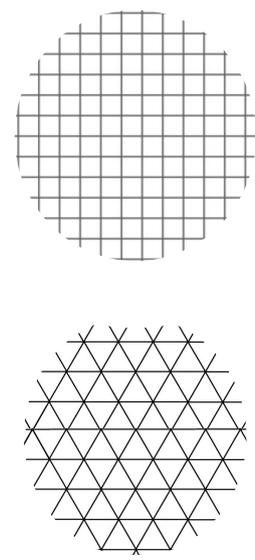


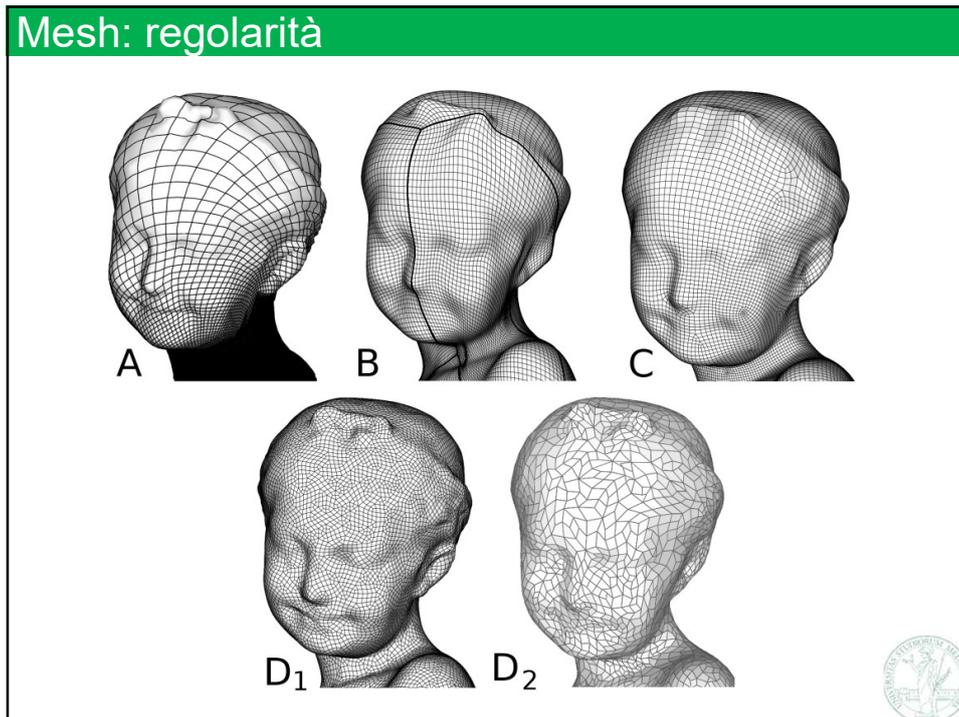
86

Regolarità di una mesh: concetto

- ✓ Osservazione: un piano può essere tassellato in modo **regolare** da quadrati ==>
- ✓ Tanto più la **connettività** di una **quad-mesh** si avvicina a questo caso, tanto più la consideriamo “**regolare**”
- ✓ Osservazione: un piano può essere tassellato in modo **regolare** da triangoli equilateri ==>
- ✓ Tanto più la **connettività** di una **tri-mesh** si avvicina a questo caso, tanto più la consideriamo “**regolare**”

The slide contains two circular diagrams. The top one shows a square grid of lines forming a circular shape, representing a quad-mesh. The bottom one shows a triangular grid of lines forming a circular shape, representing a tri-mesh. A small circular logo of the University of Milan is in the bottom right corner.

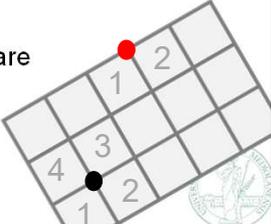
87



88

Regolarità di una mesh definizioni

- ✓ Vertice interno = vertice che non compare su un edge aperto
- ✓ «Valenza» edge di un vertice
 - ⇒ numero di edge adiacenti ad quel vertice
- ✓ «Valenza» faccia di un vertice
 - ⇒ numero di facce adiacenti ad quel vertice
 - ⇒ per un vertice interno: le due valenze sono uguali
- ✓ «Vertice regolare» interno = un vertice di valenza...
 - ⇒ ...4, in una quad-mesh
 - ⇒ ...6, in una tri-mesh
- ✓ «Vertice regolare» interno = un vertice di valenza (di faccia)
 - ⇒ ...2, in una quad-mesh (2 facce, 3 edge)
 - ⇒ ...3, in una tri mesh (3 facce, 4 edge) mesh irregolare

90

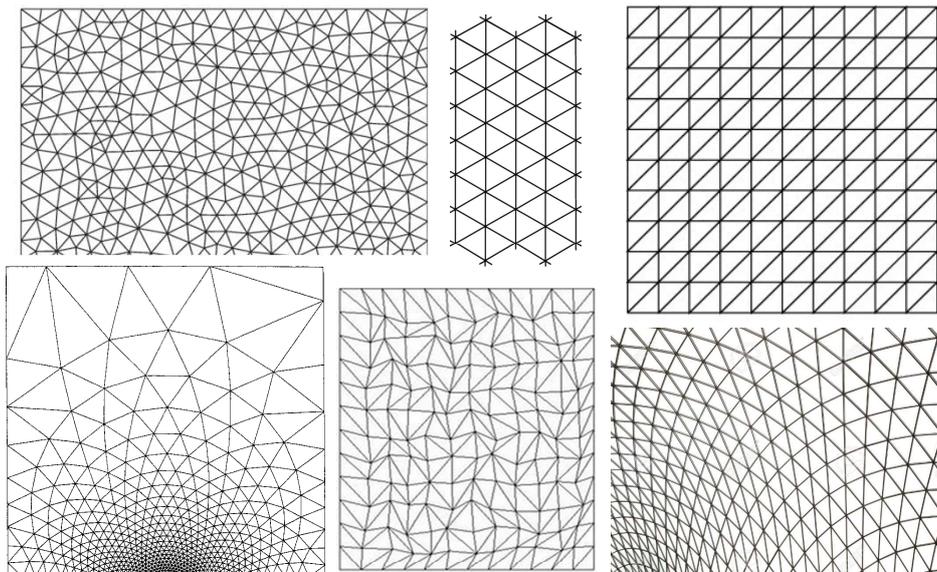
Regolarità di una mesh definizioni

- ✓ Quanti vertici in una mesh (tri o quad) sono regolari?
 - ⇒ Tutti => la mesh è (*perfettamente*) regolare (è detta anche «structured» mesh)
 - ⇒ Quasi tutti - per es il 99% => la mesh è «semi-regolare»
 - ⇒ Pochi (per es, solo 2/3 o la metà) = è una mesh irregolare
 - ⇒ Nota: la regolarità di una mesh è una questione di grado
- ✓ Quad-mesh fortemente regolare = è un grigliato



