

Recalage et fusion de modèles numérisés tridimensionnels de grande taille

MEMO-F-403 - Préparation au mémoire

Tim Lenertz

1^{er} septembre 2014

Table des matières

1	Introduction	3
2	Etat de l'art	4
2.1	Documentation 3D	4
2.1.1	Scanner tridimensionnels	5
2.2	Théorie préliminaire	6
2.2.1	RANSAC	6
2.2.2	Méthode de Newton	6
2.2.3	Analyse procustéenne généralisée	7
2.3	Recalage	8
2.4	Iterative Closest Point	9
2.4.1	Calcul de la transformation par quaternions	10
2.4.2	Version simultanée de l'ICP	11
2.4.3	ICP généralisé	11
2.5	4-Points Congruent Sets	13
2.6	Normal Distributions Transform	15
2.7	Extended Gaussian Images	17
2.7.1	Application sur le recalage de nuages de points	19
2.8	Photogrammétrie	19
2.8.1	Optique	19
2.8.2	Modèle pin-hole	20
2.8.3	Calibrage	21
2.8.4	Problème de correspondance	23
2.8.5	Reconstruction 3D	23
2.8.6	Combination photo-nuage de points	24
3	Projet prévu pour le mémoire	26

1 Introduction

Dans le cadre de projets de documentation 3D, des objets ou environnements sont souvent numérisés sous forme de *nuages de points*. Un nuage de points consiste uniquement en un ensemble de points situés sur les surfaces des objets, définis par des coordonnées dans un repère orthonormal donné, et attribués par des valeurs scalaires ou vectorielles comme par exemple une couleur RGB.

Ces jeux de données sont usuellement capturés par des scanners 3D à télémètre laser, ou par photogrammétrie. Les données brutes ne représentent qu'une partie de l'objet, et sont limitées par le champ de vision de la caméra, les surfaces cachées (sur le côté opposé au scanner de l'objet), les limites de résolution pour des parties éloignées ou qui ont une texture complexe. Afin d'en synthétiser un nuage de points représentant le modèle complet, plusieurs traitements doivent être effectués, notamment le recalage : Pour tous les nuages de points partiels, une transformation affine est appliquée aux points afin de les mettre dans un repère commun.

Plusieurs techniques (semi)-automatisées ont été développées qui permettent de trouver une approximation des positions et orientations relatifs des scans. Ils peuvent faire intervenir des photos ou des marqueurs visuels ajoutés sur la scène. La matrice de transformation précise est ensuite déterminée algorithmiquement, afin de bien aligner les surfaces dans les différents ensembles de points. Typiquement, une forme de l'algorithme ICP¹ est utilisée, un algorithme qui ajuste la transformation en itérativement minimisant la distance entre les deux ensembles de points.

Ce mémoire se concentre sur le recalage de numérisations à distance d'un objet à grande dimensions, avec des numérisations à courtes distances de détails de l'objet. Donc les ensembles de points à recaler pourront avoir des densités très différentes, et auront un nombre de points très élevé. Le but est d'établir un workflow et de développer des algorithmes qui permettent d'effectuer ce type de recalage. Le travail est basé un projet de documentation 3D actuel du LISA.

1. Iterative Closest Point

2 Etat de l'art

Ce chapitre est essentiellement une synthèse de plusieurs ouvrages scientifiques sur des projets de documentation 3D par nuage de points, différents algorithmes de recalage, et des techniques photogrammétriques. Certains algorithmes et leurs bases mathématiques seront développés plus en détail. Le but est d'exposer une partie de la recherche existante qui pourrait être rélevante pour le mémoire.

2.1 Documentation 3D

Des nuages de points créés via des processus de numérisation 3D sont utilisés dans plusieurs domaines pour représenter des objets réels. Les modèles 3D peuvent passer de représentations détaillées d'objets petits à des bâtiments ou même des sites entiers. Des exemples d'usage sont par exemple la documentation détaillée de sites archéologiques [Center for Advanced Spatial Technologies, 2014] [Keiner, 2011] [Grussenmeyer *et al.*, 2012] et d'environnements urbains [Kersten *et al.*, 2006] (figure 3.1), des acquisitions aériennes de terrains, la vision algorithmique en robotique [Biber, 2003], la capture de formes 3D pour création de prothèses en médecine dentaire et orthopédique, la rétroingénierie, la création de modèles en animation 3D.

Pour collectionner les données brutes de l'objet pour lequel on veut générer un modèle 3D, deux techniques sont généralement utilisées : La *photogrammétrie* (c.f. 2.8) consiste à prendre des photos (possiblement stéréoscopiques) de l'objet, à partir desquelles on peut extraire algorithmiquement de l'information sur la profondeur des pixels. D'autre part, on utilise des *scanners tridimensionnels*, des appareils qui effectuent un balayage par laser de l'objet et produisent directement un nuage de points. Souvent les deux techniques sont combinées. Cela permet par exemple de compléter un scan laser très détaillé avec de l'information sur les couleurs des points.

Pour passer des données brutes au modèle final envisagé, un nombre important d'étapes de planification et de post-traitement des données doivent être effectués. Par exemple, un projet de documentation archéologique pour lequel des scans 3D et des données photogrammétriques sont utilisés peut passer par les étapes suivantes : [Lerma *et al.*, 2009]

- Planification et acquisition des données brutes. Les positions à partir desquelles les scans 3D sont pris doivent être planifiés minutieusement en fonction du terrain, de la forme de l'objet et des spécifications du scanner, afin d'assurer une couverture complète de l'objet, avec la résolution et fidélité ciblée. De même pour les positions où des photos sont prises.
- Filtrage des nuages de points bruts dans le but d'enlever des erreurs grosses du scanner, comme des points isolés.
- Recalage des nuages de points pour les mettre dans un repère commun. Beaucoup de méthodes et algorithmes ont été développés pour automatiser un recalage sous différents conditions, ce qui est le sujet de ce mémoire. Dans certains cas des markers sont placés sur la scène avant l'acquisition des scans et photos. Les nuages de points peuvent ensuite être fusionnés par simple concaténation des points.
- Maillage des nuages de points, par exemple par triangulation de Delaunay. Le but ici est d'obtenir un modèle qui reprend l'information sur les surfaces du modèle. Pour des formes complexes, par exemple de la végétation sur un mur, des procédures additionnelles d'analyse et de filtrage sont requises.
- Par des méthodes photogrammétriques [Tournas & Tsakiri, 2009] et radiométriques [Girod, 2013], les photos sont modifiés et analysés : On corrige des vignettes, distorsions et autres erreurs optiques induits par la lentille de la caméra, égalise les valeurs colorimétriques des différentes photos. Par des détecteurs de zones d'intérêt en reconnaissance d'image, on retrouve des markers, ou d'autres points marquants, afin de mettre en correspondance plusieurs photos et d'en extraire la pose de la caméra et ensuite des informations de profondeur.

- Recalage des photos sur le modèle pour texturer le maillage. Au cas où le but est un modèle non-maillé qui reste sous forme de nuage de points, les photos peuvent être utilisées pour colorier les points. Ensuite la densité des points peut être uniformisée si nécessaire.
- Dans certains contextes, par exemple en rétroingénierie ou en architecture, le but sera de finir avec un modèle CAD. Des méthodes ont été développées pour segmenter le modèle, et pour reconnaître des formes primitives ou objets.

2.1.1 Scanner tridimensionnels

Les scanners tridimensionnels utilisent des rayonnements, typiquement des lasers, pour physiquement mesurer des informations de profondeur de leur environnement. Dans les dernières années, cette technologie a connu un développement important. Les scanners 3D disposent d'un niveau avancé d'automatisation, et peuvent produire des données de bonne qualité [Grussenmeyer *et al.*, 2012] à des coûts relativement abordables.

Parmi les scanners laser, on peut distinguer entre les *Terrestrial Laser Scanner* (TLS), destinés à un usage à partir du sol, et les *Airborne Laser Scanner* (ALS) qui numérisent par exemple un terrain, à partir d'un véhicule aérien.

Scanners par temps de vol (LIDAR)

Les scanners à temps de vol utilisent un rayonnement laser qui est projeté dans le champ de vision en différentes directions en succession rapide. Ils disposent aussi d'un capteur qui détecte la lumière reflétée du point laser sur l'objet. On mesure le temps de retour des pulses laser. Figure 2.1 montre un scanner par temps de vol. [Wikipedia, 2014]

Ces scanner sont aussi appelés scanners *LIDAR*¹, par analogie au *RADAR*² qui fonctionne selon un principe similaire avec des rayonnements radio, et au *SONAR*³ pour des ondes sonores dans l'eau.

Comme la direction du laser est connue, il manque seulement la distance du scanner jusqu'à l'objet que le rayonnement laser a traversé pour arriver à des coordonnées sphériques du point. Afin de trouver cette distance, le scanner mesure le temps de retour Δt entre l'envoi du pulse laser jusqu'à la détection de la lumière reflétée. On peut en déduire la distance $d = c \times \frac{\Delta t}{2}$, où c est la vitesse de la lumière. Pour pouvoir acquérir une valeur exacte de d , le scanner doit être muni d'un chronomètre très exact : La lumière prend 3.3 picosecondes pour parcourir un millimètre. Typiquement, les scanners LIDAR collectionnent aussi la valeur d'intensité du signal de retour reçu. Celle-ci peut par exemple être utile pour déterminer le type de matériel de l'objet.

Le balayage du champ de vision peut être fait par des miroirs rotatifs. Dans les données brutes créées par le scanner, les points sont triés dans l'ordre dans lequel ils ont été pris lors du balayage. A partir de cela il est par exemple possible de générer un maillage. Les scanners à longue distance peuvent mesurer des points avec une fréquence de 10000 à 100000 points par seconde. Des scanners de type *long-range* peuvent effectuer des mesures à distance dans l'ordre de grandeur de plusieurs kilomètres.

Le système fonctionne bien uniquement pour des surfaces à réflexion diffuse, Pour des surfaces qui manifestent une réflexion spéculaire (par exemple des surfaces métalliques), ou des surfaces transparentes (par exemple des vitrines), des données erronées seront produites. En fonction du type d'objet à scanner différentes fréquences de rayonnement sont utilisées, allant de l'ultraviolet par le visible au proche infrarouge. Dans quelques applications (par exemple des mesures aériennes d'un terrain), la fréquence est choisie pour ne pas endommager des yeux, dans d'autres (par exemples applications militaires) les balayages doivent être invisibles.

Si le rayonnement est projeté sur un objet complexe comme un arbre dans les acquisitions aériennes d'une forêt, des parties du rayonnement seront reflétées à différentes distances allant jusqu'au sol. Ceci peut être exploité pour mesurer plus d'informations sur le terrain en mesurant le premier et le dernier pulse reflété reçu. Le dernier correspondra dans la plupart des cas au sol.

1. Light detection and ranging

2. Radio detection and ranging

3. Sound navigation and ranging

Scanners par triangulation

Les scanners par triangulation fonctionnent aussi par balayage laser, mais au lieu de mesurer le temps de retour du rayonnement, la position du point laser sur l'objet est visuellement déterminée en utilisant une caméra attachée au laser. A partir de la direction dans laquelle le rayonnement laser pointe et la direction du point dans le champ de vision de la caméra, les coordonnées 3D du point sont calculés par triangulation.

Ce type de scanner peut atteindre une plus grande précision dans la mesure de la position du point que les scanners à temps de vol, mais des scans à grande distance ne peuvent pas être effectués.

2.2 Théorie préliminaire

2.2.1 RANSAC

L'algorithme RANSAC ("Random Sample Consensus"⁴), initialement décrit en [Fischler & Bolles, 1980], est une méthode générale qui permet d'aligner un *modèle*, défini par un vecteur de paramètres θ , à des échantillons p_i de données mesurés. L'algorithme procède en sélectionnant aléatoirement des échantillons pour y déduire un modèle possible, qui est ensuite raffiné itérativement. La présence d'une fraction élevée d'erreurs de mesure parmi les échantillons ("outliers"⁵) rend inutilisable des solutions classiques comme la méthode des moindres carrés. Avec l'approche RANSAC, la probabilité inférieure de sélectionner parmi tous les échantillons un outlier mène à un bon alignement avec les échantillons corrects. ("inliers") Contrairement à des méthodes non-probablistiques, RANSAC essaye de trouver une estimation initiale du modèle par un nombre minimal d'échantillons, et non pas par un nombre le plus grand possible.

Soit m le nombre minimal d'échantillons requis pour trouver un modèle $\hat{\theta}$ qui correspond à ces m échantillons. Soit P l'ensemble d'échantillons. Soit $E(\theta, p)$ une métrique d'erreur qui est zéro si l'échantillon p correspond parfaitement au modèle $\hat{\theta}$. RANSAC procède en répétant la procédure suivante :

1. Soit $S \subset P$ un sous-ensemble composé de m échantillons choisis aléatoirement.
2. Calculer à partir S un modèle estimatif $\hat{\theta}$. Soit $S^* \subset P$ tous les points p de P qui correspondent au modèle : $S^* = \{p \in P : E(\hat{\theta}, p) < \epsilon\}$, pour une tolérance d'erreur ϵ donnée. S^* est appelé le *consensus set*.
3. Si $|S^*| \geq t$ pour un seuil t déterminé en fonction du nombre d'outliers, calculer l'estimation finale du modèle θ à partir de tous les échantillons du consensus set S^* , et terminer.
4. Si $|S^*| < t$, on rejète le modèle $\hat{\theta}$, et recommence à l'étape 1. Si cela arrive plus que N (nombre maximal d'itérations) fois, l'algorithme a échoué.

Une autre procédure possible serait d'au lieu d'arrêter à 3, répéter pour un nombre fixe d'itérations, et garder à la fin le modèle pour lequel $|S^*|$ était maximal.

