981407 384.595978 9.903000 -0.771328 0.544261 0.329898
-93.032166 384.662994 9.664095 -0.753935 0.579665 0.309145
-92.670418 384.707367 10.423333 -0.773636 0.510460 0.375390
-92.432343 384.866455 10.697584 -0.775882 0.504696 0.378535
-92.233391 384.935974 11.023732 -0.770233 0.538780 0.341258
-91.959816 384.952209 11.629505 -0.765533 0.534614 0.357975
-91.684883 385.122528 11.965501 -0.783344 0.499727 0.369656
-90.981750 385.299408 13.283755 -0.797000 0.474158 0.374119
-91.017151 385.362061 13.132144 -0.801652 0.457642 0.384600
-90.481400 385.523560 13.933455 -0.691992 0.589880 0.416160
-90.241745 385.597351 14.216219 -0.664425 0.625032 0.409725
-89.772568 385.683197 14.820392 -0.626528 0.653291 0.425056
-89.167023 385.833191 15.455617 -0.654831 0.640269 0.401562
-88.530830 386.009369 16.353712 -0.737686 0.498695 0.455108
-87.759621 386.192017 17.259428 -0.681486 0.572231 0.456211
-86.996521 386.357880 18.085392 -0.653592 0.574349 0.492890
-86.823006 386.214783 18.469635 -0.665109 0.533859 0.522135
-85.953079 386.573792 19.228466 -0.682286 0.524974 0.508810
```

…eccetera

15

Rendering di point cloud: point splatting

- ✓ Attraverso «point splat»:
- ✓ «splat» = una regione di pixel sullo schermo che vengono attivati per rappresentare il punto

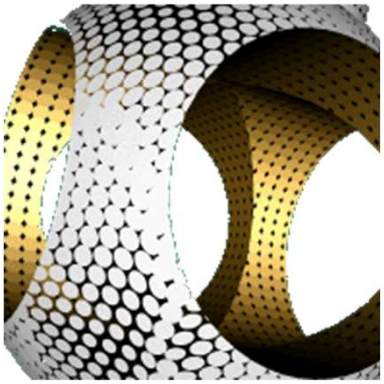


img by Michael Wimmer 2012

16

Rendering di point cloud: point splatting

- ✓ la dimensione dello splat viene scelta in funzione della densità dei punti (e quindi della distanza media fra loro)
- ✓ disegnabili anche come dischetti (pezzetti di superficie)



img by Mario Botsch, 2004

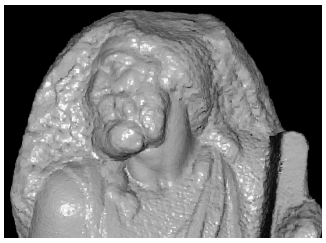
17

Multi-risoluzione su point-cloud

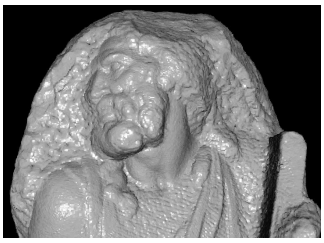
- ✓ La point-cloud è semplice da gestire perché ogni punto è indipendente dagli altri
- ✓ Ad esempio, una **multirisoluzione** si ottiene semplicemente prendendo un sottoinsieme arbitrario dei punti
- ✓ Strategia: (adottata ad es. da «qSplat» - Stanford uni)
  - ⇒preordinare la point cloud di N vertici in modo che i primi M<N vertici siano ben distribuiti, per ogni M
  - ⇒un random shuffle è un'ottima approssimazione!