91

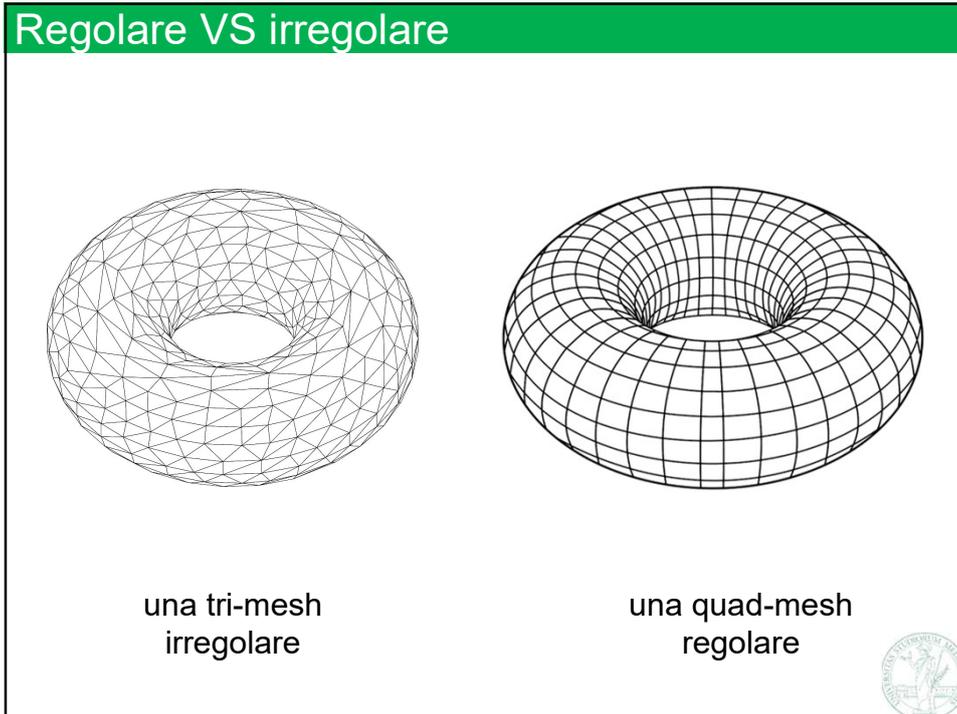
Regular VS irregular Triangular mesh



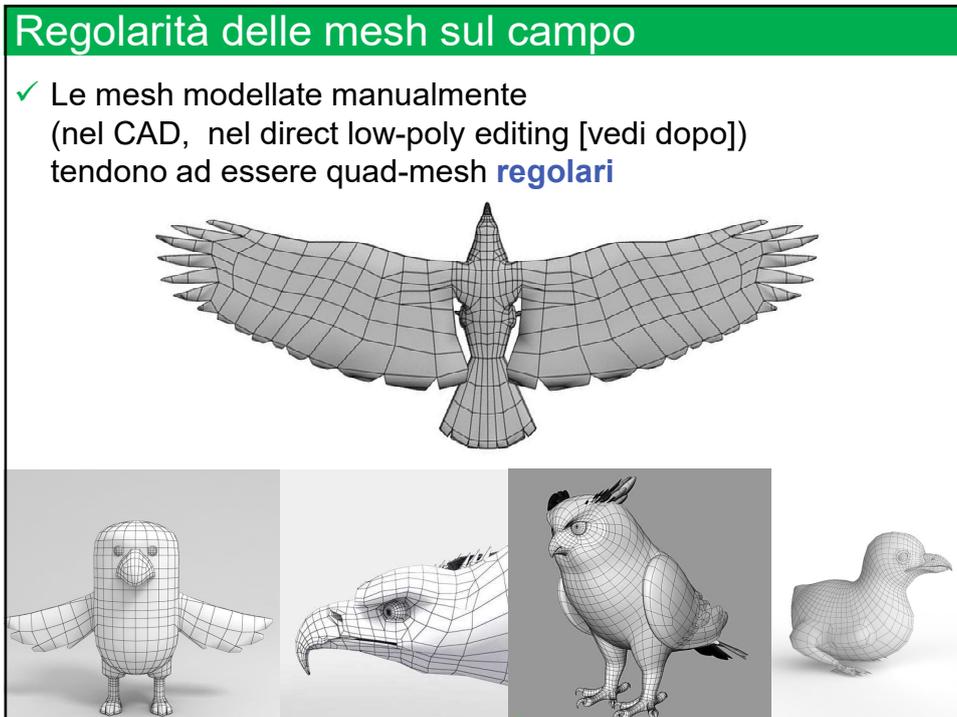
Esercizio: trova i vertici irregolari. Quali mesh sono (semi-) regolari?
Ripeti con altre mesh che vedi in questi lucidi



93



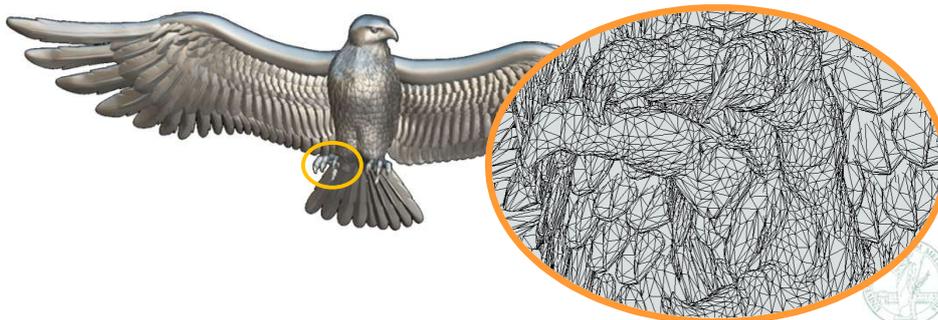
95



96

Regolarità delle mesh sul campo

- ✓ Sono di solito tri-mesh **irregolari** le mesh
 - ⇒ **acquisite** 3D da modelli reali (per es, scanning o fotogrammetria)
 - ⇒ prodotte o ri-processate attraverso tecniche di **geometry processing** per esempio tutti che vedremo: semplificazione automatica, front advancing methods, triangolazioni di Delaunay, vertex clustering... (ma ovviamente non tecniche che si prefiggono questo obiettivo come il semi-regular remeshing)
 - ⇒ Prodotte da artisti digitali con tecniche di **digital sculpting** (vedi sotto)