Un exemple simple d'application serait d'aligner une droite (modèle) $y = mx + b$, définie par les paramètres $\theta = (m, b)$, à des points (échantillons) $p_i = (x_i, y_i)$. Une droite peut être trouvée à partir de $m = 2$ points, en posant $m = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}$ et $b = y_1 - mx_1$. Pour ajuster une droite à plus que deux points (pas nécessairement alignés), la méthode des moindres carrés peut être utilisée. Une métrique d'erreur serait la distance du point à la droite, donnée par $E(\theta, p) = \frac{|y - mx - b|}{\sqrt{m^2 + 1}}$.

2.2.2 Méthode de Newton

La méthode de Newton est un algorithme qui a le but de trouver itérativement des racines d'une fonction réelle continue et dérivable. En partant d'un point x_0 proche à la racine, on construit la série $x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$. Le point x_{k+1} est la solution de l'équation $f(x_k) + f'(x_k)(x - x_k) = 0$, donc le point d'intersection de la tangente de f en x_k avec l'abscisse. Le principe d'algorithme est que les tangentes donnent une approximation du comportement de la fonction. Donc quand la racine a été trouvée, x_k sera un point stationnaire ($x_k = x_{k+1}$).

4. Consensus par échantillons aléatoires

5. dans le contexte de nuages de points, des points qui ne sont pas sur une surface de l'objet

La méthode peut aussi être appliquée pour résoudre des problèmes d'optimisation, c'est à dire de minimisation d'une fonction, on considérant les racines de sa fonction dérivée f' . La formule devient

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}$$

Ceci peut aussi être étendu pour la résolution de problèmes d'optimisation sur une variable multidimensionnelle \vec{x} . On remplace f' par le gradient⁶ $\nabla f(\vec{x})$, et $(f'')^{-1}$ par l'inverse de la matrice Hessienne⁷ $(\mathbf{H}f(\vec{x}))^{-1}$:

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - (\mathbf{H}f(\vec{x}_k))^{-1} \nabla f(\vec{x}_k)$$

Pour éviter de passer par le calcul de la matrice inverse, le vecteur $\hat{\Delta}x_k = (\mathbf{H}f(\vec{x}_k))^{-1} \nabla f(\vec{x}_k)$, la quantité à retrancher du résultat après chaque itération, peut être trouvée par résolution du système d'équations linéaires $(\mathbf{H}f(\vec{x}_k)) \hat{\Delta}x = \nabla f(\vec{x}_k)$.⁸ Ecrit sous forme non-matricielle :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} \hat{\Delta}x_1 + \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \hat{\Delta}x_2 + \cdots + \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \hat{\Delta}x_n = \frac{df}{dx_1} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} \hat{\Delta}x_1 + \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_2} \hat{\Delta}x_2 + \cdots + \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \hat{\Delta}x_n = \frac{df}{dx_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} \hat{\Delta}x_1 + \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} \hat{\Delta}x_2 + \cdots + \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \hat{\Delta}x_n = \frac{df}{dx_n} \end{cases}$$

Dans le cas unidimensionnel, on prend la tangente de f' afin d'arriver au point minimal de f , qui correspond à la racine de f' . Pour trouver celle-ci on a besoin de prendre la dérivée seconde f'' . Or pour des fonctions multidimensionnelles $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, il y aura n fonctions dérivées partielles, toujours du type $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Par conséquent il y aura n^2 fonctions dérivées secondes partielles. Ceci explique la nécessité de résoudre un système d'équations $n \times n$.

2.2.3 Analyse procustéenne généralisée

Le problème de trouver une transformation rigide qui minimise une distance d'un ensemble de couples de points donnés $(x_{1,i}, x_{2,i})$ peut être résolu par *analyse procustéenne*. L'*analyse procustéenne généralisée* ("GPA") permet d'avoir au lieu de couples des k -uplets $(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{k,i})$, choisis parmi k ensembles de points. En général, l'analyse procustéenne sert à aligner des *formes*, ce qui peut être vu comme l'information géométrique qui reste d'un objet après avoir éliminé sa position, orientation et échelle. La méthode est utilisée dans beaucoup de domaines, notamment en statistique.

Soit n le nombre de couples. On encode la liste des k -uplets via k matrices modèle $n \times 3 \mathbf{X}_j$, dont les colonnes contiennent les 3 coordonnées des j -ième éléments des tuples. Ces matrices contiennent donc tous approximativement les mêmes points, hormis une transformation rigide.

On définit la *cible* \mathbf{K} comme

$$\mathbf{K} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{X}'_j \quad (2.1)$$

La matrice \mathbf{X}'_j , encore inconnue, correspond à la version transformée \mathbf{X}_j .

6. La gradient d'une fonction vectorielle dérivable $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est le vecteur des ses n dérivées partielles :

$$\nabla f(\vec{x}) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^T$$

7. La matrice Hessienne d'une fonction vectorielle $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ dérivable deux fois est composée de toutes les combinaisons de ses dérivées partielles secondes :

$$\mathbf{H}_{i,j} f(\vec{x}) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$$

8. $\hat{\Delta}x_k$ est une approximation d'un vecteur Δx_k qui résoudrait le problème en une étape.

Le principe de analyse procustéenne généralisée est le suivant : D'abord \mathbf{K} est initialisé à une valeur donnée. Pour toute matrice modèle \mathbf{X}_j , on calcule via une solution directe \mathbf{X}'_j qui est aligné le mieux avec le centroid. Par après, on recalcule \mathbf{K} par la formule 2.1. Le processus est itéré jusqu'à ce que \mathbf{K} se stabilise. [Toldo *et al.*, 2010]

Donc on doit trouver, pour tous les k matrices \mathbf{X}_j , une matrice orthogonale de rotation \mathbf{R}_j , un vecteur de translation \vec{t} et un facteur de homothétie c qui minimise

$$\|\mathbf{X}'_j\| = \|c \mathbf{X}_j \mathbf{R}_j + j t^T - \mathbf{K}\|$$

où j est un vecteur unitaire 3×1 , et $\|\mathbf{X}\|$ représente la norme de Frobenius.⁹

Une solution de l'analyse procustéenne qui permet de trouver \mathbf{X}'_j et les procédures qui permettent de calculer ce résultat sont données dans [Schönemann & Carroll, 1970] et [Schönemann, 1966].

2.3 Recalage

Afin de créer un modèle nuage de points complet, on doit fusionner plusieurs scans qui sont prises de différents points de vues et qui sont tous limités par le champ de vision du scanner. Ces différents nuages de points ont tous des repères différents, relatifs à la position et à l'orientation du scanner, et possiblement ayant des échelles différentes.

Puisqu'il s'agit toujours de repères cartésiens orthonormaux, on peut mettre un nuage de points dans un autre repère en appliquant une matrice de transformation rigide à tous ses points. Une telle transformation consiste en une translation, rotation, et dans certains cas un facteur de redimensionnement.¹⁰ Dès que les nuages de points sont tous exactement dans le même repère, on peut les fusionner par simple concaténation des points. En pratique, des post- et pré-traitements devront être effectués pour ajuster les densités et la distribution des points, corriger des erreurs dans les données brutes comme des points *outliers*, et autres.

Par recalage, on entend le procédé de trouver ces transformations rigides, de manière automatisé ou semi-automatisé. D'une part on a les algorithmes de recalage approximatif, dont le but est d'analyser le contenu des nuages de points et d'en identifier des régions qui représentent la même partie du modèle pour en déduire un recalage brut. Ensuite, ce recalage initial peut être raffiné par un algorithme de recalage précis pour bien aligner les surfaces des nuages de points. Généralement ICP est utilisé pour cela. Sachant que les nuages de points sont déjà alignés de manière à ce que les points qui représentent les mêmes parties du modèle sont proches les unes des autres, ICP procède en minimisant les distances entre ces points.

On peut distinguer entre les algorithmes locaux (séquentiels) qui opèrent sur deux nuages de points à la fois, et les algorithmes globaux (simultanés) qui effectuent un recalage de plusieurs nuages de points. Cette dernière méthode est plus complexe, mais elle a l'avantage qu'il n'y a pas d'erreur de recalage qui s'accumule lors des recalages de un à un. Ces algorithmes essayent au lieu de distribuer l'erreur uniformément parmi les nuages.

La méthode préférée pour déterminer un recalage approximatif dépend surtout du type et de la forme de l'objet numérisé, et de quelles données brutes on dispose. Certains algorithmes identifient des droites [Lichtenstein, 2011] ou des plans [Dold & Brenner, 2006] dans le modèle, et sont donc plus appropriés pour par exemple des façades simples de bâtiments. [Koch, 2008] décrit une méthode qui identifie des surfaces NURBS dans les nuages. Si les scans ont des zones de chevauchement assez grandes, il peut être possible d'en déduire le recalage de façon complètement automatisée. D'autres méthodes peuvent être utilisées avec des données collectionnées additionnelles, comme des photos prises par le même

9. La norme de Frobenius d'une matrice $m \times n$ \mathbf{X} est défini comme racine carrée de la somme des carrés de tous les éléments de \mathbf{X} . On a :

$$\|\mathbf{X}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|x_{i,j}\|^2} = \text{tr}(\mathbf{X}^* \mathbf{X})$$

10. Pour de pouvoir exprimer une transformation rigide (translation, rotation, redimensionnement) d'un point tridimensionnel \vec{p} par uniquement une multiplication matricielle $\vec{x}' = \mathbf{M} \vec{x}$, des *coordonnées homogènes* peuvent être utilisés pour la matrice de transformation et les points.

point de vue que le scanner [Tournas & Tsakiri, 2009] ou des markers placés sur l'objet avant la numérisation [Matiukas & Miniotas, 2011]. En utilisant des algorithmes de détection de zones d'intérêt [Tuytelaars & Mikolajczyk, 2007] sur des images ou directement sur les nuages de points, on peut alors identifier des points communs dans les différents scans. [Huang & You, 2012] présente une méthode basée sur une détection d'autosimilarité de nuages de points. Aussi les informations attribuées aux points, comme une couleur, une mesure de température, ou autres, peuvent servir en tant que dimension en plus des coordonnées 3D pour déterminer leur distance. [Wendt, 2008] décrit par exemple une méthode qui combine l'utilisation de cartes de profondeur, d'intensité et de luminosité, applicable sur des scans de façades de bâtiments. Une première estimation de la pose des scans peut aussi être issue de capteurs odométriques ou GPS du scanner.

Dans les pages suivantes certains algorithmes et méthodes seront décrits en détail, avec leurs bases mathématiques. Il pourront possiblement être utilisés ou développés pour le projet de mémoire.

2.4 Iterative Closest Point

L'algorithme ICP¹¹ est considéré comme la méthode standard pour l'alignement précis de deux nuages de points, après qu'un recalage approximatif initial a déjà été fait. Parmi les deux nuages de points pris comme entrée, l'un (*cible*) reste fixé, tandis que l'autre (*source*) est transformé par translation et rotation. L'algorithme procède en itérativement raffinant la transformation à chaque étape, de manière à ce que la distance entre les deux nuages de points soit minimisée.

Plus précisément, pour tout point s_i de l'ensemble *source*, on choisit un point c_i de l'ensemble *cible* pour lequel on estime qu'il représente plus au moins la même position dans le nuage de points. Comme les deux nuages de points sont déjà recalés approximativement, une méthode courante est de choisir le point le plus proche, avec la transformation actuelle. L'algorithme nécessite donc que les densités de points des deux ensembles sont similaires. Ensuite une transformation est appliquée aux points s_i qui minimise une métrique de l'erreur de recalage.

La *cible* ne doit pas forcément être donnée sous forme de nuage de points, mais peut par exemple être une surface mathématique continue donnée sous forme paramétrique $(x(\vec{t}), y(\vec{t}), z(\vec{t}))$ ou implicite $g(x, y, z) = 0$. On peut alors calculer numériquement les coordonnées d'un point c_i correspondant à chaque point s_i . [Besl & McKay, 1992]

Quand les vecteurs normaux sur la cible sont connus, il est possible d'utiliser une variante *point-to-plane*¹² : Au lieu de minimiser une métrique des distances entre deux points, les écarts entre les points source et les plans tangents aux points cible sont minimisés. Cette méthode a généralement une vitesse de convergence supérieure et peut mener à des meilleurs résultats. Les algorithmes utilisés à chaque itération pour calculer la minimisation ont cependant un coût numérique plus élevé. L'ICP *point-to-plane* est une alternative intéressante puisque les surfaces des objets scannés sont souvent localement planaires. [Low, 2004]

Plusieurs variantes de l'algorithme ont été développées qui se distinguent par le choix des couples de points, des poids associés aux couples, le rejet de certains couples, et la façon comment la métrique d'erreur est définie et minimisée. [Rusinkiewicz & Levoy, 2001] donne un comparatif de différentes possibilités sur des jeux de données artificielles.

Pour la minimisation, on doit calculer une transformation rigide (généralement translation et rotation, donc 6 degrés de liberté) transforme les points s_i . Il existe plusieurs méthodes déterministes qui ne nécessitent pas de prendre plusieurs échantillons dans l'espace des transformations rigides. Pour le calcul de la rotation on peut par exemple utiliser la décomposition en valeurs singulières, une représentation sous forme de matrice orthonormale ou sous forme de quaternion. [Horn, 1987]

En général, un algorithme ICP procède selon les étapes suivantes :

1. Sélectionner des sous-ensembles de points s_i et c_i à utiliser (possiblement tous les points).
2. Former les couples (s_i, c_i) .
3. Associer des poids aux couples. (optionnel)
4. Rejeter certains couples. (optionnel)

11. itératif point le plus proche

12. au lieu de *point-to-point*

5. Calculer une métrique d'erreur à partir des couples. Par exemple $\sum_i \| s_i - c_i \|^2$.
6. Appliquer une transformation rigide aux points s_i qui minimise l'erreur.
7. Si l'erreur est inférieur à une valeur de seuil donnée, arrêter. Sinon, continuer avec 1 ou 2.