  - ⇒in fase di rendering, disegnare solo i primi M vertici

18

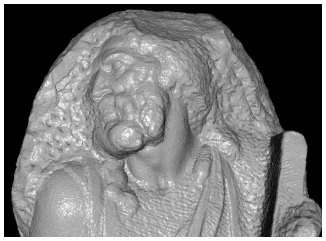
Multi-risoluzione su point-cloud



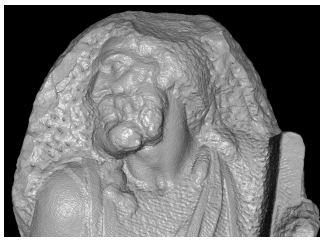
131,712 splats 132 ms



259,975 splats 215 ms



1,017,149 splats 722 ms



14,835,967 splats 8308 ms

Images by QSplat software

21

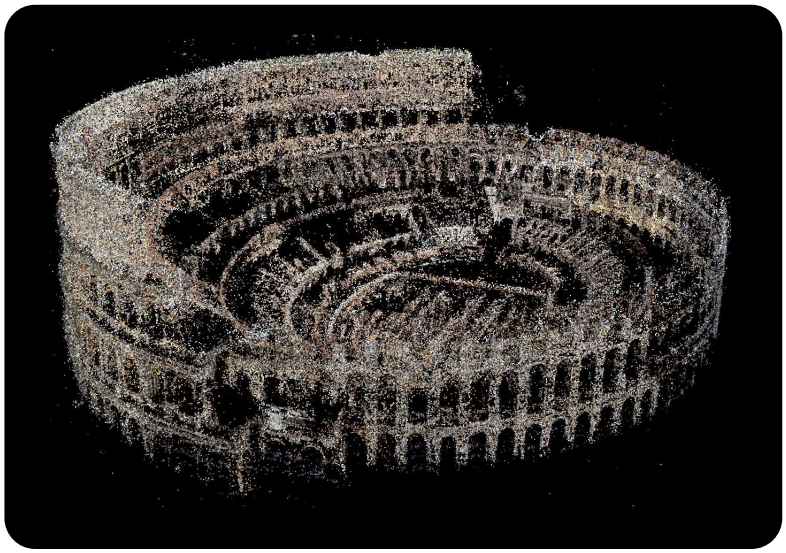
Acquisizione 3D di point-cloud

✓Esistono tecniche per produrre una Point Cloud a partire da un insieme di immagini fotografiche

⇒Shape From Motion / Photogrammetry (task studiati nel contesto della Computer Vision)

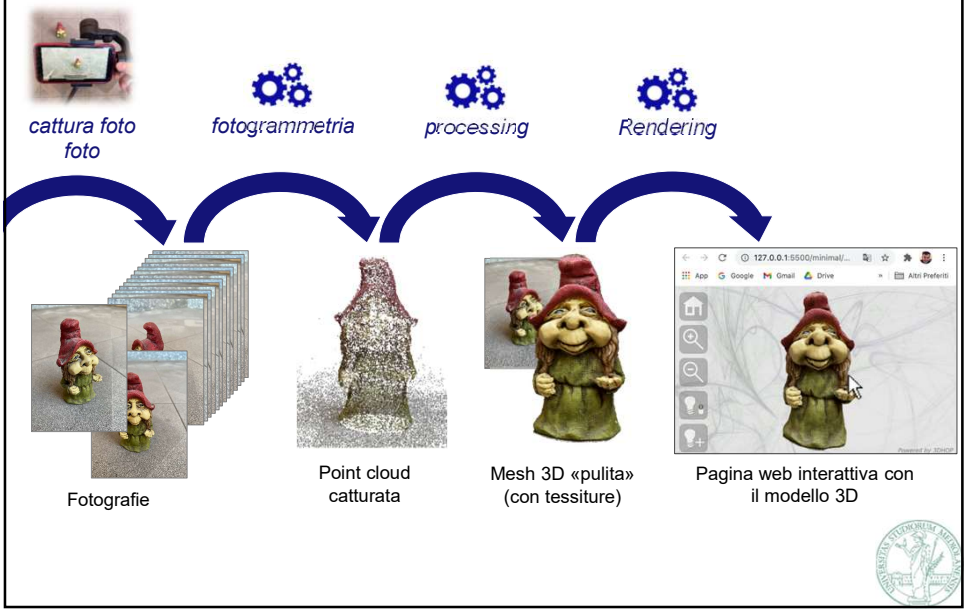
22

Una point-cloud acquisita con fotogrammetria



23

Un esempio di pipeline da foto a modello 3D



25

Acquisizione di point cloud con fotogrammetria

26

Alcuni software e strumenti esistenti

- ✓ Software specializzato per fotogrammetria:

Meshroom

Regard3D

Metashape

MicMac

3DF ZEPHYR

COLMAP

- ✓ Repository pubblici di point-cloud acquisite da modelli reali:

Sketchfab

https://sketchfab.com/tags/point-cloud

Real-World Textured Things

https://texturedmesh.isti.cnr.it/

(nota: sono processate ed esposte come mesh – vedi prossime lezioni)

27

Alcuni software / strumenti Open-Source esistenti

Per geometry-processing effettuato su point-clouds

pcl

Point Cloud
(libreria C++)

specializzato anche in range scans, un modello di dato che vedremo più tardi

MeshLab
(applicativo software)

Specializzato sorpattutto su mesh poligonali, ma lavora anche su point-clouds. Vedi: «Filters» → «Point Set»

Cloud-Compare
(applicativo software)

Specializzato sorpattutto su point-cloud

28

Geometry Processing su point clouds: k-NN

- ✓ Un sotto-problema ricorrente:
  trovare il **vicinato spaziale** di ogni vertice
  - ⇒ Cioè rispondere alla domanda:
    dato un vertice, quali sono i vertici a lui più vicini?