97

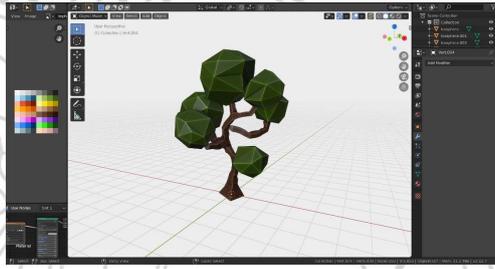
Molti vantaggi (e alcuni svantaggi) della regolarità

- ✓ Una mesh più regolare è
 - ⇒ Più agevole da modificare / o ri-editare manualmente (ad esempio, consente la selezione di stream di edge)
 - ⇒ Più adatta da animare
 - ⇒ Più efficiente da comprimere per risparmiare memoria (o da mandare in streaming)
 - ⇒ Maggiormente adatta ad applicazioni di machine learning
 - ⇒ Spesso maggiormente accurata geometricamente, a parità di risoluzione
 - ⇒ Meno soggetta a presentare artefatti di rendering
 - ⇒ Se è una quad-mesh, un vantaggio ulteriore consiste nell'aver gli edge allineati alle direzioni principali di curvatura
 - ⇒ Tuttavia, la risoluzione di una mesh regolare tende ad avere una risoluzione meno adattiva: l'adattività «si paga» in termini di regolarità
- ✓ In generale, la regolarità mesh è una caratteristica desiderabile
 - ⇒ ma spesso difficile da ottenere in modo automatico
 - ⇒ per l'efficienza di rendering, non fa differenza
 - ⇒ Q: cosa ottengo effettuando un diagonal-split a tutte le facce di una quad-mesh **regolare**?

98

Marco Tarini - Computer Graphics 2023/2024
Università degli Studi di Milano

Modelli poligonali: alcuni cenni di modellazione manuale



104

Come vengono generate le mesh

- ✓ Cattura dalla realtà
 - ⇒ Cioè 3D Acquisition
 - ⇒ Per es, laser scanning, fotogrammetria...
- ✓ Generazione procedurale
 - ⇒ Per es, modelli di piante o vegetali generati attraverso una simulazione della loro crescita
- ✓ Simulazione
 - ⇒ Per es, una simulazione fisica di un liquido per generare la sua superficie in movimento
- ✓ Modellazione manuale
 - ⇒ Da parte di artisti digitali



105

Authoring delle mesh (cioè 3D modelling)

✓ Alcuni dei software più diffusi

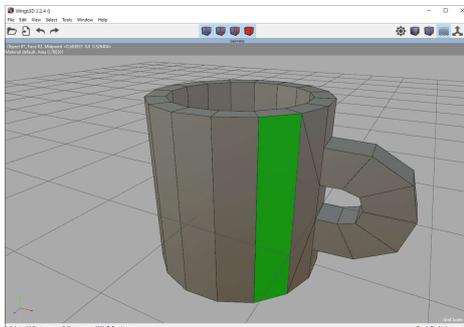
- ✓ **3D Studio Max** (autodesk) ,
Maya (autodesk) ,
Cinema4D (maxon)
Lightweight 3D (NewTek),
Modo (The Foundry) ,
Blender (open source!) ,
⇒ all-purpose, completi
- ✓ **AutoCAD** (autodesk),
SolidWorks (SolidThinking)
⇒ Specializzati per il CAD
- ✓ **ZBrush** (pixologic),
Mudbox (autodesk)
⇒ Specializzati per lo sculpting
- ✓ **Wings3D**
⇒ Solo low-poly modelling
(& superfici di suddivisione)
open-source, piccolo, specializzato
- ✓ **Sculptris Alpha**
⇒ Solo sculpting
open-source, piccolo, specializzato
- ✓ **[Rhinceros]**
⇒ parametric surfaces (NURBS)
- ✓ **FragMotion**
⇒ small, specialized on animated meshes
- ✓ + molti altri con scopi più specifici
⇒ editing of human models, of
architectural interiors, environments, or
specific editors for game-engines, etc...

106

Generazione manuale di mesh (cenni)

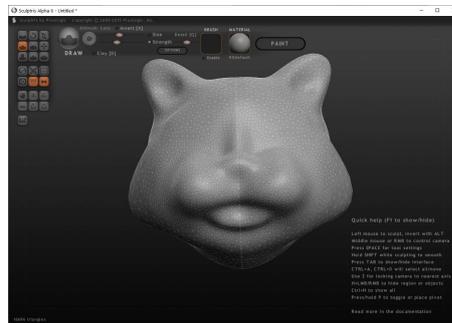
✓ Due paradigmi di modellazione manuale:

Direct-poly modelling



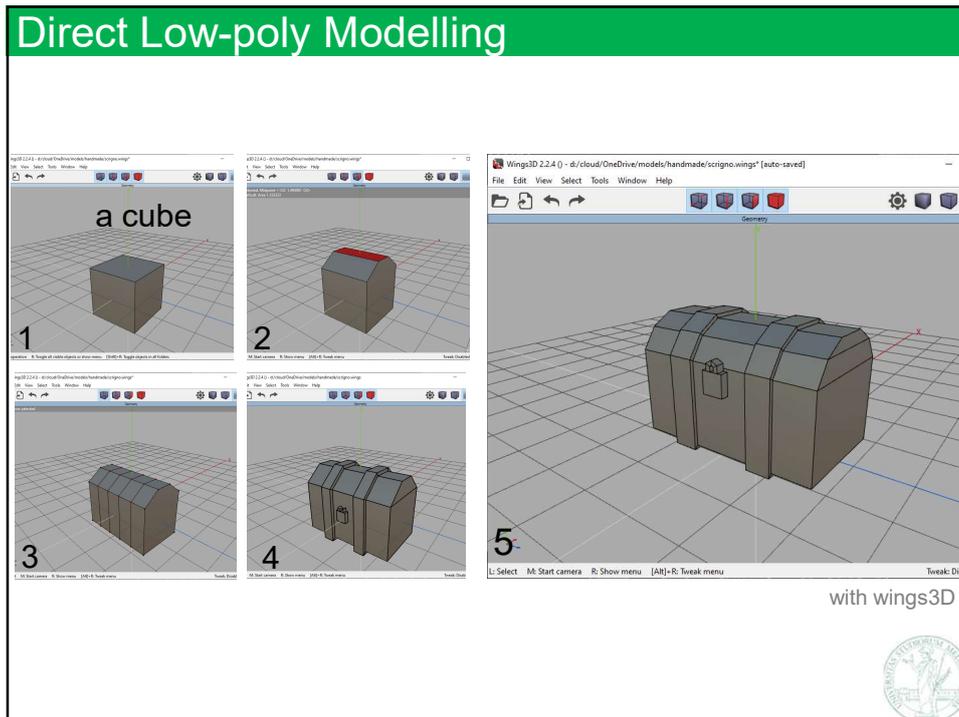
esempio con Wings3D

Digital Sculpting



esempio con Sculptris Alpha

107

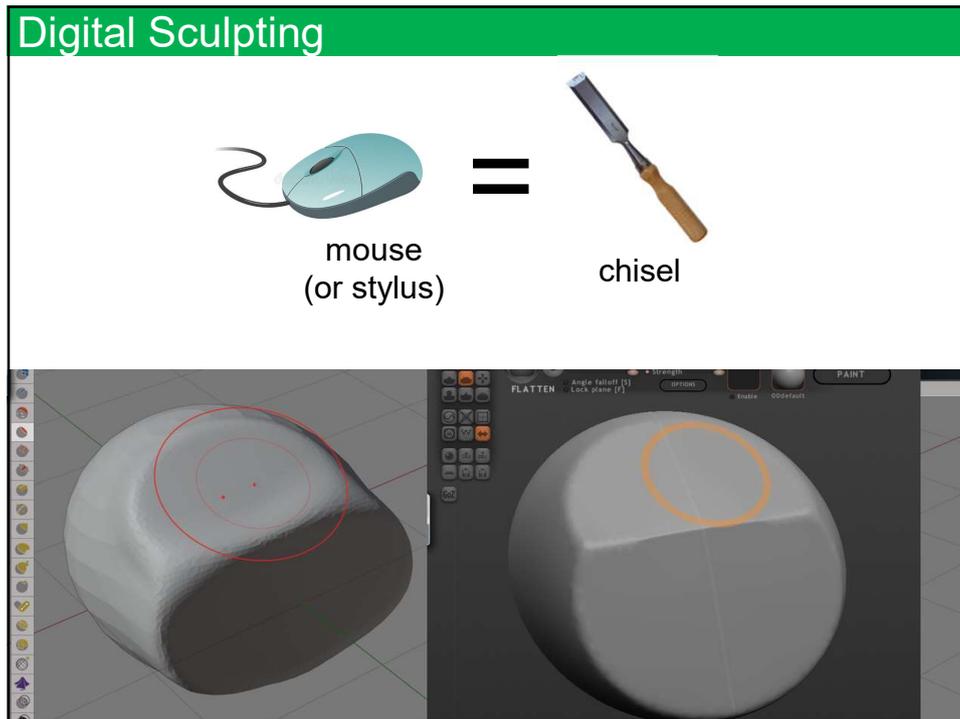


108

Direct (Low-poly) Modelling: note

- ✓ Il modellatore umano manipola direttamente, attraverso un'apposita interfaccia, gli elementi della mesh
 - ⇒ come facce, edge, vertici
- ✓ L'operatore edita esplicitamente
 - ⇒ La connettività della mesh (per es, quali edge connettono quali vertici)
 - ⇒ La posizione dei vertici (singolarmente, o a piccoli gruppi)
- ✓ Le operazioni mantengono automaticamente two-manifold-ness (e a volte la chiusura) delle mesh
- ✓ Vengono usati operazioni di suddivisione (vedi più avanti)
- ✓ Tipico risultati: mesh poligonali, spesso quad, spesso semi-regolari, a bassa risoluzione

109



110

Digital sculpting: note

- ✓ Artista scolpisce la forma con pennellate («brush strokes») che imitano la manipolazione di materiale plasmabile come creta / pongo / etc
 - ⇒ Ma ovviamente senza alcun vincolo fisico:
per es, è possibile rimuovere o creare materiale a piacere
- ✓ La rappresentazione interna della mesh (facce, vertici, edge) non è esposta al modellatore, ma viene gestita internamente
- ✓ «Pennelli» (anzi, scalpelli) digitali con effetti diversi, per es, local smoothing (rendere più liscio), appiattare, estrarre, «pizzicare», scavare, etc
- ✓ Sistema gestisce il meshing automaticamente in background,
 - ⇒ per es effettuando edge-collapse o edge split (l'operazione inversa) per mantenere una risoluzione adattiva adatta alla forma che viene generata
- ✓ Maggiormente adatta per modelli biologici / naturali
- ✓ Tipico risultato: una tri-mesh irregolari ad alta risoluzione