2.4.1 Calcul de la transformation par quaternions

Une manière de calculer la translation et rotation qui est appliquée à chaque itération à l'ensemble de points *source* est décrite dans [Besl & McKay, 1992] et [Horn, 1987]. La procédure prend uniquement les n couples de points (\vec{s}_i, \vec{c}_i) comme entrée, où \vec{c}_i est un point de l'ensemble *cible* C , et \vec{s}_i un point de l'ensemble *source* S . On suppose que les transformations données par les itérations précédentes ont déjà été appliquées aux points s_i . La méthode reste valable pour tout choix de points.

Le but est de trouver \vec{q}_T et \dot{q}_R qui minimisent le carré des distances des couples $f(\vec{q})$.

$$f(\vec{q}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| \vec{c}_i - \mathbf{R}\vec{s}_i - \vec{q}_T \|^2$$

$\vec{q}_T = (q_4 q_5 q_6)^T$ donne la translation, et \mathbf{R} la matrice de rotation 3×3 .

On cherche une transformation de la forme $\vec{t}' = \mathbf{R}(\vec{s}) + \vec{q}_T$, donc une rotation, suivie par une translation à appliquer aux points s_i , qui minimise les distances des points transformés t_i aux points c_i correspondants dans le nuage de points *cible*. Car on ne peut pas assumer que les deux nuages S et C auront exactement la même distribution de points, les erreurs $e_i = \vec{c}_i - \vec{t}_i$ ne peuvent en général pas tous devenir 0. On minimise la somme des carrés des erreurs $\sum \|e_i\|^2$. Le développement décrit en [Horn, 1987] inclut aussi un facteur de redimensionnement, mais pour ICP on suppose généralement que les deux nuages de points ont déjà la même échelle. Un redimensionnement durant les itérations introduirait des problèmes avec le choix des couples de points.

Pour le développement suivant, on prend les coordonnées des points \vec{s}_i et \vec{c}_i , relativement aux centres de masse des ensembles. On définit

$$\vec{\mu}_s = \frac{1}{n} \sum_i \vec{s}_i \quad \text{et} \quad \vec{\mu}_c = \frac{1}{n} \sum_i \vec{c}_i$$

Et pour tout i , on pose $\vec{s}'_i = \vec{s}_i - \vec{\mu}_s$ et $\vec{c}'_i = \vec{c}_i - \vec{\mu}_c$. Donc $\sum \vec{s}'_i = 0$ et $\sum \vec{c}'_i = 0$. L'erreur e_i peut être réécrit comme $e_i = \vec{c}'_i - \vec{t}'_i = \vec{c}'_i - \mathbf{R}(\vec{s}'_i) - \vec{q}'_T$. On peut montrer que la somme des carrés des erreurs sera minimale quand $\vec{q}'_T = 0$, et donc la translation à appliquer correspondra à $\vec{q}_T = \vec{q}'_T - \mathbf{R}(\vec{\mu}_s)$:

En fait, on a que $\vec{q}'_T = \vec{q}_T - \vec{\mu}_c + \mathbf{R}(\vec{\mu}_s)$. La somme des carrés peut être développée en

$$\sum_{i=1}^n \| \vec{c}'_i - \mathbf{R}(\vec{s}'_i) \|^2 - 2\vec{q}'_T \sum_{i=1}^n (\vec{c}'_i - \mathbf{R}(\vec{s}'_i)) + n\|\vec{q}'_T\|^2$$

Le second terme sera toujours 0 puisque les coordonnées sont pris relatifs aux centres de masse. Le premier ne dépend pas de \vec{q}'_T . Donc l'expression est minimisée par $\vec{q}'_T = 0 \iff \vec{q}_T = \vec{\mu}_c - \mathbf{R}(\vec{\mu}_s)$.

Pour trouver la rotation \mathbf{R} , on maximise

$$\sum_{i=1}^n \vec{c}'_i \cdot \mathbf{R}(\vec{s}'_i)$$

En effet, le produit scalaire de deux vecteurs est maximal quand ils ont la même direction. On cherche la rotation sous forme d'un quaternion \dot{q}_R .¹³

Une rotation peut être encodée dans un quaternion unitaire, c'est à dire pour lequel $q_0 \geq 0$ et $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$. \dot{q} est purement imaginaire si $q_0 = 0$. (Les trois autres composants peuvent être considérés

13. Une matrice de rotation \mathbf{R} peut en être déduite à partir d'un quaternion $\dot{q} = (q_0 q_1 q_2 q_3)^T$ par la formule

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix}$$

comme termes imaginaires comme chez les nombres complexes.) On représente un vecteur sous forme de quaternion purement imaginaire, en mettant ses coordonnées dans q_1, q_2, q_3 . On peut montrer que si \dot{s} est purement imaginaire et \dot{q}_R est unitaire, alors $\dot{q}_R \dot{s} \dot{q}_R^*$ reste purement imaginaire, et peut donc représenter une opération sur un vecteur. \dot{q}_R^* est le conjugué de \dot{q}_R .

[Horn, 1987] montre qu'en utilisant les propriétés des quaternions, on peut former à partir des ensembles de points \vec{s}_i et \vec{c}_i une matrice symétrique $4 \times 4 \mathbf{N}$ telle que

$$\sum_{i=1}^n \vec{c}'_i \cdot \mathbf{R}(\vec{s}'_i) = \sum_{i=1}^n \vec{c}'_i \cdot (\dot{q}_R \dot{s}'_i \dot{q}_R^*) = \dot{q}_R \mathbf{N} \dot{q}_R^*$$

Il est aussi montré que le quaternion unitaire \dot{q}_R qui maximise l'expression est le vecteur propre correspondant à la valeur propre la plus grande de \mathbf{N} . Le calcul des valeurs propres nécessite la résolution d'une équation polynomiale du quatrième degré. Il existe des solutions de forme fermée pour ce problème.

Donc, cette méthode permet de déterminer la rotation et translation à appliquer à \mathbf{M} par une série de calculs, sans passer par des méthodes approximatives.

2.4.2 Version simultanée de l'ICP

Une approche qui permet de faire un recalage ICP *simultané* de plusieurs nuages de points en utilisant l'analyse procustéenne généralisée est décrite dans [Toldo *et al.*, 2010].

Comme montré dans la section 2.2.3, une solution du problème GPA est l'aligner les nuages de points à une *cible* \mathbf{K} générée artificiellement à partir de tous les nuages de points, au lieu de les aligner à un autre nuage de points donné comme entrée. Ceci est appliqué pour rendre l'ICP *simultané*, de manière à ce qu'il n'y a pas d'erreur qui s'accumule.

Pour le choix des tuples $(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{k,i})$, l'article propose de choisir des tuples dans lesquelles tous les paires de points sont *mutuellement voisins les plus proches*. Deux points $\vec{a} \in A$ et $\vec{b} \in B$ sont considérés mutuellement voisins les plus proches si \vec{a} est le point le plus proche à \vec{b} dans A , et \vec{b} est le point le plus proche de \vec{a} dans B . On forme un graphe ayant comme sommets les points de tous les nuages, et les couples de sommets qui remplissent cette conditions sont connectés par des arcs. Les tuples à choisir correspondent aux sous-ensembles indépendants dans ce graphe. Une solution de GPA est donnée dans l'article qui fonctionne aussi si les tuples ne sont pas toujours complets (donc pour certains nuages de points il n'ont pas de point correspondant), et inclut la possibilité d'associer des poids aux tuples. Cela est nécessaire parce que pour en grand nombre de nuages de points à recaler, il n'y aura dans la plupart des cas seulement relativement peu de tuples complets.

La version initiale de la cible \mathbf{K} est formée par les centroids des tuples. L'algorithme GPA-ICP peut alors être formulé comme suit : [Toldo *et al.*, 2010]

Entrée : n nuages de points p_i

Sortie : n matrices de transformation \mathbf{M}_i

1. Initialiser \mathbf{M}_i par matrices d'identité
2. Trouver les tuples de points correspondants
3. Former la cible \mathbf{K} à partir des centroids des tuples
4. Estimer par GPA les transformations rigides qui alignent $\{p_i\}$ à la cible
5. Appliquer ces transformations aux points $\{p_i\}$, et ajouter les aux matrices \mathbf{M}_i
6. Répéter depuis 2, jusqu'à ce que \mathbf{K} est stabilisé (ou un nombre limite d'itérations a été dépassé)

Après l'exécution de cet algorithme, les n nuages de points sont recalés dans un repère commun qui n'est pas spécifié d'avance. Donc un recalage complémentaire est nécessaire pour mettre le nuage fusionné dans le repère désiré.

2.4.3 ICP généralisé

Pour ce mémoire, il sera nécessaire de trouver des méthodes qui permettent de recaler des nuages de points à densités de points différents. Une version *généralisée* du ICP est développée dans [Segal *et al.*, 2009] :

On prend en compte que les nuages de points ne sont qu'une approximation des surfaces scannées, et on représente l'aspect de ces surfaces sous-jacentes via un modèle probabilistique.

Pour cet algorithme, l'étape de minimisation est altérée. Les autres étapes (choix des couples de points, etc.) peuvent toujours être implémentés via les différentes variantes proposées. On suppose qu'il existe des nuages de points $\hat{S} = \{\hat{s}_i\}$ et $\hat{C} = \{\hat{c}_i\}$ sous-jacents aux nuages de points source S et cible C donnés, qui sont tels qu'il existe une matrice de transformation rigide \mathbf{M}^* qui recalcule parfaitement \hat{S} et \hat{C} . Donc $\hat{c}_i = \mathbf{M}^* \hat{s}_i$ pour tout i . \hat{S} et \hat{C} constituent une version idéalisée de la représentation de la surface par nuage de points. Avec S et C , un recalage parfait n'est généralement pas faisable.

On suppose aussi que les points de S et C sont des variables aléatoires tirées de \hat{S} et \hat{C} par une loi normale multidimensionnelle

$$s_i \sim \mathcal{N}(\hat{s}_i, \mathbf{C}_i^S) \quad \text{et} \quad c_i \sim \mathcal{N}(\hat{c}_i, \mathbf{C}_i^C)$$

où \mathbf{C}_i^S et \mathbf{C}_i^C sont des matrices de variance-covariance qu'on associe à chaque point de S et C . Ces matrices vont être paramétrisées pour décrire la surface autour de \hat{s}_i respectivement \hat{c}_i . Ils représentent la distribution de probabilité des positions de s_i et c_i .

La distance entre deux points pour une matrice de transformation \mathbf{M} est donnée par $d_i^{(\mathbf{M})} = c_i - \mathbf{M} s_i$. Le but sera de trouver \mathbf{M} qui minimise $\sum_i \|d_i^{(\mathbf{M})}\|^2$. Dans ce modèle, les $d_i^{(\mathbf{M})}$ sont eux-mêmes des variables aléatoires. Vu que a_i et b_i sont tirés d'une loi normale multidimensionnelle, la distribution de $d_i^{(\mathbf{M})}$ est

$$d_i^{(\mathbf{M})} \sim \mathcal{N}(\hat{c}_i - \mathbf{M} \hat{s}_i, \mathbf{C}_i^C + \mathbf{M} \mathbf{C}_i^S \mathbf{M}^T)$$

Par conséquent,

$$d_i^{(\mathbf{M}^*)} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{C}_i^C + (\mathbf{M}^*) \mathbf{C}_i^S (\mathbf{M}^*)^T)$$

La méthode d'estimation du maximum de vraisemblance est utilisée dont le principe est le suivant : On a n échantillons x_1, \dots, x_n issus d'une variable aléatoire X , et on cherche la fonction de densité $f^{(\theta^*)}$ de probabilité associée à X , en sachant qu'elle appartient à une famille de fonctions de densité de probabilité, paramétrisée par θ . Quand X est discrète, la fonction de masse $p^{(\theta^*)}$ est utilisée. Donc on calcule une estimation de θ^* à partir de x_1, \dots, x_n et f . Pour une valeur du paramètre θ donnée, et on supposant que les échantillons sont mutuellement indépendants, la *fonction de vraisemblance* peut être calculée par

$$L(\theta; x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f^{(\theta)}(x_i)$$

Une estimation de θ^* peut alors être trouvée en maximisant L :

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} L(\theta; x_1, \dots, x_n)$$

On considère que $d_i^{(\mathbf{M})}$ sont des échantillons. En fixant \mathbf{C}_i^S et \mathbf{C}_i^C , la fonction de masse des échantillons $p^{\mathbf{M}}$ peut être calculée avec \mathbf{M} comme seule inconnue. Par une application récursive de l'estimation du maximum de vraisemblance, une valeur pour \mathbf{M} pourra être trouvée :

$$\mathbf{M} = \arg \max_{\mathbf{M}} \prod_{i=1}^n p^{\mathbf{M}}(d_i^{(\mathbf{M})}) = \arg \max_{\mathbf{M}} \sum_{i=1}^n \log(p^{\mathbf{M}}(d_i^{(\mathbf{M})}))$$

La somme des logarithmes peut être maximisée au lieu parce que la fonction \log est strictement croissante.

En utilisant 2.4.3, la formule peut être simplifiée en

$$\mathbf{M} = \arg \min_{\mathbf{M}} \sum_{i=1}^n (d_i^{(\mathbf{M})})^T (\mathbf{C}_i^C + \mathbf{M} \mathbf{C}_i^S \mathbf{M}^T)^{-1} d_i^{(\mathbf{M})}$$

C'est cela qui constitue l'amélioration du ICP généralisé par rapport au ICP standard : Au lieu de minimiser la métrique d'erreur $\sum_i \|d_i^{(\mathbf{M})}\|$, on minimise $\sum_i (d_i^{(\mathbf{M})})^T (\mathbf{C}_i^C + \mathbf{M} \mathbf{C}_i^S \mathbf{M}^T)^{-1} d_i^{(\mathbf{M})}$. On le recalcule plus directement les points S et P , mais une estimation des surfaces sous-jacentes. Les surfaces à

recaler sont les mêmes (vu de différentes perspectives), mais les points S et P ne représentent en général pas exactement les mêmes positions sur la surface, contrairement aux “vrais” points \hat{S} et \hat{P} . Par cette méthode, on ne suppose plus cela, mais plutôt on introduit une incertitude sur la position des points donnés par rapport aux vrais points, qui est décrite par les matrices de variance-covariance \mathbf{C}_i^S et \mathbf{C}_i^C . Donc l’algorithme correspond à une approche *plane-to-plane* de l’ICP, augmentée par une distribution de probabilité sur les plans.