  - ⇒ Molto del processing su point-cloud richiede di risolvere questo come sotto-problema
- ✓ Definizione del problema:
  - ⇒ «dato un vertice i in posizione $\mathbf{p}_i$,
    trovare tutti i vertici j che siano in una posizione $\mathbf{p}_j$
    entro una certa distanza d_{MAX} da $\mathbf{p}_i$ »
  - ⇒ dove d_{MAX} è un parametro del problema
  - ⇒ (sapresti esprimere questa condizione con un'espressione dell'agebra di punti e vettori?)
- ✓ Questo modo di definire un vicinato ha molti problemi
  - ⇒ il valore d_{MAX} dipende dalla scala del modello (è *scale dependent*) e dalla sua risoluzione
  - ⇒ nessun parametro (costante) funziona bene con risoluzione adattiva

30

Geometry Processing su point clouds: k-NN

- ✓ Una *migliore* definizione del problema:
  - ⇒ dato un vertice i in posizione $\mathbf{p}_i$,
    trovare i k vertici più vicini a lui
  - ⇒ dove k è una parametro del problema: per es, 10, o 8
  - ⇒ questi k punti sono detti I ***k* nearest-neighbors**
    (in sigla: **k-NN**)
  - ⇒ Perché questo modo di definire un vicinato è molto più robusto?
    (ed è quello adottato praticamente in ogni situazione)
- ✓ Problema: efficienza
  - ⇒ Risolvere questo task con tecniche «forza bruta» non è efficiente
  - ⇒ «Forza bruta» (in questo caso) = testare tutti i campioni
  - ⇒ Trovare il vicinato di un punto: complessità lineare (con la risoluzione)
    Quindi: trovare il vicinato di tutti i punti: complessità quadratica
  - ⇒ (vedi corso di algoritmi per la spiegazione di questi termini!)
  - ⇒ INFO: in CG, una complessità quadratica, è considerata proibitiva
  - ⇒ Sono necessarie tecniche algoritmiche più sofisticate (che non vedremo)

31

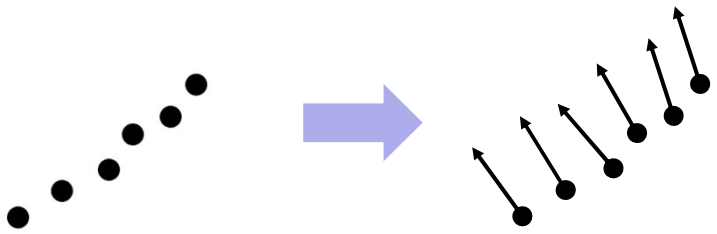
Geometry Processing su point clouds: stima delle normali

- ✓ A volta point-cloud non è provvista di direzioni normali per ogni campione
- ✓ E' dunque necessario stimare le normali di ogni punto (a partire dalle posizioni di tutti i punti)
  - ⇒ Vedremo, questo è un problema ricorrente anche con altri tipi di dato
- ✓ Come? (schema di una soluzione)
  - ⇒ Per ogni punto:
    1. trovare il suo vicinato (k-NN)
    2. trovare il piano passante per il suo vicinato («best fitting plane»)
    3. assegnare a quel punto la normale di quel piano
  - ⇒ Nota: un piano passa per tre punti, ma nessun piano in generale passa per N>3 punti. Tuttavia, è possibile trovare il piano che *minimizza la distanza da N punti dati* (problema da formulare e risolvere, come sempre, usando l'algebra di punti e vettori)
