

# Elaborazione di un point cloud e triangolazione con algoritmo Greedy Projection Triangulation

Davide Pala

Anno Accademico 2014/2015



**POLITECNICO  
DI TORINO**

distribuito secondo la licenza Creative Commons:

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	Team DIANA . . . . .	3
1.2	I point-cloud . . . . .	3
1.3	Obiettivi e descrizione del progetto . . . . .	4
1.4	I vantaggi delle mesh . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Il programma</b>	<b>5</b>
2.1	Approccio Object Oriented . . . . .	5
2.2	Il main . . . . .	7
2.3	I filtri . . . . .	8
2.3.1	Voxel Grid Filter . . . . .	8
2.3.2	Statistical Outlier Removal . . . . .	10
2.4	Surface Smoothing . . . . .	12
2.4.1	Normal Estimation . . . . .	13
2.5	Greedy Projection Triangulation . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Considerazioni e Sviluppi futuri</b>	<b>16</b>
3.1	Sviluppi futuri . . . . .	16
3.2	Conclusioni . . . . .	16

# 1 Introduzione

## 1.1 Team DIANA

Il team Diana è un gruppo studentesco del Politecnico di Torino che si occupa di robotica spaziale, nato per rappresentare l'ateneo all'interno del progetto AMALIA<sup>1</sup>. L'attività del team è dedicata principalmente allo sviluppo di un rover lunare in tutte le sue funzionalità.

Il rover è dotato, allo stato attuale, di un sistema di acquisizione di immagini composto da due camere Black-and-White di Point Gray<sup>2</sup> e da un sensore Mesa SR4500 ToF camera<sup>3</sup>. Questa strumentazione permette al sistema di effettuare delle riprese in cui vengono acquisiti dei Point Cloud.

## 1.2 I point-cloud

Un point cloud è un insieme di punti dello spazio tridimensionale, espressi secondo un sistema di coordinate, che rappresenta la superficie esterna di un oggetto. I point cloud sono generalmente acquisiti scansionando delle superfici con apparecchiature quali laser scanner 3D, stereo camere e camere ToF, come nel caso del nostro rover. I point cloud trovano un largo impiego nelle applicazioni riguardanti la robotica, tuttavia sono inadatti ad un utilizzo diretto nella maggior parte delle applicazioni 3D e vengono spesso convertiti in mesh poligonali.

---

<sup>1</sup><http://www.amalia-teamitalia.it/>

<sup>2</sup>[http://team-diana.github.io/en/#!/pages/blackfly\\_bw\\_poe\\_gige\\_hardware.md](http://team-diana.github.io/en/#!/pages/blackfly_bw_poe_gige_hardware.md)

<sup>3</sup><http://team-diana.github.io/en/#!/pages/sr4500.md>

### 1.3 Obiettivi e descrizione del progetto

L'obiettivo di questo progetto era di scrivere un programma il cui scopo è generare una mesh poligonale effettuando la triangolazione di un point cloud. Il lavoro Il programma acquisisce il nome del file contenente il point cloud e il nome del file di output da linea di comando, i punti vengono letti dal file e processati da una serie di algoritmi di filtraggio. Successivamente viene applicato lo smoothing delle superfici, durante il quale viene effettuato anche il calcolo delle normali, in ultimo l'algoritmo di ricostruzione dei triangoli elabora il point cloud, la mesh così generata viene quindi scritta sul file di output.

Il software è scritto in C++, per lo sviluppo è stato utilizzato l'IDE Qt Creator<sup>4</sup>, mentre per le strutture dati e gli algoritmi per il processing del point cloud è stata utilizzata la libreria pcl<sup>5</sup>. Il codice sorgente completo del programma è disponibile all'indirizzo: <https://github.com/ilmessere/point-cloud-triangulation>.