Pour un point avec le premier vecteur directeur du repère orthonormal comme vecteur normal, la matrice

$$\begin{bmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec ϵ un petit nombre, indique une grande certitude sur la position du point le long de la direction du vecteur normal, mais une petite certitude sur la position du point dans le plan tangent. Comme la surface est souvent localement planaire, ce plan est une approximation de la surface. Soit \mathbf{R}_{s_i} et \mathbf{R}_{c_i} les matrices de changement de base de ce dernier repère, vers un repère dont le premier vecteur directeur est le vecteur normal du point s_i respectivement c_i , sans translation. \mathbf{C}_i^S et \mathbf{C}_i^C peuvent maintenant être calculées par

$$\mathbf{C}_i^S = \mathbf{R}_{s_i} \begin{bmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}_{s_i}^T \quad \text{et} \quad \mathbf{C}_i^C = \mathbf{R}_{c_i} \begin{bmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}_{c_i}^T \quad (2.2)$$

Il a été expérimentalement montré que la méthode génère des résultats supérieurs au ICP standard. [Segal *et al.*, 2009] Cependant, elle suppose que les surfaces sont localement planaires, et que \mathbf{C}_i^S et \mathbf{C}_i^C donnent une bonne estimation de la forme de la surface.

L’article [Holz & Behnke, 2014] présente une manière de calculer les vecteurs normaux (et donc les matrices via 2.2), dans le contexte de nuages de points à densités non-uniformes pris par un scanner 3D composé d’un télémètre laser 2D tournant. Le télémètre capture seulement des *scan lines* 2D, c’est à dire des valeurs de profondeur de points dans un plan (vertical) sortant du scanner, et non pas dans un champ de vision tridimensionnel. Durant les rotations, plusieurs scan lines sont pris dans différents angles. La distance de points voisins en direction horizontale (donc provenant de deux scan lines) sera plus grande que celle en direction verticale, sur une même scan line.

Il ne suffit donc plus de comparer les points voisins pour avoir une estimation du vecteur normal. La méthode proposée procède en créant un maillage à quadrillatères, formée par points voisins sur une scan line, connectés avec les deux points correspondants de la scan line voisine. Ces derniers points ne seraient pas inclus par une recherche classique de points voisins les plus proches. Après filtrage du maillage, les normales sont maintenant estimées en considérant les points adjacents sur le maillage, pour un rayon de recherche donné.

2.5 4-Points Congruent Sets

La méthode 4-Points Congruent Sets¹⁴ (4PCS) est une approche qui permet de recalier deux nuages de points avec du bruit (i.e. outliers), relativement peu d’information commune, et sans avoir besoin d’un recalage initial. Elle est basée sur une variante du RANSAC appliquée sur des échantillons bien choisis.

Le principe de RANSAC est de trouver par recherche aléatoire un nombre minimal d’échantillons à partir desquelles une approximation assez bonne d’un modèle peut être trouvée, et puis de raffiner cette approximation en utilisant uniquement les échantillons (inliers) assez proches. Pour le problème du recalage de deux nuages de points S et C , le modèle à chercher est une matrice de transformation \mathbf{M} qui recalcule assez bien les deux nuages. Une telle matrice peut être univoquement définie par deux triplets de points sans les repères de S et C respectivement. Une méthode pour en déduire \mathbf{M} est donnée en [Horn, 1987]. \mathbf{M} représente le recalage correct si les points des deux triplets représentent toujours les mêmes positions dans les deux nuages de points.

Une manière d’appliquer RANSAC est donc de choisir comme échantillons aléatoirement ces deux triplets de points, et de calculer et vérifier les matrices de transformation correspondantes. Le consensus

14. ensembles congruents de 4-points

set est l'ensemble de points de $s \in S$ pour lesquels $\min_{c \in C} \|s - c\| < \epsilon$. On peut raffiner le recalage par exemple avec ICP. La plupart de ces échantillons ne formeront pas un recalage correct. Une telle méthode aurait une complexité d'au moins $O(n^3 \log n)$. Pour la rendre utilisable, il faut donc altérer la façon de choisir des échantillons.

La méthode 4PCS utilise comme échantillon deux 4-points (i.e. quadruples de points) pris de S et de C . Ceci permettra d'arriver à une complexité quadratique au lieu de cubique. A partir de S , on choisit aléatoirement quatre points qui sont coplanaires. Ces quatre points sont appelés la *base*. En pratique, une coplanarité approximative est suffisante. Pour le deuxième quadruple, on choisit ceux qui sont congruents avec le premier, c'est à dire que le premier peut être transformé en le deuxième par une transformation rigide. L'algorithme fonctionne selon la procédure suivante :

1. Sélectionner aléatoirement base \vec{b} (quadruple de points coplanaires) de S .
2. Trouver l'ensemble U des quadruples congruents à la base.
3. Pour tout $\vec{u}_i \in U$, calculer la matrice de transformation \mathbf{M}_i qui aligne \vec{u}_i à \vec{b} . La solution à forme fermée développée en 2.4.1 peut être utilisée pour aligner deux ensembles de 4 points. Le consensus set $S_i \cup S$ est formé par les points de la source qui sont après la transformation \mathbf{M}_i assez bien recalés à la cible :

$$S_i = \{s \in S : \min_{c \in C} \|c - \mathbf{M}_i s\| < \delta\}$$

4. On retient le consensus set S_k et la matrice de transformation \mathbf{M}_k correspondante pour lequel $|S_i|$ était maximal. \mathbf{M}_k correspond à la meilleure transformation qui a pu être trouvée avec la base \vec{b} .
5. Un compteur est incrémenté. S'il n'a pas encore dépassé un nombre fixé L , on continue avec l'étape 1. Sinon, l'algorithme se termine. A la fin on garde la matrice \mathbf{M}_k pour laquelle $|S_k|$ était maximal.

L'opération fondamentale de l'algorithme est la recherche des quadruplets $\vec{u} = (\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3, \vec{u}_4)$ congruents à une base $\vec{b} = (\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3, \vec{b}_4)$ donnée. Les points de la base sont coplanaires, par définition. Il y aura toujours deux paires dans la base qui forment des droites qui s'intersectent. Sans perte de généralité, soit $\vec{u}_1 \vec{u}_2$ et $\vec{u}_3 \vec{u}_4$ ces droites, et \vec{e} leur point d'intersection. Il a été montré que les deux nombres

$$r_1 = \frac{\|\vec{u}_1 - \vec{e}\|}{\|\vec{u}_1 - \vec{u}_2\|} \quad \text{et} \quad r_2 = \frac{\|\vec{u}_3 - \vec{e}\|}{\|\vec{u}_3 - \vec{u}_4\|}$$

sont invariants par rapport à la transformation affine de \vec{b} . De plus, ils changent toujours quand une transformation non-affine est appliquée. Donc pour trouver des candidats pour \vec{u} , il suffit de chercher les quadruplets qui produisent les mêmes valeurs r_1 et r_2 .

On considère tous des paires de points $(\vec{s}_1, \vec{s}_2) \in S$, on faisant l'hypothèse qu'ils appartiennent à un des quadruplets \vec{u} cherchés, et qu'ils sont congruents à soit (\vec{b}_1, \vec{b}_2) ou (\vec{b}_3, \vec{b}_4) . Donc ils forment une des droites qui passent par leur équivalent de \vec{e} . Des paires sont cherchés dans les deux ordres, c'est à dire on considère (\vec{s}_1, \vec{s}_2) et (\vec{s}_2, \vec{s}_1) séparément. Puisqu'on ne sait pas quelles des deux droites ils représentent, il y a deux possibilités \vec{e}_1 et \vec{e}_2 pour la position du point d'intersection de ce quadruple :

$$\vec{e}_1 = \vec{s}_1 = r_1 (\vec{s}_2 - \vec{s}_1) \quad \text{ou} \quad \vec{e}_2 = \vec{s}_1 = r_2 (\vec{s}_2 - \vec{s}_1)$$

Si deux paires de points (\vec{s}_1', \vec{s}_2') et $(\vec{s}_1'', \vec{s}_2'')$ ont pu être trouvés tels que $\vec{e}_1' = \vec{e}_2''$, alors il est probable qu'ils forment un des quadruplets congruents recherchés.

L'algorithme procède par filtrer les quadruplets qui ne sont pas congruents avec la base. Dans l'implémentation donnée par [Aiger *et al.*, 2008], l'algorithme considère seulement les paires (\vec{s}_1, \vec{s}_2) dont la distance correspond approximativement à $\|\vec{b}_1 - \vec{b}_2\|$ ou $\|\vec{b}_3 - \vec{b}_4\|$. Les points \vec{e} sont mis sur une structure *range tree*, ce qui permet de trouver des partenaires coïncidents e' de façon efficace. La procédure a une complexité dans $O(n^2 + k)$, où k est le nombre de quadruplets \vec{u} qui seront trouvés. (L'algorithme est *output-sensitive*.)

Pour choisir une base \vec{b} , l'algorithme choisit d'abord aléatoirement trois points de C . On préfère des points à distance plutôt élevée, afin que la base ne soit pas perturbé par des imprécisions locales. Cependant elle ne doit pas être plus grande que la zone commune des deux nuages de points. On cherche ensuite le quatrième point de manière à ce qu'il soit coplanaire avec les trois autres.

2.6 Normal Distributions Transform

Dans le contexte de la robotique, la méthode NDT¹⁵ a été développée pour aligner deux nuages de points 2D qui représentent les distances d'objets autour d'un robot mobile qui déplace sur un plan horizontal. [Biber, 2003] Ce recalage permet de construire une carte 2D des environs du robot, qui consiste en une translation 2D et une rotation sur une axe, dénotées par les paramètres $\theta = (t_x, t_y, \phi)$. La méthode est par exemple utilisée pour mesurer la position précise du robot en partant par une estimation calculée par des données odométriques.

L'idée est d'au lieu de recaler directement des points comme ICP, on recalcule leur *transformée en distribution normale*, une représentation continue et dérivable du nuage de points par morceaux qui consiste en la distribution de probabilité qu'un point soit à une position. La NDT est calculée à partir d'un nuage de points cible $C = \{\vec{c}_i\}$ de manière suivante. On commence par subdiviser l'espace 2D en une grille régulière avec une taille donnée des cellules. Soit C_j l'ensemble des points qui se trouvent dans la cellule j . Pour tous les cellules qui contiennent au moins 3 points, on peut modéliser la probabilité $p(\vec{x})$ d'y trouver un point à la position \vec{x} :

Soit $\vec{\mu}_j = \frac{1}{n_j} \sum_i \vec{c}_{j,i}$ la moyenne des points dans la cellule. La matrice de variance-covariance qui représente la distribution des points C_j est calculée par $\mathbf{C}_j = \frac{1}{n_j-1} \sum_i (\vec{c}_{j,i} - \vec{\mu}_j)(\vec{c}_{j,i} - \vec{\mu}_j)^T$. La matrice exprime une distribution de Gauss en deux dimensions, ajusté sur la distribution des points. $p(\vec{x})$ peut être calculé par la fonction caractéristique :

$$p(\vec{x}) = \exp \left(-\frac{(\vec{x} - \vec{\mu}_j)^T \Sigma^{-1} (\vec{x} - \vec{\mu}_j)}{2} \right)$$

Figure 2.2 montre un exemple de NDT avec différentes tailles de cellules, créés à partir du nuage de points 2D à la gauche.

Similairement au ICP, l'algorithme procède en raffinant itérativement une estimation de la transformation (t_x, t_y, ϕ) cherchée. La fonction de transformation T est exprimée par

$$T_\theta : \vec{p} \mapsto \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$$

Les étapes de l'algorithme pour recaler une nuage de points source S à un nuage de points cible C sont les suivantes :

1. Créer la NDT pour C , et initialiser une estimation des paramètres de recalage $\theta = (t_x, t_y, \phi)$ (possiblement en utilisant des données odométriques enregistrées par le robot).
2. Mettre les points S dans le repère de C , en appliquant la transformation T_θ .
3. Pour tous les points transformés $\vec{s}'_i = T(\vec{s}_i)$, trouver sa cellule j et les \mathbf{C}_j , $\vec{\mu}_j$ correspondants.
4. On sait que $p(\vec{x})$ exprime la probabilité qu'un point de C se trouve à la position \vec{x} . La somme $\sum_i p(\vec{x}_i)$ est donc maximale si les \vec{x}_i représentent tous des positions de points, par exemple si $\{x_i\} = C$, donc si le recalage est parfait. L'algorithme va donc maximiser une fonction *score* des paramètres θ donnée par

$$\text{score}(\theta) = \sum_i \exp \left(-\frac{(\vec{s}'_i - \vec{\mu}_j)^T \mathbf{C}_j^{-1} (\vec{s}'_i - \vec{\mu}_j)}{2} \right)$$

5. Calculer des nouveaux paramètres de transformation θ par maximisation de la fonction *score*.
6. Tant que le recalage n'est pas encore assez bon, répéter avec l'étape 2.

Comme montré dans la section 2.2.2, on peut utiliser la méthode de Newton multidimensionnelle pour ce problème de maximisation : On minimise la fonction opposée $-\text{score}$. Puisqu'il y a trois paramètres (t_x, t_y, ϕ) et la fonction *score* calcule un réel, on est dans le cas $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$. Pour chaque itération de l'algorithme de Newton on résout le système

$$[\mathbf{H} \text{score}(\theta)] \Delta \theta = \nabla \text{score}(\theta)$$

15. transformée en distribution normale



FIGURE 2.1 – Scanner LIDAR. Copié de [Wikipedia, 2014].