111

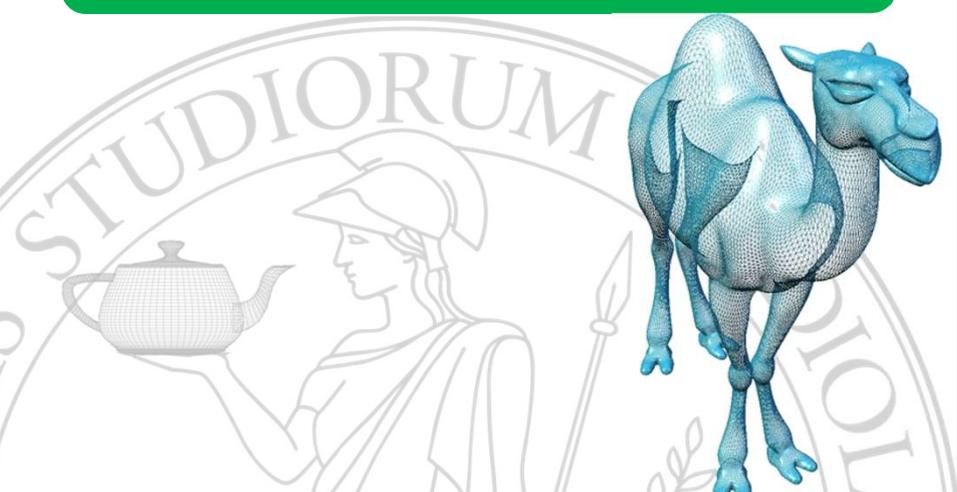
Alcuni dei formati utilizzati (i primi della lista sono i più comuni)

- **3DS** - 3D Studio Max
- **OBJ** - Uno dei più diffuse. Molto semplice
- **MA, MB** - di Maya
- **OFF** - ancora più semplice
- **3DX** - Rhinoceros file format
- **BLEND** - Blender file format
- **DAE** - **COLLADA** (by Khornos, "universale")
- **FBX** - Autodesk interchange file format
- **X** - Direct X object
- **SMD** - (by Valve) Mesh animate
- **BVH** - Behavioral file (mesh animate)
- **MD3** - quake 3 vertex animations
- **DEM** - Digital Elevation Models
- **DXF** - (Autodesk's AutoCAD, for CAD)
- **FIG** - Used by REND386/AVRIL
- **FLT** - Multigen Inc.'s OpenFlight format
- **IGES** - Graphics Exchange Specification
- **IV** - Open Inventor File Format Info
- **LWO, LWB & LWS** - Lightwave 3D file formats
- **MAZ** - Used by Division's dVS/dVISE
- **MGF** - Materials and Geometry Format
- **MSDL** - Manchester Scene Description Language
- **3DML** - by Flatland inc.
- **C4D** - Cinema 4D file format
- **SLDPTR** - SolidWork "part"
- **WINGS** - Wings3D object
- **NFF** - Used by Sense8's WorldToolKit
- **SKP** - Google sketch up
- **KMZ** - Google Earth model
- **OOGL** - Object Oriented Graphics Library
- **PLG** - Used by REND386/AVRIL
- **POV** - "persistence of vision" per ray-tracer
- **QD3D** - by apple, pple's QuickDraw 3D Metafile format
- **TDDD** - for Imagine & Turbo Silver r
- **NFF & ENFF** - (Extended) Neutral File Format
- **VIZ** - Used by Division's dVS/dVISE
- **VRML, VRML97** - Virtual Reality Modeling Language (RIP)
- **X3D** - tentato successore di VRML
- **PLY** - introdotto by Cyberware - tipic. dati range scan
- **DICOM** - Dalla casa omonima - tipic. dati CAT scan
- **Renderman** - per l'omonimo renderer
- **RWX** - RenderWare Object
- **Z3D** - ZModeler File format
- **HDF** - Hierarchical Data Format
- **etc**

114

Marco Tarini - Computer Graphics 2023/2024
 Università degli Studi di Milano

**Polygonal Representations:
 cenni di Mesh Processing 1/2**



117

Mesh Processing

- ✓ Il **mesh processing** è **geometry processing** eseguito su delle mesh poligonali
 - ⇒ Esempi che abbiamo già visto:
 - ⇒ la costruzione di una mesh da una nuvola di punti (meshing di una point cloud), o “surface reconstruction”.
 - ⇒ La stima di normali per faccia o per vertice
- ✓ Gli obiettivi sono i più vari
Oggi ne vediamo due classici:
 - ⇒ Remeshing (detto anche “retopology”),
e in particolare,
Semiregular Quad Re-meshing
 - ⇒ Mesh Simplification
(o mesh coarsening)



119

Semplificazione automatica di una mesh

- ✓ Un applicativo generico di mesh processing:



MeshLab

- ✓ Mini-esercizio pratico:
testa un algoritmo di mesh decimation

- ⇒ Ottieni e apri MeshLab:
- ⇒ Scarica una mesh ad alta risoluzione di esempio (ce ne sono anche sul sito)

- ⇒ Applica uno di questi due filtri:
filtro «quadric edge collapse decimation»
filtro «clustering decimation»

due algoritmi che seguono approcci diversi, che vedremo sommariamente la prossima volta

121

Task di Geometry Processing: meshing

- ✓ “**Meshing**”: (in generale)
dato un modello 3D,
inizialmente non rappresentato come una mesh,
costruire una sua rappresentazione mesh
 - ⇒ è un esempio di Surface Reconstruction:
ricostruzione di una superficie
(da dati che non sono una superficie)
- ✓ Detta anche poligonizzazione,
o anche “segmentazione” in analogia con il 2D,
o “surface reconstruction”
 - ⇒ Per es,
«meshing di una nuvola di punti», come abbiamo visto
 - ⇒ Vedremo altri esempi di meshing a partire
da altre strutture dati più avanti nel corso