### 1.4 I vantaggi delle mesh

Convertire un point cloud in una superficie 3D porta numerosi vantaggi: la maggior parte degli algoritmi standard di grafica 3D sono stati sviluppati e ottimizzati per lavorare con le mesh poligonali, l'utilizzo di mesh consente anche di migliorare notevolmente le performance di algoritmi di path-finding e collision checking. Altri grossi vantaggi si hanno poi dal punto di vista della visualizzazione, infatti le mesh danno un'immagine più realistica, alla quale si ha la possibilità di aggiungere delle texture per migliorarne ulteriormente la resa grafica, inoltre un'altro importante vantaggio è la riduzione della memoria necessaria per la visualizzazione dell'entità.

---

<sup>4</sup>[http://wiki.qt.io/Qt\\_Creator](http://wiki.qt.io/Qt_Creator)

<sup>5</sup><http://pointclouds.org/about/>

## 2 Il programma

### 2.1 Approccio Object Oriented

Il programma è stato sviluppato seguendo l'approccio della programmazione orientata agli oggetti: una facade class, PointCloudTriangulation, espone al main le funzioni per la lettura e l'elaborazione del point cloud e per la gestione dei filtri, che sono immagazzinati internamente con una mappa che associa una stringa, il nome del filtro, ad un puntatore generico a PointCloudFilter. La classe espone anche le funzioni per effettuare la triangolazione e per salvarne il risultato su file, sono inoltre definiti i valori di default dei parametri della triangolazione.

---

```
1 #define PARAM_SEARCH_RADIUS 0
2 #define PARAM_MULTIPLIER 1
3 #define PARAM_MAX_NEAREST_NEIGHBORS 2
4 #define PARAM_MAX_SURFACE_ANGLE 3
5 #define PARAM_MIN_ANGLE 4
6 #define PARAM_MAX_ANGLE 5
7 #define PARAM_NORMAL_CONSISTENCY 6
8 #define DEFAULT_SEARCH_RADIUS 0.025
9 #define DEFAULT_MULTIPLIER 2.5
10 #define DEFAULT_MAX_NEAREST_NEIGHBORS 100
11 #define DEFAULT_MAX_SURFACE_ANGLE M_PI/4
12 #define DEFAULT_MIN_ANGLE M_PI/18 //10
13 #define DEFAULT_MAX_ANGLE 2*M_PI/3 //120
14 #define DEFAULT_NORMAL_CONSISTENCY true
15
16 class PointCloudTriangulation
17 {
18 private:
19     pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr cloud;
20     pcl::PointCloud<pcl::PointNormal>::Ptr normalCloud;
21     pcl::GreedyProjectionTriangulation<pcl::PointNormal> gp3;
22     pcl::PolygonMesh triangles;
23     std::map<std::string, PointCloudFilter*> algorithms;
24
25 public:
26     PointCloudTriangulation(pcl::PointCloud<pcl::PointNormal>::Ptr);
27     PointCloudTriangulation(std::string);
28     PointCloudTriangulation();
29
30     void addFilter(std::string, PointCloudFilter*);
31     void applyFilter(std::string);
32     void loadCloudFromFile(std::string);
33     void surfaceSmoothing();
34     void reconstruct(); //apply greedy projection triangulation
35     void saveTriangulation(std::string);
36     PointCloudFilter* getFilter(std::string);
37     pcl::PointCloud<pcl::PointNormal>::Ptr getCloud();
38     pcl::PolygonMesh getTriangulation();
39 };
```

---

Figura 1: la classe PointCloudTriangulation

PointCloudFilter è una classe puramente virtuale realizzata come interfaccia per la gestione dei filtri, dichiara soltanto 3 metodi utili per applicare l'algoritmo e settarne o leggerne i parametri. I parametri sono identificati da delle costanti numeriche e sono trattati come dei double. L'effettiva implementazione dei filtri è realizzata con 2 sottoclassi di PointCloudFilter: PCVoxelGridFilter e PCStatisticalOutlierRemoval.