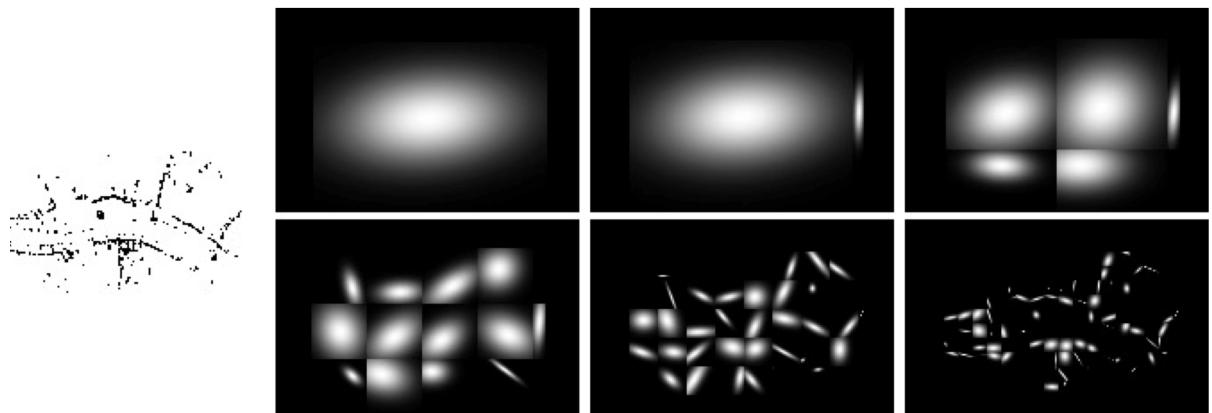


FIGURE 2.2 – Exemple exemple de NDT avec différentes tailles de cellules. Copié de [Dold *et al.* , 2007].

en utilisant la définition de la fonction *score*.

Une façon simple d'étendre la méthode NDT pour utilisation avec des nuages de points 3D, mais toujours avec des transformations qui restent sur un plan horizontal, est décrite en [Dold *et al.*, 2007]. On extrait à partir des nuages de points 3D source et cible plusieurs couches horizontales 2D à différentes hauteurs (voir figure 2.3). Le recalage NDT est fait sur toutes ces sous-nuages 2D en même temps, en utilisant toujours la même grille de cellules. Pour la fonction *score*, on prend la somme des différentes fonctions *score* appartenant aux sous-nuages.

2.7 Extended Gaussian Images

Si on cherche à recaler des nuages de points seulement au niveau de la rotation, sans avoir une estimation initiale du recalage, une possibilité intéressante pourrait être d'utiliser leur Extended Gaussian Images¹⁶ (EGI).

On commence par segmentiser les nuages de points en différentes surfaces planaires, pour lesquelles on calcule le vecteur normal. On disposera donc pour chaque nuage de point d'un ensemble de vecteurs normaux, qui peuvent être décrits par des coordonnées sphériques (θ, ϕ) . L'idée est de trouver une rotation 3D qui recalcule ces ensembles $\{(\theta_i, \phi_i)\}$, sachant que les angles sont modulo 2π .

Cette projection des vecteurs normaux d'un objet sur une sphère unitaire est appelée l'Extended Gaussian Image de l'objet. [Horn, 1984] Il a été montré que pour des objets convexes, l'EGI décrit univoquement l'objet, malgré la perte d'information. Des méthodes existent pour reconstruire un polyèdre convexe à partir de son EGI. Évidemment, l'EGI est invariant par rapport à une translation de l'objet, et par rapport à son échelle.

Pour pouvoir représenter un EGI numériquement, la surface de la sphère sera divisée en des petites cellules, et pour chacune d'elles on compte le nombre de normales $\vec{n} = (\theta, \phi)$ qui tombent dans cette cellule. Ce problème n'est pas évident puisqu'on essaye de passer d'une topologie sphérique à une sérialisation numérique. Un bon pavage de la sphère satisfirait les conditions suivantes :

- Les cellules ont les mêmes formes, les mêmes aires, et des formes régulières compactes
- La division doit être assez fine pour produire une bonne résolution angulaire
- Il y a des rotations avec lesquelles des cellules avant et après la rotation coïncideront

Un exemple d'un EGI généré à partir d'un nuage de points est montré en figure fig:egi.

Une manière simple est de diviser la sphère dans des intervalles de longitude et de latitude (voir figure ??). Ce pavage peut être rendu arbitrairement fin, mais les cellules n'auront pas la même taille. Proche aux pôles, ils deviendront plus petits à cause de la convergence des méridiens. On pourrait améliorer le pavage en variant les intervalles. Aussi avec cette méthode, seulement les rotations autour de l'axe du globe peuvent faire coïncider les cellules. Pour arriver à des cellules de mêmes formes et aires, la sphère peut au lieu être approximée par un solide de Platon. Celui avec le plus de faces est l'icosaèdre régulier, ayant 20 faces triangulaires, ce qui est beaucoup trop peu pour un recalage précis.

Comme compromis, une possibilité est de commencer avec un dodécaèdre régulier (12 faces pentagonales), et de subdiviser ses faces en cinq triangles égaux pour obtenir un *pentakis dodecahedron* ayant 60 faces triangulaires avec la même aire. La subdivision peut ensuite être raffinée jusqu'au niveau désiré par la *division géodésique* : On divise uniformément les côtés de chaque triangle (faces) en f sections. Après avoir appliqué une triangulation, chaque ancienne face a maintenant été subdivisée en f^2 nouvelles faces triangulaires. Figure 2.6 montre un exemple d'un tel pavage.

Lors de la création de la représentation numérique, le test suivant peut être utilisé pour vérifier si un vecteur normal \vec{n} appartient à la cellule triangulaire avec les sommets $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$, tous donnés en coordonnées cartésiennes 3D : On calcule

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1,x} & v_{2,x} & v_{3,x} \\ v_{1,y} & v_{2,y} & v_{3,y} \\ v_{1,z} & v_{2,z} & v_{3,z} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$$

Si $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ sont tous positifs, alors \vec{n} appartient à cette cellule.

16. Image gaussienne étendue

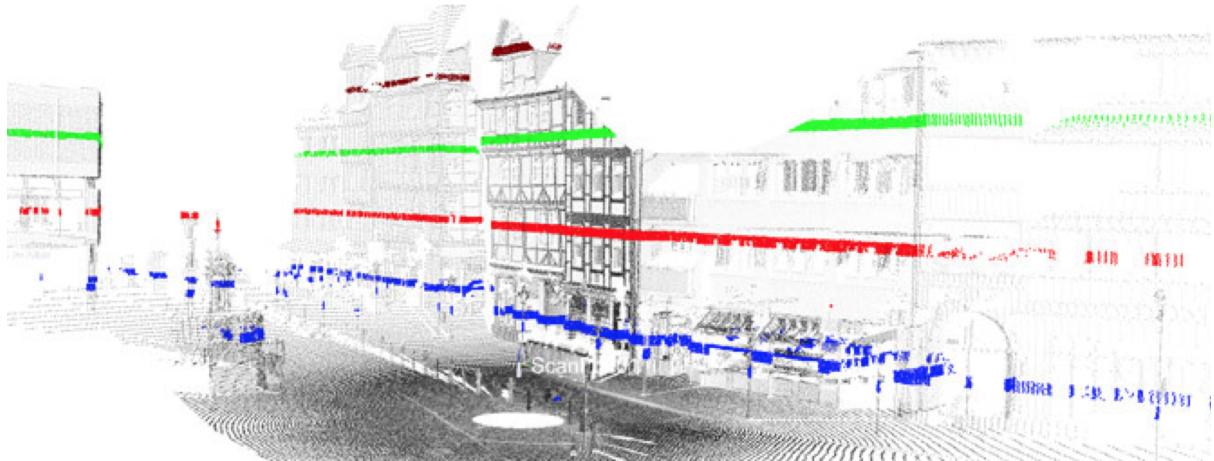


FIGURE 2.3 – Nuages de points pour différentes couches de hauteur. Copié de [Dold *et al.*, 2007].

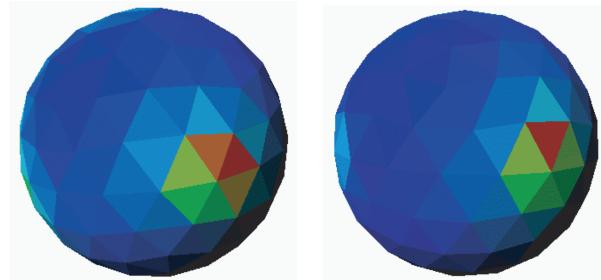


FIGURE 2.4 – EGIs générés à partie de deux nuages de points à recaler. Les couleurs des faces indiquent le nombre de vecteur normaux associés à cette face. Copié de [Dold, 2005].

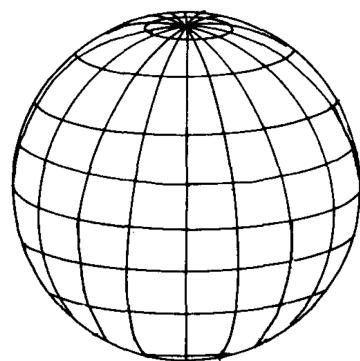


FIGURE 2.5 – Pavage d'une sphère en intervalles de longitude et latitude. Copié de [Horn, 1984].

2.7.1 Application sur le recalage de nuages de points

L'article [Dold, 2005] décrit une implémentation d'un recalage de la rotation de deux nuages de points en utilisant les EGI. L'algorithme utilise plusieurs EGI à différents niveaux de pavage. On commence par un recalage brut en utilisant des EGIs avec un petit nombre de faces, puis on raffine itérativement la solution moyennant des EGI plus fins. Les EGI sont construits tel que le premier niveau de pavage produit 20 faces, et le deuxième en produit 80. Donc une solution approximative pourra être trouvée rapidement.

Une rotation 3D peut être représenté par 3 angles d'Euler (ω, ϕ, κ) , donc il y a degrés niveaux de liberté pour le recalage, tous modulo 2π .¹⁷ Pour la première itération, tous les triplets possibles sont considérées comme solution potentielles. Durant les itérations qui suivent, on n'essaye plus que des angles de rotations dans un certain rayon autour de l'ancienne solution trouvée, qui diminue progressivement, avec la taille d'incrément des triplets à tester.

Durant chaque test, tous les vecteurs normaux $\{\vec{n}\}$ issus du nuage de points source sont transformés et l'EGI du niveau actuel en est créé. La représentation numérique de cet EGI est alors comparée avec celle du EGI de même niveau du nuage de points cible. Le problème principal est de définir la méthode selon laquelle la correspondance de deux représentations est évaluée. Soit $N_S(i)$ respectivement $N_C(i)$ les ensembles de vecteurs normaux associés à la i -ième face du EGI source ou cible. Trois mesures sont présentées dans l'article :

- Somme des différences absolues : $\sum_i |\|N_S(i)\| - \|N_C(i)\||$
- Somme des carrés des différences : $\sum_i (\|N_S(i)\| - \|N_C(i)\|)^2$
- En considérant N_S et N_C en tant que variables aléatoires, leur corrélation : $\frac{\text{cov}(N_S, N_C)}{\|N_S\| \|N_C\|}$

Il est montré expérimentalement que ces dernières mesures peuvent donner de bons résultats. Pour la somme des différences absolues, les résultats se rapprochent trop pour des niveaux de pavage élevés. L'article propose aussi d'inclure l'aire des surfaces planaires des nuages de points, en tant que pondération pour les vecteur normaux.

2.8 Photogrammétrie

La photogrammétrie peut être définie comme la science d'extraire algorithmiquement des informations sur un environnement tridimensionnel à partir de photos. En particulier, une opération photogrammétrique fondamentale est de retrouver les positions 3D correspondantes à des points 2D sur la photo.

Trois systèmes de coordonnées vont intervenir : Le *repère objet* 3D avec lequel on définit des positions dans l'espace, le *repère caméra* 3D, dont l'origine est la caméra, et le *repère image* 2D qui correspond aux pixels de la photo. Pour une caméra perspective idéalisée il est assez simple de déduire à partir d'un point dans le repère objet sa position correspondante dans le repère image. Pour cela on aura besoin des *paramètres extrinsèques* et des *paramètres intrinsèques* de la caméra¹⁸. L'opération inverse est beaucoup plus compliquée car les informations de profondeur sont essentiellement perdues par la projection perspective 3D en 2D.

Les *paramètres extrinsèques* sont la position et l'orientation de la caméra par rapport à l'environnement. Dans un repère objet donné, ils peuvent être définis par les coordonnées (x_0, y_0, z_0) et les angles d'Euler (ω, ϕ, κ) . Ils permettent de passer du repère objet au repère caméra et vice versa, par une simple transformation affine. Les *paramètres intrinsèques*, d'autre part, définissent la projection perspective appliquée par la caméra. Ils dépendent de ses caractéristiques optiques et géométriques.

2.8.1 Optique

Chaque point sur un objet peut refléter des radiations de lumière provenant de différentes directions. Un objet devient visible pour un système optique quand ces radiations reflétées touchent la surface

17. La rotation qui correspond à un triplet d'angles d'Euler dépend de la convention utilisée. Elle spécifie l'ordre dans lequel on applique les trois rotations axiales, et si on applique la deuxième et troisième rotation dans le repère déjà transformé (*intrinsèque*) ou original (*extrinsèque*).

18. Aussi appelés l'orientation externe et interne de la caméra.

photo-sensible du système, comme par exemple le capteur d'une caméra numérique, le film dans une caméra analogue, ou la rétine de l'œil.