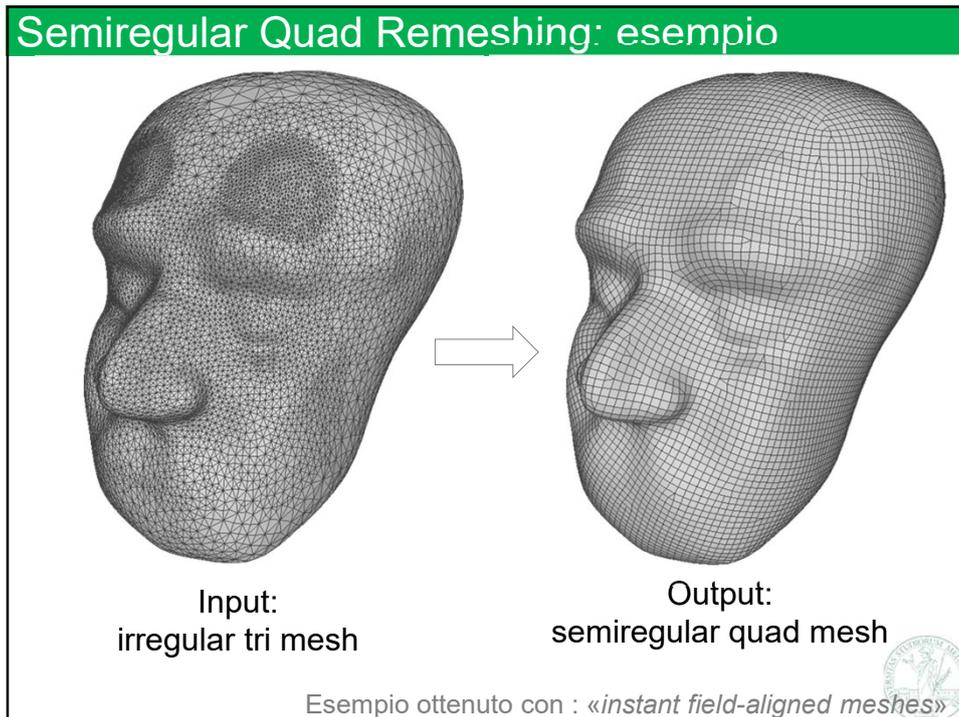
123

Geometry Processing: remeshing

- ✓ **Remeshing**:
data una superficie già rappresentata come una mesh,
costruire una rappresentazione mesh diversa
- ✓ In ambiente industriale, è detto “retopology”
 - ⇒ A volte viene fatto manualmente da un’artista digitale
(un modellatore)
 - ⇒ Ovviamente, ci interessano algoritmi automatici
- ✓ La mesh di partenza differisce dalla mesh di arrivo
in termini di, per es...
 - ⇒ da tri a VS quad dominant VS quad («quad-remeshing»)
 - ⇒ (semi) regular VS irregular («semiregular-remeshing»)
 - ⇒ adaptive VS non adaptive resolution
 - ⇒ bad element shapes VS good element shapes



124



127

Semplificazione automatica di una mesh

- ✓ Da: mesh hi-res
a: mesh low-res (detta anche low-poly mesh)
- ✓ Procedimento chiamato anche
 - ⇒ «Mesh coarsening»
 - ⇒ «Poly-reduction» (in ambiente industriale)
 - ⇒ «Mesh decimation»
- ✓ Perché è utile: la risoluzione deve essere adatta all'applicazione che usa la mesh
 - ⇒ Molti dei procedimenti su una mesh (rendering compreso!) hanno una *complessità lineare* col numero di elementi
- ✓ Osservazione:
 - ⇒ in una nuvola di punti, bastava scegliere un sottoinsieme
 - ⇒ per mesh, è più complicato: non posso rimuovere elementi senza danneggiare le proprietà della mesh (es. chiusura)

130

Semplificazione automatica di una mesh

- ✓ Obiettivo: ottenere un buon bilancio fra:
 - ⇒ costo (risoluzione della mesh risultante, cioè numero di elementi residui)
 - ⇒ qualità (errore geometrico introdotto rispetto alla mesh originale)
- ✓ Q: come definisco l'errore introdotto?
 - ⇒ A: misuro la *distanza geometrica* fra le due superfici descritte da mesh originale e mesh semplificata
 - ⇒ cioè assumiamo:
mesh originale = «ground truth»
- ✓ Q: come definisco la distanza fra due superfici?
 - ⇒ def matematica: la risposta esula da questo corso
 - ⇒ per approfondire: cercare «hausdorff distance»
- ✓ Q: come la posso calcolare?
 - ⇒ un task di geometry processing – ma la risposta esula da questo corso
 - ⇒ per approfondire: google search for
«Metro: measuring error on simplified surfaces»