---

```
1  class PointCloudFilter
2  {
3  public:
4      virtual void apply(pcl::PointCloud<pcl::PointNormal>::Ptr) = 0;
5      virtual void setParameter(int, double) = 0;
6      virtual double getParameter(int) = 0;
7  };
```

---

Figura 2: la classe PointCloudFilter

## 2.2 Il main

Grazie all'utilizzo della facade class e il main del programma risulta particolarmente conciso. Dopo il controllo degli argomenti da linea di comando, viene allocata un'istanza della facade class, triangulation, quindi si passa alla lettura del file contenente il point cloud. Due puntatori generici a PointCloudFilter vengono allocati come oggetti di tipo PCVoxelGridFilter e PCStatisticalOutlierRemoval e aggiunti a all'oggetto triangulation assegnandogli un identificatore di tipo string. I due filtri sono quindi applicati sul point cloud e, dopo il surface smoothing, *triangulation*  $\rightarrow$  *reconstruct()* genera la mesh poligonale, che viene quindi salvata sul file di output. Per ragioni di brevità tutte le righe riguardanti la deallocazione dinamica della memoria sono state tralasciate.

---

```
1 int main(int argc, char **argv)
2 {
3     help(argc, argv); // check command line args
4
5     PointCloudTriangulation *triangulation = new PointCloudTriangulation();
6
7     triangulation->loadCloudFromFile(argv[1]); // read cloud from pcd file
8
9     PointCloudFilter* voxel_grid_filter = new PCVoxelGridFilter();
10    PointCloudFilter* gaussian_noise_filter = new
        PCStatisticalOutlierRemoval();
11
12    triangulation->addFilter("voxel grid filter", voxel_grid_filter);
13    triangulation->addFilter("gaussian noise filter", gaussian_noise_filter)
14    ;
15    triangulation->applyFilter("voxel grid filter");
16    triangulation->applyFilter("gaussian noise filter");
17
18    triangulation->surfaceSmoothing();
19    triangulation->reconstruct();
20
21    triangulation->saveTriangulation(argv[2]);
22
23    return 0;
24 }
```


---

Figura 3: il main del programma

## 2.3 I filtri

### 2.3.1 Voxel Grid Filter


Il tempo di calcolo è stato il primo problema incontrato durante lo sviluppo; infatti il tempo necessario per l'esecuzione di surface smoothin e triangolazione su un point cloud di 460400 punti è di circa 2 minuti, mentre applicando tutte le elaborazioni dopo il downsamle, il tempo di esecuzione è sceso al di sotto dei 10 secondi, spesi perlopiù nella fase di lettura del file.



```
Terminal - davide@h-oste: ~/Development/cc++/triangulation/test
File Edit View Terminal Tabs Help
davide@h-oste:~/Development/cc++/triangulation/test$ time ../build-triangulation-Desktop-Debug/triangulation table_scene_lms400.pcd table_scene_no_downsample.vtk
Points readed: 460400
Surface smoothing completed
Not enough neighbors are considered: ffn or sfn out of range! Consider increasing nnn.... Setting R=36718 to be BOUNDARY!
Not enough neighbors are considered: source of R=135156 is out of range! Consider increasing nnn....
Number of neighborhood size increase requests for fringe neighbors: 119
Number of neighborhood size increase requests for source: 61
triangulation done

real    1m55.101s
user    1m52.038s
sys      0m3.122s
davide@h-oste:~/Development/cc++/triangulation/test$
```

(a)



```
Terminal - davide@h-oste: ~/Development/cc++/triangulation/test
File Edit View Terminal Tabs Help
davide@h-oste:~/Development/cc++/triangulation/test$ time ../build-triangulation-Desktop-Debug/triangulation table_scene_lms400.pcd table_scene_fully_filtered.vtk
Points readed: 460400
Applying voxel grid filter
Number of points before the Voxel Grid Filtering: 460400
Number of points after the Voxel Grid Filtering: 41049
Applying gaussian noise filter
Number of points before the Statistical Outlier Removal: 41049
Number of points after the Statistical Outlier Removal: 36451
Surface smoothing completed
triangulation done

real    0m8.762s
user    0m7.944s
sys      0m0.324s
davide@h-oste:~/Development/cc++/triangulation/test$
```