Pour obtenir une image nette d'un objet, le système optique doit être tel que tous les rayons de lumière reflétés par un même point de l'objet convergent en un même point sur la surface photo-sensible. Sinon, ils seront distribués dans un certain rayon sur la surface, et on obtient une image floue. Un système simple qui permet d'obtenir ceci est la *pin-hole camera* : L'aperture optique est rendu assez petit pour que idéalement qu'un seul rayon par point d'objet peut entrer. Ceci permet des captures des photos nettes, mais en pratique, des caméras de ce type ont besoin d'un temps d'illumination très grand et produisent des photos de basse qualité. Ce modèle est cependant utilisé pour modéliser une caméra. Des systèmes optiques réels utilisent au lieu une lentille qui fait converger tous les rayons provenant d'un même point. La distance de ce point de convergence à la lentille varie en fonction de la distance du point sur l'objet. Donc pour pouvoir acquérir une image nette, il est nécessaire d'ajuster soit la distance lentille-capteur (caméra), ou la forme de la lentille (œil) en fonction de la distance de l'objet observé. En pratique, des lentilles introduisent des distorsions supplémentaires et d'autres effets optiques qui doivent être pris en compte pour effectuer des mesures précises sur les photos. [Trucco & Verri, 1998]

La théorie ondulatoire de la lumière montre qu'un rayon lumineux correspond à une onde, qui peut être décrit comme une superposition d'un ensemble d'ondes sinusoïdes sur un continuum de fréquences. Quand une radiation est reflété, sa forme d'onde est altérée car certaines de ces fréquences sont absorbées par le matériel. Trois types de photorécepteurs existent dans la rétine humaine, qui sont sensibles à des histogrammes de fréquences différents dans le spectrum visible. Ceux-ci permettent la vision des couleurs rouge, vert et bleu. La combinaison de valeurs d'intensité de ces trois couleurs fondamentales donne permet la perception d'une couleur. Les capteurs d'une caméra numérique fonctionnent selon le même principe, et produisent des valeurs numériques de couleur sous forme d'un triplet RGB. Comme ces valeurs de couleur ne sont pas directement une propriété de l'objet photographié mais dépendent des conditions lumineuses ambiantes et du système optique, des corrections radiométriques peuvent être nécessaires pour égaliser les couleurs si on veut fusionner des informations tirées par plusieurs photos d'un objet.

2.8.2 Modèle pin-hole

Comme décrit, on utilise le modèle pin-hole comme base pour modéliser projection de 3D en 2D d'une caméra. Ce modèle ne prend pas en considération des distorsions et autres phénomènes produits par une lentille, et suppose que l'image sera nette partout. La figure 2.7 montre une représentation en deux dimensions : Un point P de l'objet est projeté vers un point P' sur le capteur. PP' représente d'un seul rayon lumineux qui passe à travers l'aperture en O . L'élément essentiel du modèle est que la position de P' sur le capteur est invariant à la position de P le long de PP' . C'est cette information qui est perdue lors de la projection 3D en 2D, et qu'on cherche à retrouver via des techniques photogrammétriques. Les scanners 3D laser mesurent directement la distance $\|OP\|$ pour construire une carte de profondeur et à partir de cela un nuage de points.

La distance $f = \|OO'\|$ est la *longueur focale*, et constitue le seul paramètre de cette projection. Avec la hauteur h du capteur, il détermine la champ de vision ω :

$$\omega = 2 \arctan \frac{h}{2f}$$

En tridimensionnel, le capteur est rectangulaire de champ de vision est donc décrit par deux angles, correspondant à la largeur w et hauteur h du capteur.

O' représente l'origine d'un *repère capteur* 2D intermédiaire. Les coordonnées (x_s, y_s) dans ce repère sont contraints par $-\frac{w}{2} \leq x_i \leq \frac{w}{2}$ et $-\frac{h}{2} \leq y_i \leq \frac{h}{2}$. Ils peuvent directement être traduits en indices de pixels (x_i, y_i) (repère image), en connaissant la taille du capteur (w, h) , la taille de l'image en pixels (W, H) , et la position (o_x, o_y) de O' dans le repère image. On définit $s_x = \frac{w}{W}$ et $s_y = \frac{h}{H}$, c'est à dire la taille d'un pixel sur le capteur en direction horizontale et verticale :

$$x_i = \frac{x_s}{s_x} - o_x \quad \text{et} \quad y_i = \frac{y_s}{s_y} - o_y$$

Des distorsions de l'image sur le capteur introduits par la lentille peuvent souvent être assez bien modélisés par les relations suivantes, où (x_{sd}, y_{sd}) sont les coordonnées d'un point sur le repère capteur avec ces distorsions, et (x_s, y_s) les coordonnées correspondantes après la correction : [Trucco & Verri, 1998]

$$x_s = x_{sd} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad \text{et} \quad y_s = y_{sd} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

avec $r = \sqrt{x_{sd}^2 + y_{sd}^2}$, et k_1, k_2 des paramètres de cette correction. Usuellement k_2 peut être mis à zéro, et seulement k_1 doit être configuré.

A partir de cela, on peut maintenant donner une définition des paramètres intrinsèques d'une caméra par le tuple

$$(f, o_x, o_y, s_x, s_y, k_1)$$

O est l'origine du repère caméra. On suppose que les coordonnées (x_c, y_c, z_c) du point P sont données dans ce repère. Par le théorème de Thalès, on a $\frac{-x_s}{x_c} = \frac{f}{z_c}$ et $\frac{-y_s}{y_c} = \frac{f}{z_c}$. On peut donc passer du repère caméra au repère capteur via

$$x_s = f \frac{x_c}{z_c} \quad \text{et} \quad y_s = f \frac{y_c}{z_c}$$

En coordonnées homogènes, et si on n'inclut pas la correction des distorsions mentionnée, la transformation du repère caméra dans le repère image en utilisant les paramètres intrinsèques peut être exprimé par une multiplication matricielle :

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{w}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{s_x} & 0 & o_x \\ 0 & -\frac{f}{s_y} & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La transformation du repère objet dans le repère caméra correspond à une rotation et une translation 3D, aussi exprimables par une matrice de multiplication en coordonnées homogènes. La projection complète du repère objet dans le repère image correspondra donc à une multiplication matricielle $(\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{w}_i)^T = \mathbf{M}(x_o, y_o, z_o, 1)^T$. \mathbf{M} est donnée par :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -f_x r_{1,1} + o_x r_{3,1} & -f_x r_{1,2} + o_x r_{3,2} & -f_x r_{1,3} + o_x r_{3,3} & -f_x t_x + o_x t_z \\ -f_y r_{2,1} + o_y r_{3,1} & -f_y r_{2,2} + o_y r_{3,2} & -f_y r_{2,3} + o_y r_{3,3} & -f_y t_x + o_y t_z \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & t_z \end{bmatrix}$$

Ici, $r_{i,j}$ sont les 3×3 éléments de la matrice de rotation, $\vec{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$ le vecteur de translation. De plus, on pose $f_x = \frac{f}{s_x}$ et $f_y = \frac{f}{s_y}$, pour que les paramètres dans l'expression soient indépendants.

2.8.3 Calibrage

La calibrage en photogrammétrie consiste à estimer les paramètres extrinsèques et/ou intrinsèques d'une caméra en utilisant une ou plusieurs photo d'un objet (pattern de calibrage) connu. [Trucco & Verri, 1998] Figure 2.8 montre un exemple d'un "polygone de calibrage" utilisé dans un laboratoire de recherche. [Elzbieta, 2009] Plusieurs cibles se trouvent sur l'objet qui peuvent être repérés sur les photos manuellement ou possiblement par des algorithmes de détection de zones d'intérêt. Les coordonnées 3D de chaque cible sont connus. En comparant les positions 2D des cibles sur plusieurs photos, un calibrage des paramètres extrinsèques et intrinsèques a pu été effectué dans ce projet.

La plupart des techniques photogrammétiques supposent que les paramètres extrinsèques et intrinsèques correspondant aux photos sont connus. Sauf si on travaille dans des conditions très particulières (par exemple avec un banc optique où les paramètres sont fixés), il est donc nécessaire d'effectuer un calibrage avant de procéder. Cependant, il existe aussi des techniques qui permettent d'extraire de l'information à partir de photos non-calibrés. [Trucco & Verri, 1998]

Comme vu en section 2.8.2, la projection de coordonnées du repère *objet* 3D dans le repère image 2D peut être exprimé en tant que matrice de transformation \mathbf{M} . Soit $m_{i,k}$ ses 3×4 éléments. Exprimé en forme non-matricielle, avec conversion de coordonnées homogènes en coordonnées on obtient

$$x_i = \frac{\ddot{x}_i}{\ddot{w}_i} = \frac{m_{1,1}x_o + m_{1,2}y_o + m_{1,3}z_o + m_{1,4}}{m_{3,1}x_o + m_{3,2}y_o + m_{3,3}z_o + m_{3,4}}$$

$$y_i = \frac{\ddot{y}_i}{\ddot{w}_i} = \frac{m_{2,1}x_o + m_{2,2}y_o + m_{2,3}z_o + m_{2,4}}{m_{3,1}x_o + m_{3,2}y_o + m_{3,3}z_o + m_{3,4}}$$

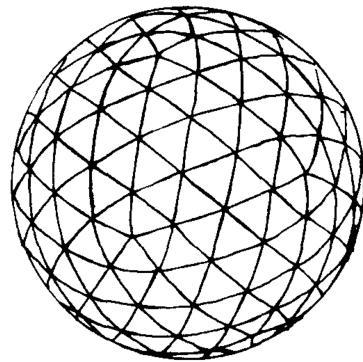


FIGURE 2.6 – Pavage d'une sphère par division géodésique. Copié de [Horn, 1984].

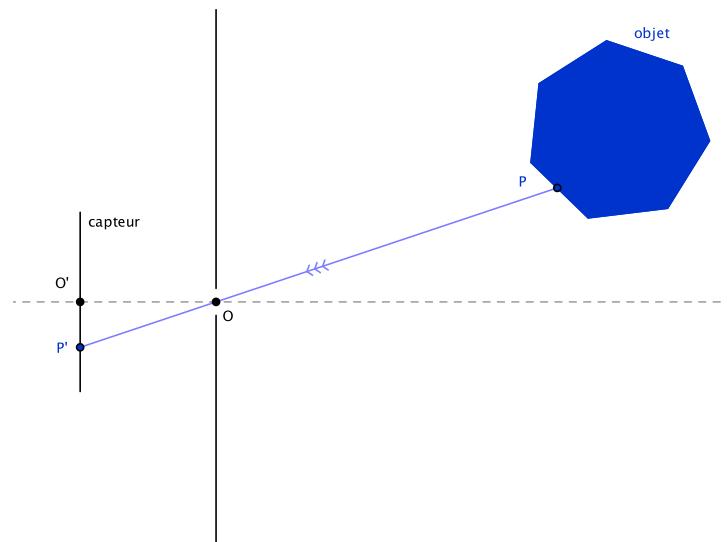


FIGURE 2.7 – Modèle caméra pin-hole

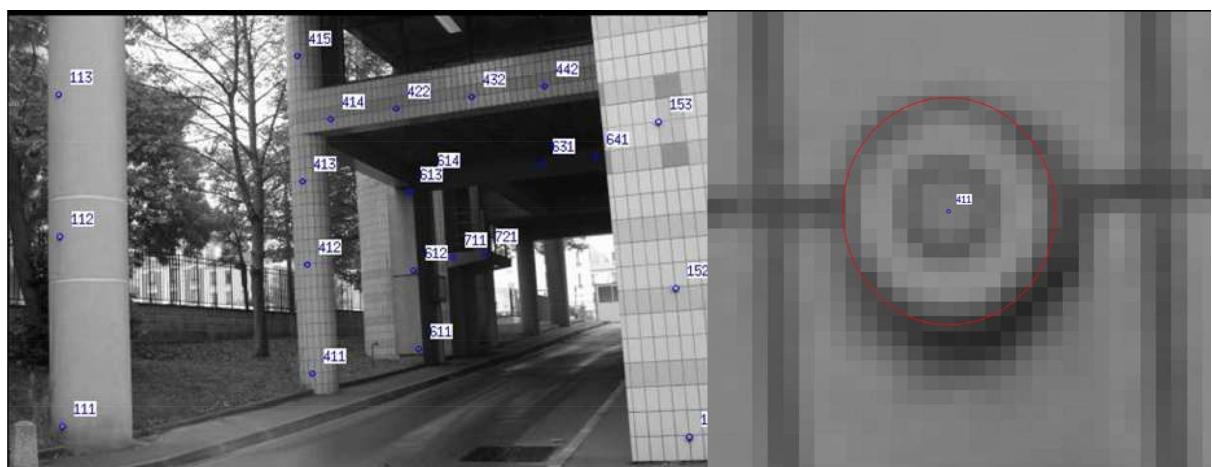


FIGURE 2.8 – Exemple de pattern de calibrage utilisé en photogrammétrie. Copié de [Elzbieta, 2009]

En négligeant un facteur de redimensionnement, \mathbf{M} a 11 composants indépendants à chercher. 6 cibles pour lesquelles on connaît leur coordonnées image (x_i, y_i) , et leurs coordonnées objet (x_o, y_o, z_o) suffisent donc pour trouver \mathbf{M} par résolution d'un système linéaire formé par ces équations. En pratique, beaucoup plus de cibles seront connus, et donc une meilleure estimation de \mathbf{M} pourra être obtenue par la méthode des moindres carrés.

La prochaine étape est de retrouver à partir des 12 valeurs $m_{i,j}$ les paramètres extrinsèques (\mathbf{R}, \vec{t}) et intrinsèques (o_x, o_y, f_x, f_y) . Le développement correspondant est donné en [?].

2.8.4 Problème de correspondance

Afin de pouvoir reconstruire la position d'un point dans le repère objet à partir de deux ou plusieurs photos, il est d'abord nécessaire d'identifier la projection du même point sur les photos. Quand le but est de reconstruire un petit nombre de points spécifiques, on peut manuellement identifier les points correspondants, ou utiliser des algorithmes de détection de zones d'intérêt.