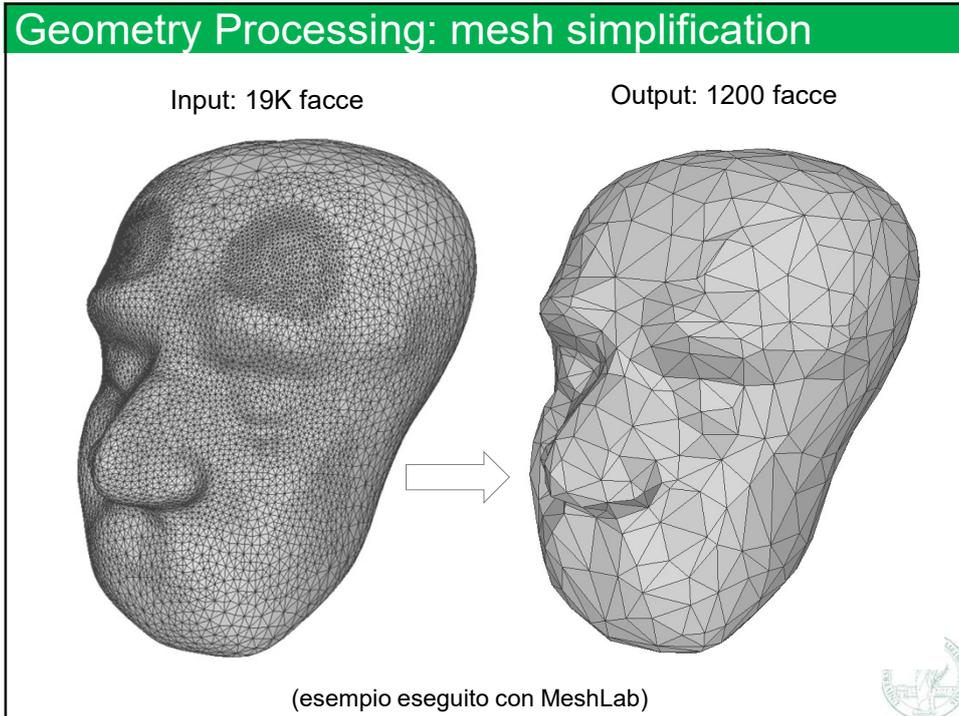
131

Semplificazione automatica di una mesh

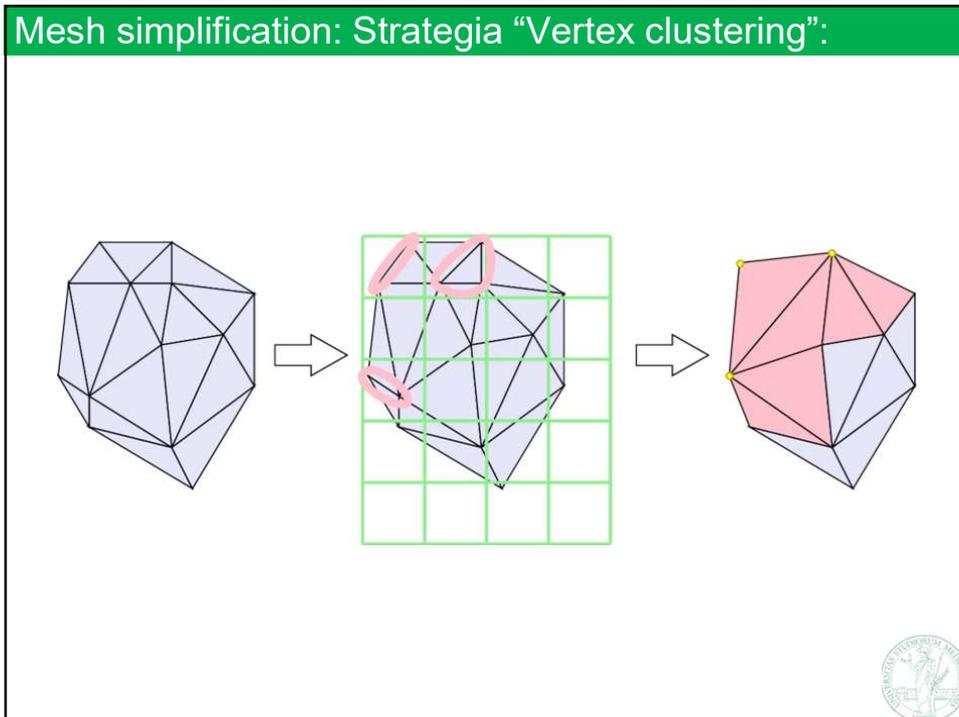
- ✓ Molte algoritmi (eruristici!), seguono approcci diversi
- ✓ Le tecniche si differenziano in:
 - ⇒ Adattive e no
 - lasciano piu' triangoli dove c'e' bisogno (es non nelle zone piatte)
 - oppure riducono il numero di elementi ovunque
 - ⇒ Con garanzie su errore massimo introdotto, o no
 - viene misurato? è limitato superiormente?
 - oppure nessun limite / o nessuna misura
 - ⇒ Incrementali o discrete:
 - Ho una sequenza continua di mesh a risoluzione sempre inferiore?
 - Oppure ho solo una singola mesh finale
 - ⇒ Caratteristiche della mesh (2 manifoldness, chiusa):
 - sono sempre mantenute?
 - oppure, possono essere perse?
 - ⇒ e molto altro...



132



133



134

Mesh simplification: Strategia "Vertex clustering":

1. Suddivido virtualmente lo spazio 3D che contiene la mesh in una griglia regolare di "cubetti", tutti di lato k
2. Per ogni vertice della mesh originale, trovo il cubetto a cui appartiene
 - ⇒ ogni vertice della mesh in input si trova all'interno di un cubetto.
 - ⇒ come trovo questo cubetto, data la posizione del vertice?
3. Per ogni cubetto popolato da almeno un vertice, creo UN SOLO vertice in output, che rappresenta tutti i vertici dentro quel cubetto
 - ⇒ assegno al nuovo vertice la posizione media di tutti i vertici finiti nel cubetto
 - ⇒ nota: ciascun vertice originale è rappresentato da uno dei nuovi vertici
4. Processo ogni triangolo della mesh originale: se connette tre vertici originali rappresentati da tre vertici diversi, allora genero un triangolo che connette i tre vertici.
 - ⇒ Altrimenti, scarto il triangolo



135

Mesh simplification: Strategia "Vertex clustering": note

- ✓ Il parametro k controlla la risoluzione della mesh risultante: tanto maggiore è k , tanto minore la risoluzione
 - ⇒ Se k è molto piccolo, la mesh prodotta in output è la stessa della mesh in input
- ✓ L'algoritmo è molto semplice da implementare ed è LINEARE con la risoluzione della mesh
 - ⇒ Bastano due cicli, uno sui vertici e uno sulle facce



136

Mesh simplification: Strategia a operazioni locali

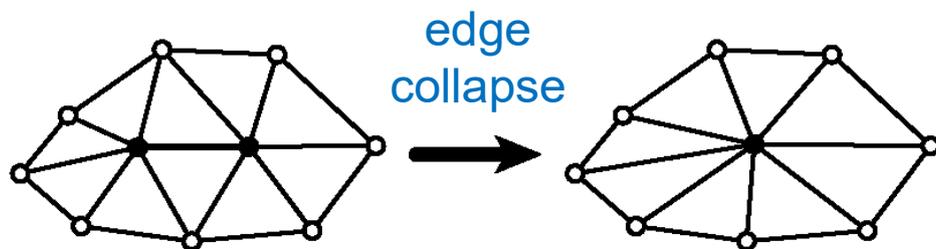
- ✓ Operazione locale: una operazione che coinvolge (e modifica) solo una piccola parte della mesh
 - ⇒ Modifica la geometria e la connettività della mesh solo in un intorno
- ✓ Iterazione di *operazioni locali*
 - ⇒ Repeat
 - scegli un'operazione locale (secondo un criterio)
 - esegui operazione locale (modifica locale della mesh)
 - ⇒ until obiettivo raggiunto
 - es: risoluzione target raggiunta
 - es: errore massimo superato



137

Mesh simplification: Strategia a operazioni locali

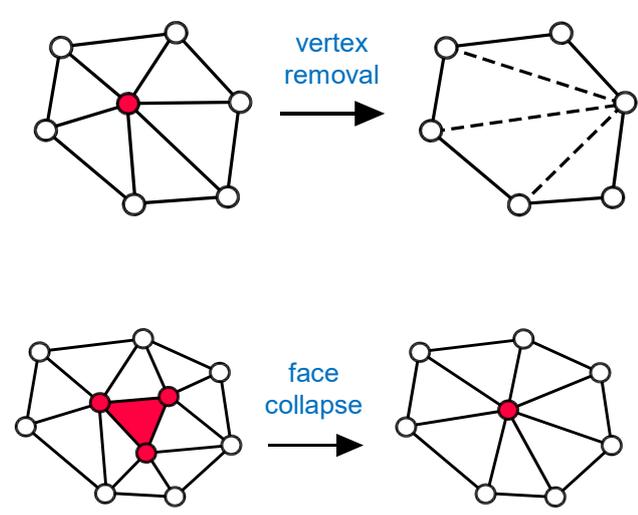
- ✓ Esempio di operazione locale di riduzione della complessità (cioè "coarsening")