(b)

Figura 4: confronto fra i tempi di esecuzione con e senza downsamle



Per realizzare il downsampling del point cloud è stato utilizzato l'algoritmo di voxel grid filtering. Questo algoritmo funziona suddividendo lo spazio in una griglia di voxel, piccole unità di volume, tutti i punti all'interno di un voxel vengono approssimati dal loro baricentro. Il filtro ha tre parametri fondamentali che sono la lunghezza degli spigoli del voxel lungo i 3 assi cartesiani.

---

```

1 #define DEFAULT_LEAF_SIZE 0.01 f
2 #define PARAM_LEAF_SIZE_X 0 // "leaf size x"
3 #define PARAM_LEAF_SIZE_Y 1 // "leaf size y"
4 #define PARAM_LEAF_SIZE_Z 2 // "leaf size z"
5
6 class PCVoxelGridFilter : public PointCloudFilter
7 {
8 public:
9     PCVoxelGridFilter();
10    void apply(pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr cloud);
11    //void setParameter(int, std::string);
12    void setParameter(int, double);
13    double getParameter(int);
14    bool isValidParam(int);
15 private:
16    pcl::VoxelGrid< pcl::PointXYZ> voxel_grid_filter;
17    std::map<int, double> params;
18 };

```

---

Figura 5: la classe PCVoxelGridFilter

La classe che realizza il filtro è PCVoxelGridFilter ed implementa l'interfaccia PointCloudFilter, il metodo *apply()* imposta i parametri ed applica il filtro, come dimensione di default per i lati del voxel è stata scelta 0.01, che dovrebbe corrispondere a cubi di spigolo un centimetro, con questa configurazione il numero di punti del point cloud di test viene ridotto da 460400 a 41049, un fattore di circa 11.

---

```

1 void PCVoxelGridFilter::apply(pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr cloud)
2 {
3     std::cout<<"Number of points before the Voxel Grid Filtering: "<<cloud->
4         width*cloud->height<<std::endl;
5     voxel_grid_filter.setInputCloud(cloud);
6     voxel_grid_filter.setLeafSize((float)params[PARAM_LEAF_SIZE_X],
7                                   (float)params[PARAM_LEAF_SIZE_Y],
8                                   (float)params[PARAM_LEAF_SIZE_Z]);
9     voxel_grid_filter.filter(*cloud);
10    std::cout<<"Number of points after the Voxel Grid Filtering: "<<cloud->
11        width*cloud->height<<std::endl;
12 }

```

---

Figura 6: il metodo *apply()* della classe PCVoxelGridFilter

### 2.3.2 Statistical Outlier Removal

Il secondo stadio di filtraggio si occupa di attenuare e rimuovere il rumore del cloud, infatti, durante la cattura, i sensori rilevano punti errati, spesso a causa di riflessi o errori di misura, questi errori complicano poi le elaborazioni successive e rischiano di condurre a risultati sbagliati, per esempio nel calcolo delle normali.

Anche in questo caso la classe che implementa il filtro, `PCStatisticalOutlierRemoval`, è una sottoclasse di `PointCloudFilter` e implementa quindi i soliti metodi `getParameter()`, `setParameter()` ed `apply()`.