Dans le but de générer un nuage de points par photogrammétrie, il sera par contre nécessaire d'associer une valeur de profondeur à chaque pixel des photos. Ici des méthodes de mise en correspondante peuvent être appliquées. En utilisant deux photos, l'*appariement dense* consiste donc à trouver pour chaque pixel (x_i, y_i) d'une image son homologue (x'_i, y'_i) sur l'autre image. Quand les deux poses de caméra se distinguent uniquement par un déplacement horizontal, alors des pixels homologues de trouveront toujours sur la même ligne dans les deux images, donc $y_i = y'_i$. La profondeur z_c peut alors être estimée par la *disparité* $d = \|x_i - x'_i\|$ des deux pixels (voir figure 2.9). [Elzbieta, 2009] Ceci correspond au principe de fonctionnement de la vision humaine stéréoscopique.

Pour estimer le pixel (x'_i, y'_i) homologue à (x_i, y_i) , une méthode est de comparer visuellement les valeurs des pixels dans un voisinage V autour des pixels sur les deux images. Soit $I(x, y)$ respectivement $I'(x', y')$ la valeur d'un pixel dans le premier et le deuxième image. Pour des images en couleurs RGB, cela peut par exemple être une valeur de luminosité calculée à partie des canaux de couleur. En calcule donc $\hat{d}(x, y)$, la disparité à associer à une position dans le repère image, en maximisant une fonction de ressemblance du voisinage

$$\hat{d}(x, y) = \arg \max_{d_{\min} < d < d_{\max}} \sum_{\Delta x=-V}^V \sum_{\Delta y=-V}^V \psi(I(x + \Delta x, y + \Delta y), I'(x + \Delta x, y + \Delta y + d))$$

Pour la fonction ψ , on utilise souvent $\psi(I_1, I_2) = I_1 I_2$ ou $\psi(I_1, I_2) = -(I_1 - I_2)^2$. Ils sont toutes les deux maximales quand $I_1 = I_2$. De tels méthodes d'appariement dense souffrent surtout de problèmes d'occlusion (une partie d'une image n'est pas visible dans l'autre), et de fausses correspondances causés par du bruit dans les photos. Une contrainte qui peut être appliquée pour éviter ces problèmes est que la même correspondance soit trouvée en cherchant dans les deux directions. Pour la méthode décrite ici $\hat{d}(x_i, y_i) \simeq -\hat{d}'(x'_i, y'_i)$.

2.8.5 Reconstruction 3D

Quand les paramètres intrinsèques et extrinsèques d'une photo sont connus, on peut déterminer pour chaque pixel (x_i, y_i) la droite du rayonnement de lumière PP' (voir figure 2.7), dans le repère objet. Si on a deux photos pris de différentes poses et sur lequel le même point (x_i, y_i) a été identifié, on a une deuxième droite PP'' connue. On connaît donc en repère objet les points P' , P'' , les droites PP' , PP'' , et on sait que P, P', P'' sont coplanaires. Les coordonnées de P peuvent ainsi être calculés par triangulation.

Cela correspond à une résolution d'un système linéaire formé de deux équations du type $\vec{P}'_i \mathbf{M} = \vec{P}$, où \vec{P}'_i sont les coordonnées image de pixels correspondants sur les deux images, et l'inconnue \vec{P} les coordonnées 3D cherchés. Comme pour le calibrage, une amélioration du résultat est possible en utilisant plusieurs images.

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire d'avoir les paramètres extrinsèques absolus des caméras, donc la rotation et translation dans le repère objet. Au lieu, des paramètres extrinsèques relatifs, c'est à dire par rapport à l'autre caméra sont suffisants.

Quand seulement les paramètres intrinsèques sont connus, une reconstruction est toujours possible à un facteur de redimensionnement près. Quand on ne dispose pas d'information sur les paramètres, une reconstruction à une transformation de perspective près est possible. Pour ces deux cas au moins 8 correspondances entre les deux images sont requis. [Trucco & Verri, 1998]

2.8.6 Combination photo-nuage de points

Comme mentionné, dans des projets de documentation 3D on combine souvent des scans laser avec des informations extraits de photos prises en combinaison avec les scans laser. La colorisation d'un nuage de points $P = \{p_i\}$ via une photo est assez simple en utilisant les techniques exposées. Le but est de trouver pour chaque point p_i du nuage de point, le pixel correspondant (x_i, y_i) sur la photo. On attribut alors la couleur de ce pixel au point du nuage.

Dans beaucoup de cas, la position de la caméra par rapport au scanner est connue. Il existe par exemple des dispositifs où une caméra est directement montée sur le scanner. Les points du nuage de points seront dans un repère propre au scanner. En utilisant une matrice de transformation qui exprime la position relative de la caméra, ils peuvent être reportés dans le repère caméra. Maintenant, les coordonnées du pixel peuvent être trouvées en utilisant les paramètres intrinsèques de la caméra, par la formule 2.3. Il peut cependant être nécessaire d'ajouter des corrections de distorsions comme ceux mentionnés. Pour des points qui sont occlus sur la photo, on aura des faux résultats, l'écart caméra-scanner doit donc être assez petit.

Quand le but sera de fusionner plusieurs nuage de points coloriés ainsi pour former un modèle complet, il pourra aussi être utile d'appliquer des corrections de homogénéisation des couleurs. [Girod, 2013] décrit une approche pour résoudre ce problème : D'abord le vignettage sur les photos est effacé, ensuite des corrections radiométriques sont appliqués sur l'ensemble des images.

Le vignettage est une réduction de la luminosité d'une photo aux périphéries. Un exemple est montré sur figure 2.10. Le phénomène peut avoir des différentes origines géométriques, optiques et électroniques, tous liée à l'angle d'incidence du rayonnement sur le capteur. Il peut donc être modélisé par un modèle radial. L'article montre que $1 + \alpha r^2 + \beta r^4 + \gamma r^6$ décrit assez bien un facteur de l'intensité lumineuse perçue par le capteur de la caméra, en fonction de la distance au centre r . Les paramètres du modèle α, β, γ devront être estimés. Pour cela, on prend plusieurs photos pris d'un même objet avec la caméra, sur lesquels on identifie des points de correspondance. On suppose que la luminosité ambiante est constante sur ces photos. Soit $G_{i,j}$ la valeur en niveaux gris du i -ième point de correspondance sur la j -ième photo. Dans ce modèle, on suppose donc que des valeurs distinctes d'un même point de correspondance sur différentes images sont dues au vignettage. Donc pour tout point de correspondance i ,

$$G_{i,1}(1 + \alpha r_{i,1}^2 + \beta r_{i,1}^4 + \gamma r_{i,1}^6) = G_{i,2}(1 + \alpha r_{i,2}^2 + \beta r_{i,2}^4 + \gamma r_{i,2}^6) = \dots$$

avec $r_{i,j}$ la distance au centre du point sur cette image. Il a été montré que la méthode RANSAC est approprié pour trouver une bonne estimation de α, β, γ , avec les données d'entrée souvent erronées.

Après avoir corrigé les vignettes sur les photos individuelles, on veut préparer des photos pris de différents points de vue d'un objet afin de créer un nuage de points fusionné colorié de manière homogène. La méthode proposée en [Girod, 2013] cherche des points de correspondance sur des zones communes de différentes photos par le détecteur SIFT, puis calcule des matrices de correction de couleur à appliquer à l'ensemble de pixels de chaque image. La figure 2.11 montre un résultat obtenu avec cette méthode.

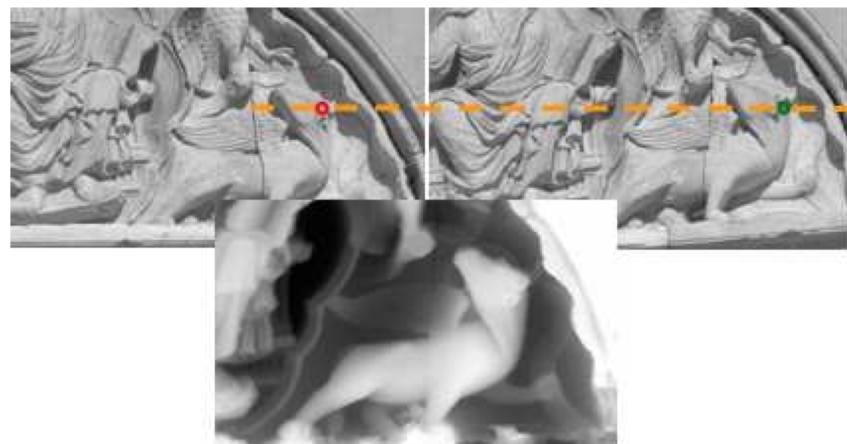


FIGURE 2.9 – Disparité d'un point correspondant sur deux photos stéréoscopiques. En bas, carte de disparité. Copié de [Elzbieta, 2009].

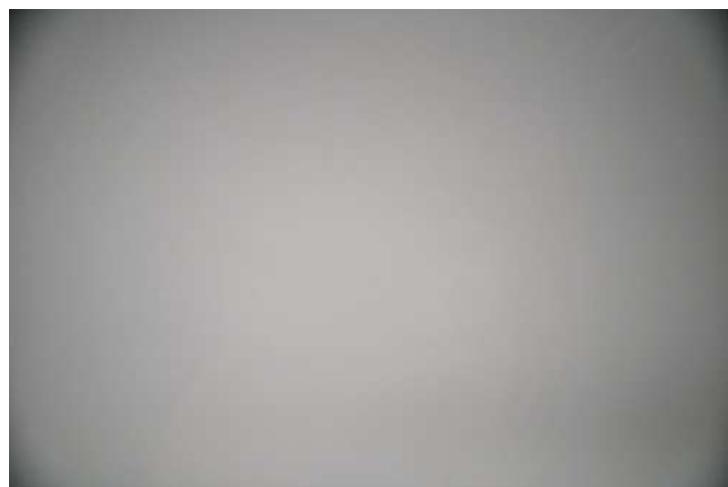


FIGURE 2.10 – Exemple de vignettage d'une photo. Copié de [Girod, 2013]

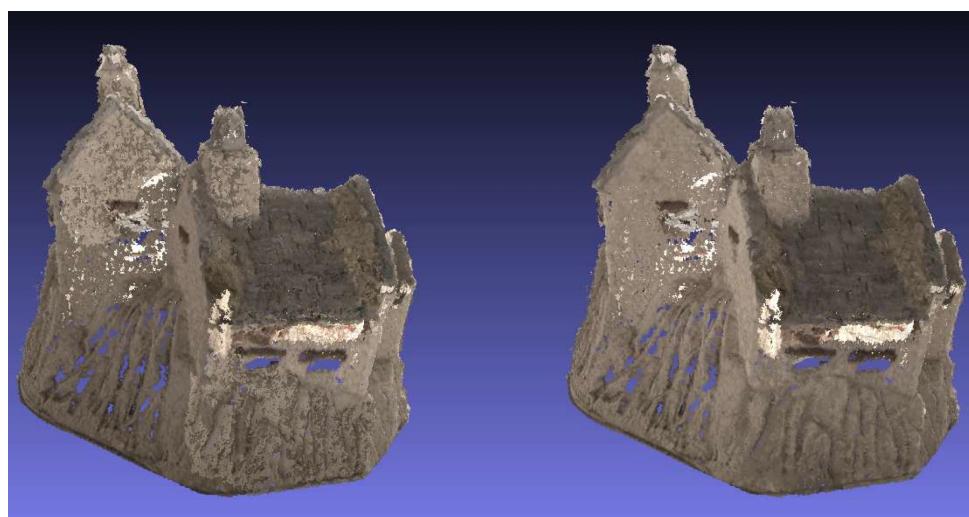


FIGURE 2.11 – Nuage de points sans et avec homogénéisation des couleurs. Copié de [Girod, 2013]

3 Projet prévu pour le mémoire

Le but du mémoire sera de développer une méthode permettant de recaler des scans à distance avec des scans proches plus détaillées d'une partie du même objet. Le travail sera basé sur un projet de documentation 3D actuel du LISA, la numérisation sous forme de complète de l'Hôtel de Ville de Bruxelles. Les figures 3.1 à 3.6 montrent des captures d'écran de nuages de points déjà générés pour ce projet, coloriés en utilisant des photos. La méthode à développer permettra par exemple d'aligner le scan du dessus-de-porte montré en 3.2, ou un scan d'une statue comme 3.3 avec un scan à distance de la façade entière, montré en 3.1.

Un autre projet de documentation du LISA sur lequel la même méthode pourra être appliquée est le scan d'une grotte, où le but est de recaler des scans de gravures préhistoriques sur les murs, et des scans de stalagmites avec le scan entier. [Keiner, 2011] et [Grussenmeyer *et al.*, 2012] pourront être utilisés comme références dans ce contexte.

Le problème principal à résoudre, qui n'est pas abordé par les algorithmes dans la littérature, est que les deux nuages points à recaler ont des densités de points très différentes. En plus, pour 3.1, elle diminue avec la hauteur, comme le scan a été pris à partir du sol. Le travail pourrait aussi aborder le problème de recaler des scans de différents points de vue, comme un pris à partie d'une tour comme 3.4 et 3.4, ou un nuage de points de l'environnement 3.6.

Les scans utilisés auront de très grands nombre de points. Un deuxième but du travail sera donc de développer des algorithmes efficaces, par exemple en utilisant de la parallélisation ou des approches multi-échelle.

Le mémoire décrira en workflow qui donne les étapes à suivre pour recaler des scans avec la méthode développée. Ceci pourra inclure les distances à partir desquelles les scans peuvent être pris, et possiblement d'autres données d'entrée requis, comme par exemple des photos qui compléteront les nuages de points à basse densité par des informations supplémentaires. Un programme informatique sera développé qui implémente les algorithmes et méthodes développées.