  - ⇒ Nota: è necessario risolvere anche un'ambiguità di direzione: un piano ha due normali di segno opposto, ne va scelta una (l'orientamento deve essere consistente)

33

Geometry Processing su point clouds: stima delle normali

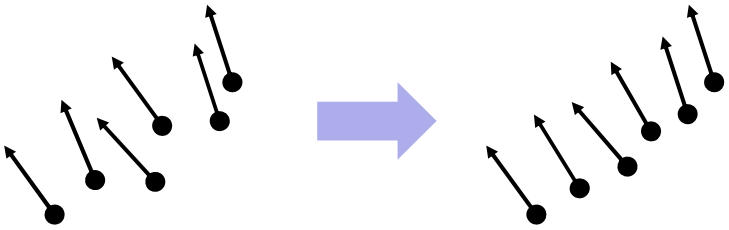
✓ Stima delle normali su una pint cloud



34

Geometry Processing su point clouds: denoising

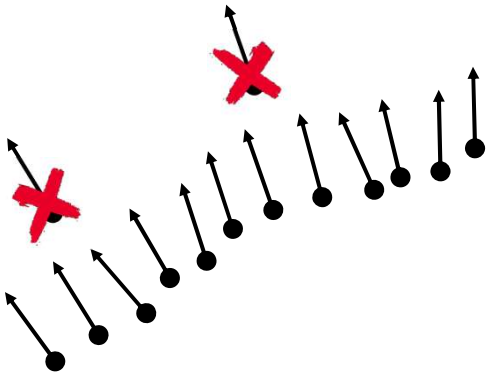
- ✓Denoise – Noise reduction – o «fairing»
  - ⇒Di posizioni (e/o normali)



35

Geometry Processing su point clouds: outlier removal

- ✓Rimozione degli «outlier»



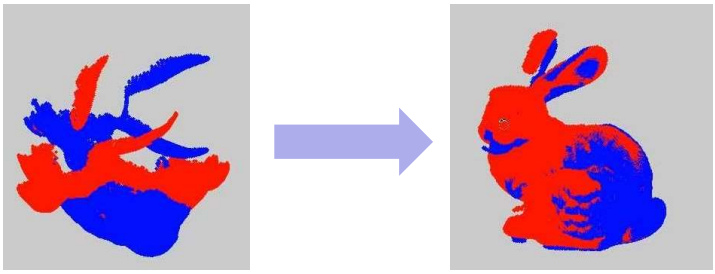
36

Geometry Processing su point clouds: denoising

- ✓ Come tipico per altri modelli 3D acquisiti dalla realtà, errori di misurazione si traducono in «rumore» sul dato
  - ⇒ nel nostro caso: si tratta di errori nella posizione e nella normale
  - ⇒ è anche il caso, ovviamente, per dati catturati dal vero di ogni altro tipo come immagine o dati auditivi (da cui il nome di «rumore» -- noise)
- ✓ Un task tipico è dunque de-noising: rimuovere il «rumore» dalla point cloud, tentando di preservare il «segnale»
  - ⇒ Spostare ogni campione in modo da avvicinarlo alla superficie reale
- ✓ Concetto generale per point-cloud de-noising:
  - ⇒ Si suppone che le superfici tendano ad essere lisce: superfici molto frastagliate devono essere rese più lisce avvicinando ogni punto al piano passante per il suo vicinato
- ✓ Un problema solo simile è quello della rimozione degli outliers:
  - ⇒ Alcuni punti possono essere stati del tutto «inventati» dal processo di ricostruzione 3D (per errore, o perché sono relativi ad altre superfici): questo punti non devono essere *rimossi*, non modificati
  - ⇒ Il problema è dunque quello dell'identificazione degli «outliers»

37

Geometry Processing su point clouds: registration



- ✓ Spesso due o più point-cloud descrivono parti diverse di uno *stesso* oggetto
  - ⇒ ad esempio, quando ho catturato due lati di una statua con due acquisizioni automatiche (come laser scanning), ottenendo due nuvole separate
  - ⇒ Ogni point cloud è espressa in un suo proprio Sistema di riferimento
  - ⇒ Per poter fondere le due nuvole in una sola (più completa!) è necessario prima portarle nello stesso Sistema di riferimento
- ✓ In pratica si tratta di riposizionare (ruotare e traslare) una delle due in modo da portare *le parti in comune* a (quasi) coincidere
  - ⇒ nota: quindi, ci devono essere quindi sovrapposizioni!