---

```
1 //number of point to use for mean distance estimation
2 #define PARAM_MEAN_K 0 // "mean k"
3 #define PARAM_STD_DEV_MUL_TH 1 // "standard deviation multiplier threshold"
4
5 // default values
6 #define DEFAULT_MEAN_K 50
7 #define DEFAULT_STD_DEV_MUL_TH 0.1
8
9 class PCStatisticalOutlierRemoval : public PointCloudFilter
10 {
11 public:
12     PCStatisticalOutlierRemoval();
13     void apply(pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr cloud);
14     void setParameter(int, double);
15     double getParameter(int);
16
17 private:
18     std::map<int, double> parameters;
19     pcl::StatisticalOutlierRemoval<pcl::PointXYZ> sor;
20
21 };
22
```

---

Figura 7: la classe `PCStatisticalOutlierRemoval`

Il principio di funzionamento dell'algoritmo si basa sul valutare punto per punto la distanza media da tutti i suoi  $n$  vicini, la distribuzione risultante viene considerata come una gaussiana con una media e una deviazione standard  $\sigma$ , tutti i punti appartenenti al vicinato la cui distanza supera il valore  $m \times \sigma$  sono considerati outlier e rimossi dall'insieme. I parametri del filtro sono il numero  $n$  di vicini da considerare e il moltiplicatore  $m$  della deviazione standard, i valori scelti come default sono  $n = 50$  e  $m = 1.0$ , il filtro rimuove quindi tutti i punti la cui distanza supera un  $\sigma$ .

---

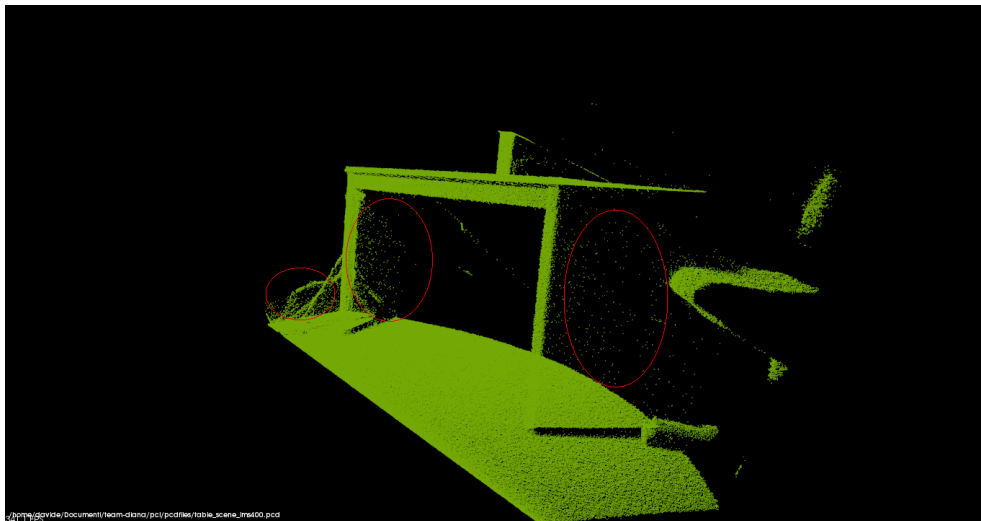
```

1 void PCStatisticalOutlierRemoval::apply(pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr
  cloud){
2   std::cout<<"Number of points before the Statistical Outlier Removal: "<<
    cloud->width*cloud->height<<std::endl;
3   sor.setInputCloud (cloud);
4   sor.setMeanK ((int)parameters[PARAMMEANK]);
5   sor.setStddevMulThresh ((float)parameters[PARAMSTD_DEV_MULTH]);
6   sor.filter (*cloud);
7   std::cout<<"Number of points after the Statistical Outlier Removal: "<<
    cloud->width*cloud->height<<std::endl;
8 }

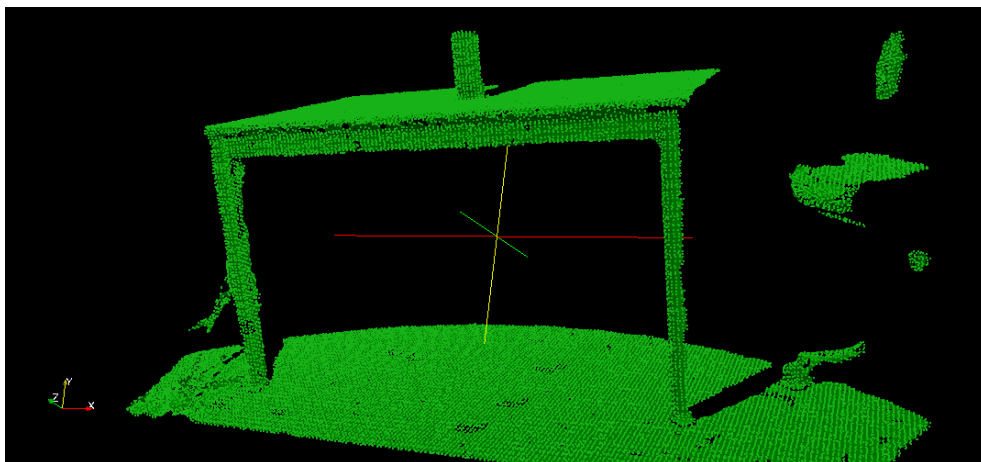
```