138

Semplificazione automatica di una mesh

✓ Altri esempi di operazioni locali di coarsening:



The diagram shows two examples of local coarsening operations on a mesh. The first example, labeled 'vertex removal', shows a mesh with a central red vertex being removed. The resulting mesh has a hole that is filled by new triangles (indicated by dashed lines) that re-polygonize the area. The second example, labeled 'face collapse', shows a mesh with a central red triangle being collapsed. The resulting mesh has a new red vertex where the triangle was, and the two edges that were part of the triangle are now collapsed into a single edge.

vertex removal

nuovi triangoli:
che ri-poligonizzano
il buco lasciato dalla
rimozione del vertice

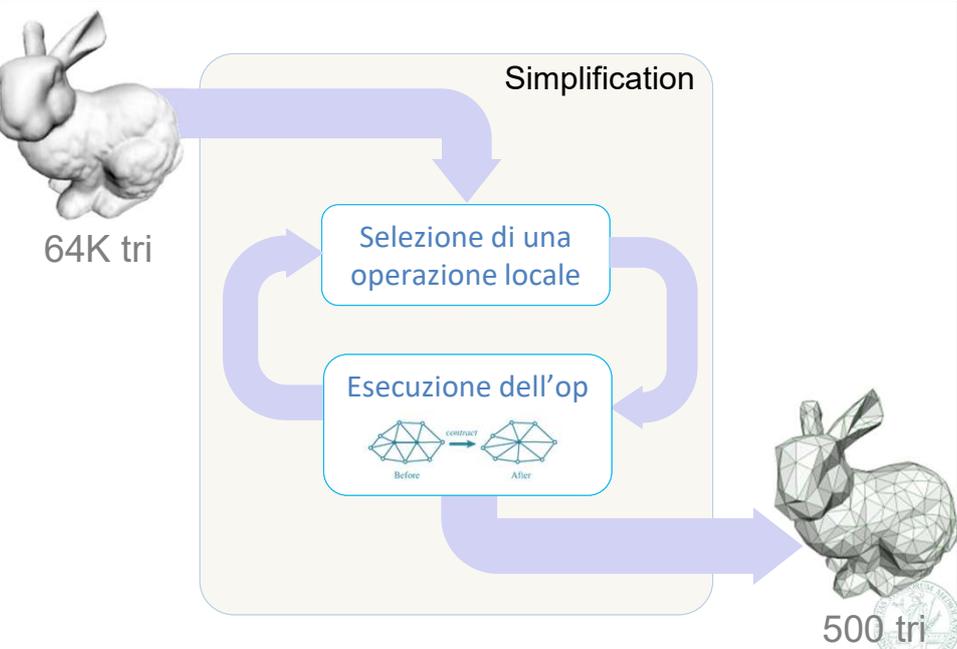
face collapse

nota:
si può considerare
una successione
di due
edge collapse



139

Semplificazione automatica di una mesh



The flowchart illustrates the automatic mesh simplification process. It starts with a high-resolution mesh of a rabbit, labeled '64K tri'. This mesh enters a 'Simplification' box. Inside this box, there is a loop of two steps: 'Selezione di una operazione locale' (Selection of a local operation) and 'Esecuzione dell'op' (Execution of the operation). The 'Esecuzione dell'op' step includes a small diagram showing a 'Before' state with a red triangle and an 'After' state with a red vertex, representing a face collapse. The process then leads to a low-resolution mesh of the rabbit, labeled '500 tri'.

64K tri

Simplification

Selezione di una operazione locale

Esecuzione dell'op

Before After

500 tri



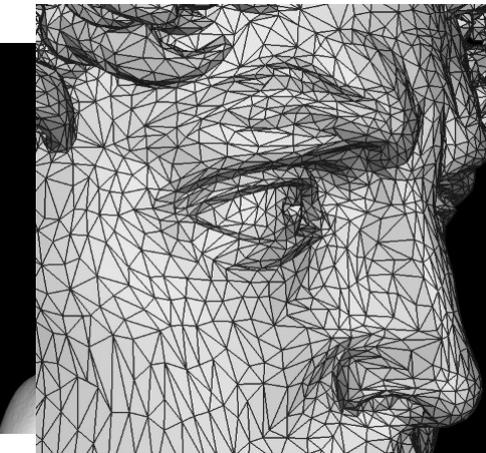
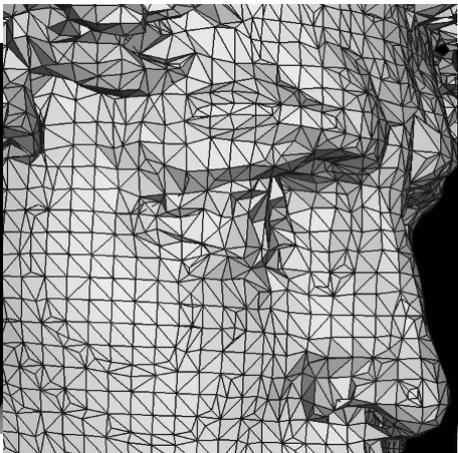
140

Due strategie a confronto

Semplificazione ad operaz locali	Semplificazione a clustering
✓ adattiva	✓ non adattiva
✓ continua	✓ discreta
✓ possibile mirare a triangoli di forma buona	✓ mira a facce di dimensione simile
✓ possibile specificare errore massimo	✓ possibile solo specificare dimensione griglia (solo indirettamente, errore o numero di facce)
✓ possibile specificare numero di facce target	
✓ possibile mantenere caratteristiche mesh ⇒ two-manifoldness, chiusura, classe topologia	✓ non mantiene caratteristiche mesh
✓ spesso <i>richiede</i> mesh two-manifold in partenza	✓ veloce, semplice da implementare, robusta (funziona su qualsiasi mesh)

142

Due strategie a confronto

Semplificazione ad edge collapse (adattva) 215k faces	Semplificazione a clustering (non adattiva) 235k faces
	

143