  - ⇒ è problema detto "allineamento" o "registrazione" (di point cloud)

40

Geometry Processing su point clouds: registration

Distinguiamo due fasi (in cascata)

- ✓ **Coarse registration** (allineamento grossolano):
  - ⇒ trovare una prima soluzione approssimativa che metta in corrispondenza le due point-cloud in modo approssimato
  - ⇒ Sono stati proposti molti algoritmi automatici (che non vedremo), ma è un problema aperto e spesso le soluzioni utilizzate richiedono un intervento da parte di un operatore umano
- ✓ **Fine registration** (allineamento fine):
  - ⇒ una volta che le parti comuni delle due superfici sono in reciproca prossimità, l'allineamento inizale viene reso molto più accurato da apposti algoritmi.
  - ⇒ Vediamo una classe di questi algoritmi

45

Geometry Processing su point clouds: registration

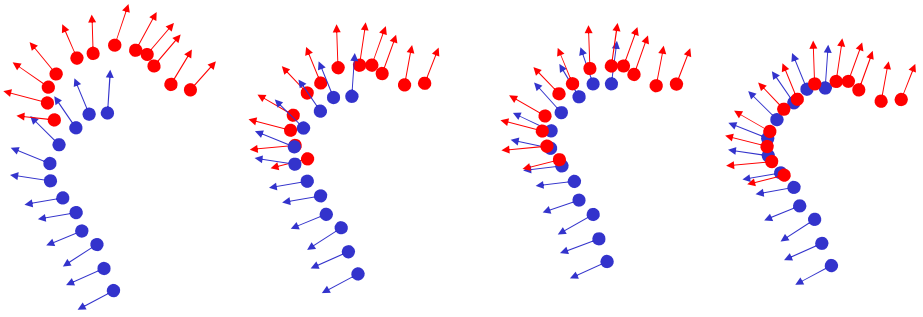
- ✓ Schema di una soluzione
  (algoritmo detto "Iterative Closest Points" ICP)
  1. Scegliere un insieme arbitrario di punti di una delle due nuvole (per esempio, qualche centinaio)
  2. Per ognuno di loro, trovare il suo *corrispondete* sull'altra nuvola, come il punto più vicino (closest) ad esso
  3. Scartare i punti che hanno il corrispondente troppo lontano, (oltre un valore soglia)
  4. Trovare una rotazione+traslazione che avvicini il più possible ogni punto sul suo corrispondete
     (un sotto problema di natura matematico)
  5. Ripetere (cioè *iterare*) dal punto 1, fino a "convergenza"
     (cioè fino a che si registrano dei miglioramenti sostanziali)

46

Geometry Processing su point clouds: registration

Allineare una point cloud su un'altra

✓ Algoritmo ICP («Iterative Closest Points»)



situazione iniziale | dopo la 1° iterazione | dopo la 2° iterazione | dopo la 3° iterazione (e convergenza)

47

Geometry Processing su point clouds: registration

✓ Caratteristiche dell'ICP

⇒ Ad ogni iterazione, le due nuvole si avvicinano e quindi si avranno corrispondenze migliori nell'iterazione successiva, e così via

⇒ Se nella situazione di partenza le due nuvole sono sufficientemente vicine alla soluzione corretta, allora il sistema converge ad una soluzione molto buona («incollando» le due point clouds in modo perfetto)

⇒ Altrimenti, il sistema può convergere a soluzioni del tutto sbagliate, o non convergere del tutto

⇒ E' necessario partire da una soluzione che si avvicina a quella «corretta»

48

Esperimento pratico: allineare due point cloud

Passi da seguire:

1. Scaricare le due point cloud in formato xyz (dal sito ariel)
2. Scaricare meshlab (se non lo si è ancora fatto)
3. Importare entrambe le point cloud
4. Seguire questo tutorial: https://www.youtube.com/watch?v=4g9Hap4rX0k

49

Geometry Processing su point clouds

- ✓ Un task comune: convertire la point-cloud in un'altra rappresentazione
  - ⇒ Più adatta a processing e/o a rendering
  - ⇒ Ricorda che le point cloud sono diffuse soprattutto in virtù della loro facilità di acquisizione 3D (compreso da immagini: fotogrammetria) non per la loro praticità di uso
- ✓ Esempio tipico: da point cloud a mesh poligonale
  - ⇒ Lo vedremo nelle prossime lezioni!

50