---

Figura 8: il metodo *apply()* della classe PCStatisticalOutlierRemoval



(a)



(b)

Figura 9: il point cloud non filtrato (a) e la mesh generata dal programma (b)

## 2.4 Surface Smoothing

L'algoritmo di surface smoothing mooving least squares si occupa di fare una ricostruzione delle superfici basata su un resample del cloud e sull'interpolazione polinomiale, questa elaborazione dovrebbe contribuire a ridurre il rumore e i piccoli difetti del data set, inoltre l'algoritmo di triangolazione ha un risultato migliore se effettuato su superfici regolari. Il parametro fondamentale di questo algoritmo è il raggio di ricerca, il raggio della sfera usata per cercare i vicini, su cui effettuare il fit polinomiale, il metodo *setComputeNormals(true)* serve per richiedere il calcolo delle normali, mentre, per i restanti parametri si è lasciato che la libreria utilizzasse i valori di default.

---

```
1  void PointCloudTriangulation::surfaceSmoothing() {
2      pcl::search::KdTree<pcl::PointXYZ>::Ptr tree(new pcl::search::KdTree<
          pcl::PointXYZ>());
3      pcl::MovingLeastSquares<pcl::PointXYZ, pcl::PointNormal> mls;
4
5      mls.setComputeNormals(true);
6
7      mls.setInputCloud(cloud);
8      mls.setPolynomialFit(true);
9      mls.setSearchMethod(tree);
10     mls.setSearchRadius(0.03);
11
12     mls.process(*normalCloud);
13     std::cout<<"Surface smoothing compleated"<<std::endl;
14 }
```

---

Figura 10: *surfaceSmoothing()* nella classe PointCloudTriangulation

### 2.4.1 Normal Estimation

L'algoritmo di surface smoothing si occupa anche di effettuare il calcolo delle normali, necessarie all'algoritmo di triangolazione. Nelle fasi iniziali dello sviluppo per il surface smoothing era stato utilizzato lo stesso approccio adottato con i filtri: era stata creata una classe che implementasse i metodi di `PointCloudFilter` e le normali venivano calcolate immediatamente dopo la lettura dei dati dal file, questo era necessario affinché i filtri potessero operare tutti sullo stesso tipo di dato, `pcl::PointCloud`/`pcl::PointNormal`; ciò comportava un tempo di elaborazione più lungo, perché il calcolo delle normali veniva effettuato sui dati non filtrati, e una maggiore complessità del codice che doveva gestire anche i parametri dell'algoritmo di normal estimation. Per questi motivi e per il fatto che la libreria PCL non considera il surface smoothing come un filtro, l'algoritmo è stato integrato nella classe `PointCloudTriangulation`, e il calcolo delle normali è stato delegato al surface smoothing stesso. Il resample del point cloud dovrebbe inoltre dare risultati migliori e generare delle normali meno soggette al rumore e alle imperfezioni del data set.

## 2.5 Greedy Projection Triangulation

Il core del programma consiste nella generazione una mesh poligonale a partire da un point cloud con le normali. Per lo scopo viene utilizzato l'algoritmo di greedy projection triangulation, questo metodo si basa sul tenere una lista di punti dalla quale accrescere la mesh ed estenderla finchè tutti i punti sono connessi, la triangolazione viene effettuata localmente: i vicini di un punto vengono proiettati lungo la normale del punto stesso, i punti non ancora connessi vengono collegati.

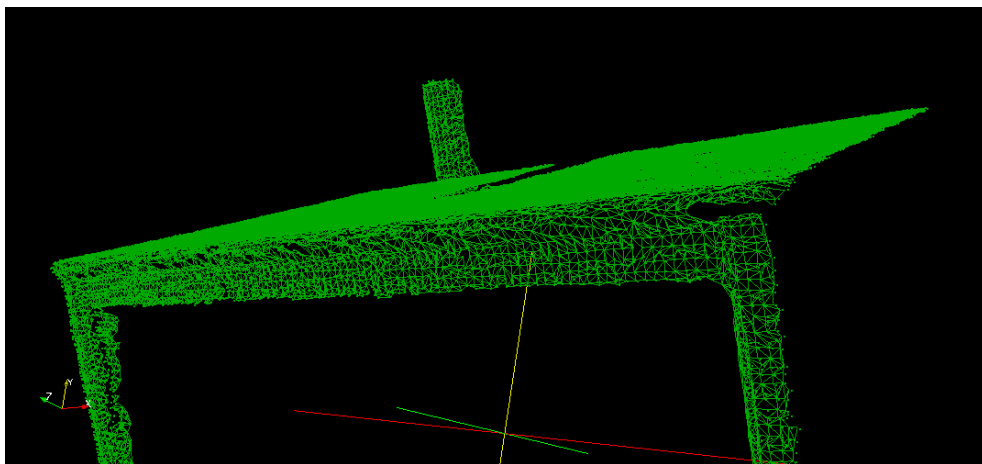
Il metodo ha numerosi parametri: maximum nearest neighbors specifica il numero massimo di vicini, il multiplier specifica la massima distanza per la quale un punto può essere considerato un vicino, relativa al punto a distanza minima, il search radius è il raggio di ricerca per i vicini e limita la dimensione massima dei lati dei triangoli, minimum angle e maximum angle definiscono il massimo e il minimo valore per gli angoli all'interno di ciascun triangolo, maximum surface angle specifica il massimo angolo di deviazione tra la normale di un punto e quella di un suo vicino affinché questo possa essere considerato per la triangolazione.

---

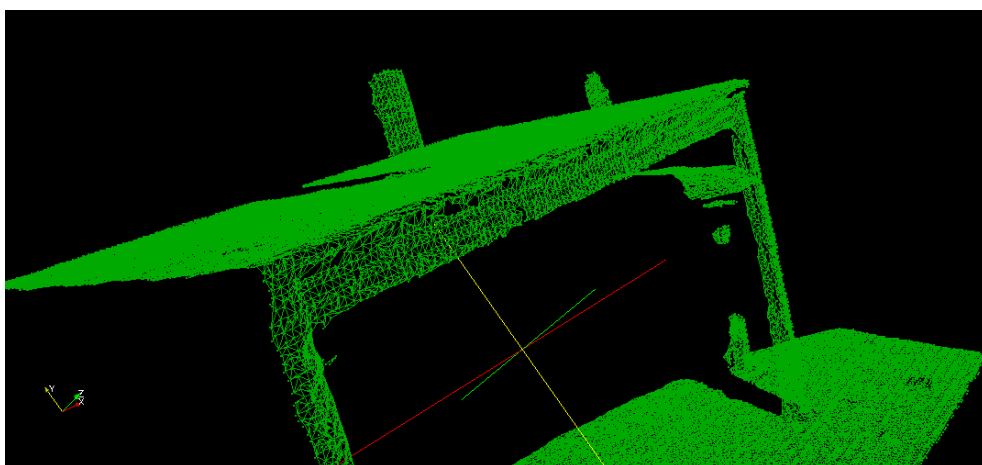
```
1 void PointCloudTriangulation::reconstruct(){
2     // Create search tree*
3     pcl::search::KdTree<pcl::PointNormal>::Ptr tree (new pcl::search::
4         KdTree<pcl::PointNormal>);
5     tree->setInputCloud (normalCloud);
6
7     // Set the maximum distance between connected points (maximum edge
8         length)
9     gp3.setSearchRadius (DEFAULT_SEARCH_RADIUS);
10
11     // Set typical values for the parameters
12     gp3.setMu (DEFAULT_MULTIPLIER); // 2.5
13     gp3.setMaximumNearestNeighbors (DEFAULT_MAX_NEAREST_NEIGHBORS); // 100
14     gp3.setMaximumSurfaceAngle (DEFAULT_MAX_SURFACE_ANGLE); // 45 degrees
15     gp3.setMinimumAngle (DEFAULT_MIN_ANGLE); // 10 degrees
16     gp3.setMaximumAngle (DEFAULT_MAX_ANGLE); // 120 degrees
17     gp3.setNormalConsistency (true);
18
19     // Get result
20     gp3.setInputCloud (normalCloud);
21     gp3.setSearchMethod (tree);
22     gp3.reconstruct (triangles);
23     std::cout<<"triangulation done"<<std::endl;
24 }
```

---

Figura 11: il metodo *reconstruct()* della classe *PointCloudTriangulation*



(a)



(b)

Figura 12: la mesh poligonale ottenuta dalla triangolazione

### 3 Considerazioni e Sviluppi futuri

Questo lavoro ha richiesto molto tempo, soprattutto per la ricerca e la comprensione degli algoritmi e dei loro parametri, tuttavia non è da intendersi come un progetto concluso: sono possibili numerosi sviluppi e modifiche e il software è in continuo aggiornamento, è inoltre necessario effettuare dei test più approfonditi per affinare i valori dei parametri e migliorare la qualità dell'output. Sarà necessario anche effettuare dei test sui dati acquisiti dal rover, per poter tarare i valori di default in modo da ottenere un risultato migliore sui suoi point cloud.

#### 3.1 Sviluppi futuri

La prima necessità che emerge dall'utilizzo del programma è quella di una più facile gestione dei parametri, infatti, seppure l'approccio object oriented ne facilita l'utilizzo, la configurazione dei valori è statica e bisogna ricompilare il programma ogni volta che si effettua una modifica, per questo motivo una configurazione con lettura da file sembra la via più efficace. Per un eventuale file di configurazione stiamo valutando, al momento, due formati: xml e YALM<sup>6</sup>.

Il passo successivo dello sviluppo sarà quello dell'integrazione con ROS<sup>7</sup> e della creazione di un nodo in grado di ricevere i point cloud rilevati dal rover ed elaborarli, eventualmente in tempo reale, con la possibilità di effettuare tutta la catena di esecuzione per la triangolazione, o, magari, di effettuare solo un live filtering in modo da pulire i dati e renderli più maneggevoli per altre applicazioni.

#### 3.2 Conclusioni

Questo lavoro, e in generale tutta l'esperienza con il team DIANA, mi ha permesso di esplorare, anche se superficialmente, il mondo della computer vision, ho acquisito inoltre una maggiore familiarità con il linguaggio C++, con le librerie PCL e tutti gli strumenti di sviluppo, è stato anche un'ottima occasione per poter applicare le conoscenze apprese durante i corsi seguiti in questi anni per la soluzione di problemi pratici.

---

<sup>6</sup><http://yaml.org/>

<sup>7</sup><http://www.ros.org/>