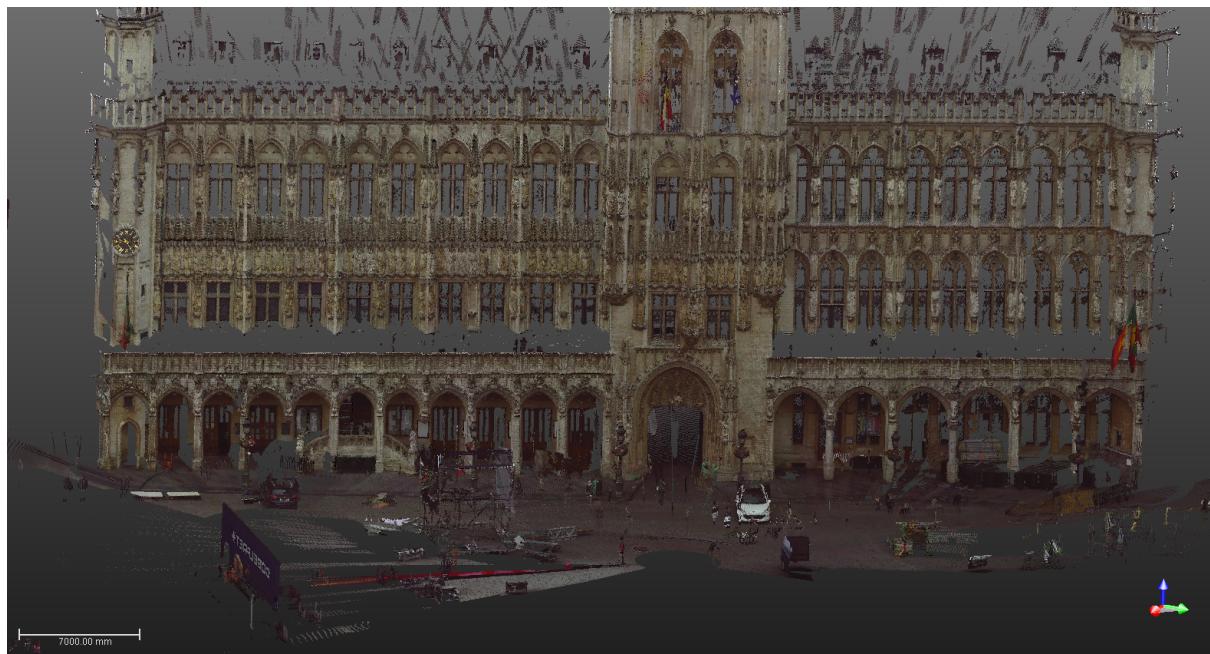


FIGURE 3.1 – Nuage de points de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, façade avant.



FIGURE 3.2 – Nuage de points de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, scan détail du dessus-de-porte.

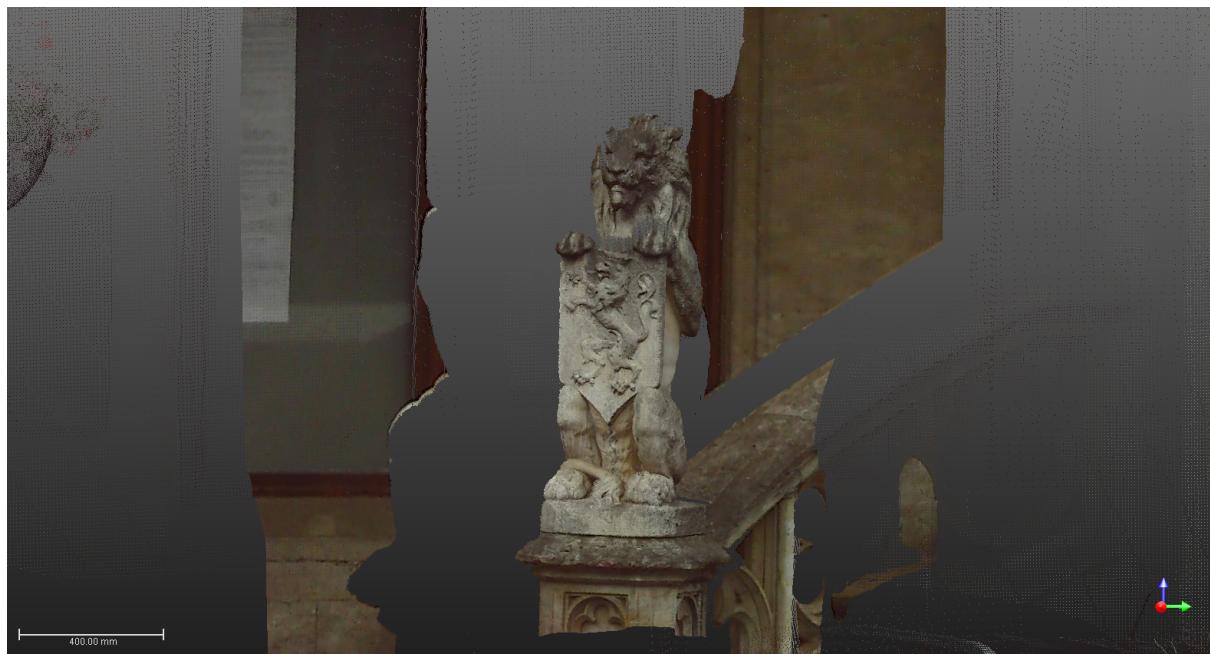


FIGURE 3.3 – Nuage de points de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, scan détail d'une statue.



FIGURE 3.4 – Nuage de points de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, vu par une tour.

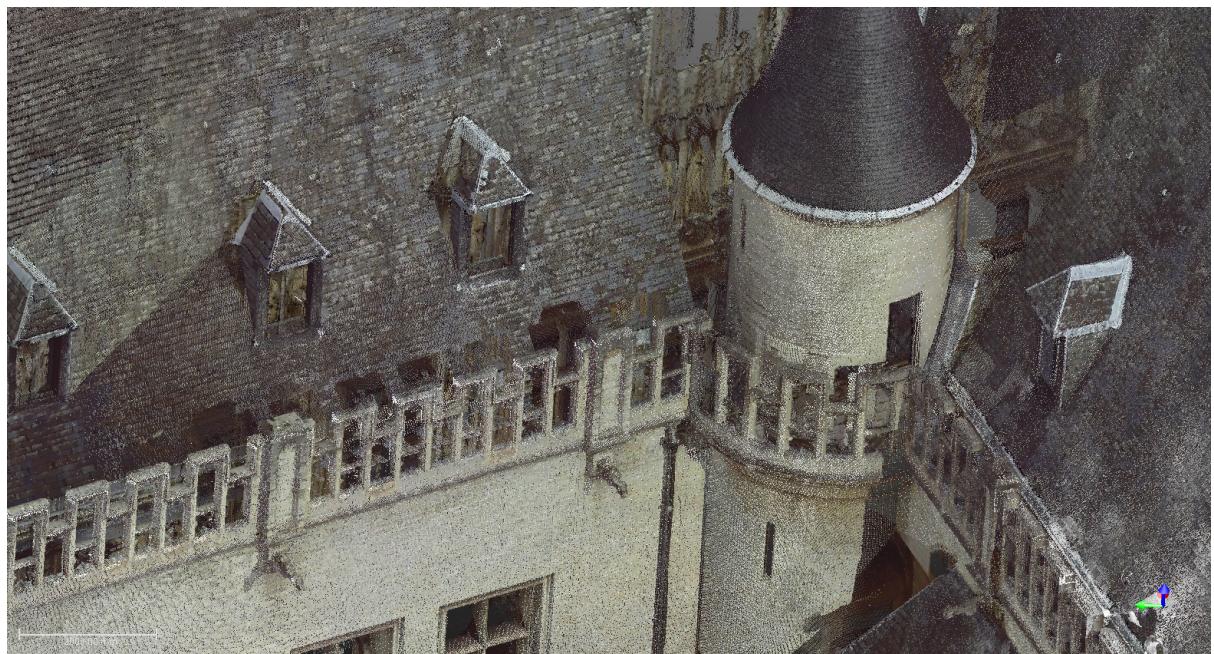


FIGURE 3.5 – Nuage de points de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, détail vu par une tour.



FIGURE 3.6 – Nuage de points de l'Hôtel de Ville de Bruxelles, environnements.

Bibliographie

- [Aiger *et al.*, 2008] Aiger, Dror, Mitra, Niloy J, & Cohen-Or, Daniel. 2008. 4-Points Congruent Sets for Robust Pairwise Surface Registration. *ACM Transactions on Graphics*, **27**(3).
- [Besl & McKay, 1992] Besl, Paul J, & McKay, Neil D. 1992 (February). A Method for Registration of 3-D Shapes. *Pages 239–256 of : IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14. IEEE.
- [Biber, 2003] Biber, Peter. 2003. The Normal Distributions Transform : A New Approach to Laser Scan Matching.
- [Center for Advanced Spatial Technologies, 2014] Center for Advanced Spatial Technologies, University of Arkansas. 2014. *Archaeological Laser Scanning*. <http://www.cast.uark.edu/home/research/archaeology-and-historic-preservation/archaeological-geomatics/archaeological-laser-scanning.html>.
- [Dold, 2005] Dold, Christoph. 2005. Extended Gaussian Images for the Registration of Terrestrial Scan Data. Institute of Cartography and Geoinformatics, University of Hannover, Germany.
- [Dold & Brenner, 2006] Dold, Christoph, & Brenner, Claus. 2006. Registration of Terrestrial Laser Scanning Data using Planar Patches and Image Data. *Pages 25–27 of : International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Leibniz University of Hannover.
- [Dold *et al.*, 2007] Dold, Christoph, Ripperda, Nora, & Brenner, Claus. 2007. Vergleich verschiedener Methoden zur automatischen Registrierung von terrestrischen Laserscandaten. *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*, 196.
- [Elzbieta, 2009] Elzbieta, Gardon. 2009 (Septembre). *Fusion de cartes de profondeurs en photogrammétrie architecturale*. Rapport de Projet Pluridisciplinaire, Ecole Nationale des Sciences Géographiques.
- [Fischler & Bolles, 1980] Fischler, Martin A, & Bolles, Robert C. 1980 (March). *Random Sample Consensus : A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. Tech. rept. Artificial Intelligence Center, SRI International, Menlo Park, California.
- [Girod, 2013] Girod, Luc. 2013 (Septembre). *Égalisation radiométrique de nuages de points 3D : Principes et Algorithmique*. Stage de fin d'études, Ecole Nationale des Sciences Géographiques (France).
- [Grussenmeyer *et al.*, 2012] Grussenmeyer, P., Alby, E., Landes, T., Koehl, M., Guillemain, S., Hullo, J.-F., Assali, P., & Smigiel, E. 2012. Recording Approach Of Heritage Sites Based On Merging Point Clouds From High Resolution Photogrammetry And Terrestrial Laser Scanning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XXXIX-B5**, 553–558.
- [Holz & Behnke, 2014] Holz, Dirk, & Behnke, Sven. 2014 (June). Registration of Non-Uniform Density 3D Point Clouds using Approximate Surface Reconstruction. Joint 45th International Symposium on Robotics (ISR) and 8th German Conference on Robotics (ROBOTIK). Autonomous Intelligent Systems Group, University of Bonn, Germany, Munich.
- [Horn, 1984] Horn, Berthold K.P. 1984. Extended Gaussian Images. *Proceesings of the IEEE*, **72**(12), 1671–1686.
- [Horn, 1987] Horn, Berthold K.P. 1987 (April). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Page 629 of : Journal of the Optical Society of America A*, vol. 4. Department of Electrical Engineering, University of Hawaii at Manoa.
- [Huang & You, 2012] Huang, Jing, & You, Suya. 2012. Point Cloud Matching based on 3D Self-Similarity. *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2012 IEEE Computer Society Conference on*, June, 41–48.
- [Keiner, 2011] Keiner, Christopher. 2011. *Bildregistrierung von 3D-Laserscans und Bildern für Wadi Sura*. M.Phil. thesis, Fachbereich Mathematik und Informatik der Freien Universität Berlin, April.

- [Kersten *et al.* , 2006] Kersten, Thomas, Przybilla, Heinz-Jürgen, & Lindstaedt, Maren. 2006. Integration, Fusion und Kombination von terrestrischen Laserscannerdaten und digitalen Bildern. November.
- [Koch, 2008] Koch, K. R. 2008. Fitting Free-Form Surfaces to Laserscan Data by NURBS. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 4(August), 134–140.
- [Lerma *et al.* , 2009] Lerma, José Luis, Navarro, Santiago, Cabrelles, Miriam, & Villaverde, Valentín. 2009. Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation : the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, **37**(October), 499–507.
- [Lichtenstein, 2011] Lichtenstein, Maria. 2011. *Strukturbasierte Registrierung von Punktwolken unter Verwendung von Bild- und Laserscannerdaten*. Ph.D. thesis, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [Low, 2004] Low, Kok-Lim. 2004 (February). *Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration*. Tech. rept. Department of Computer Science; University of North Carolina at Chapel Hill.
- [Matiukas & Miniotas, 2011] Matiukas, V., & Miniotas, D. 2011. Point Cloud Merging for Complete 3D Surface Reconstruction. ISSN 1392–1215 ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING, no. 7. Department of Electronic Systems, Vilnius Gediminas Technical University.
- [Rusinkiewicz & Levoy, 2001] Rusinkiewicz, Szymon, & Levoy, Marc. 2001. Efficient Variants of the ICP Algorithm. vol. 3-D Digital Imaging and Modeling. Stanford University.
- [Schönemann, 1966] Schönemann, Peter H. 1966. A generalized solution of the orthogonal procrustes problem. *Psychometrika*, **31**(1), 1–10.
- [Schönemann & Caroll, 1970] Schönemann, Peter H., & Caroll, Robert M. 1970. Fitting one matrix to another using choice of a central dilation and a rigid motion. *Psychometrika*, **35**(2), 245–255.
- [Segal *et al.* , 2009] Segal, Aleksandr V., Haehnel, Dirk, & Thrun, Sebastian. 2009. Generalized-ICP. *Proceedings of Robotics : Science and Systems*.
- [Toldo *et al.* , 2010] Toldo, Roberto, Beinat, Alberto, & Crosilla, Fabio. 2010. Global registration of multiple point clouds embedding the Generalized Procrustes Analysis into an ICP framework. 3DPVT 2010 Conference.
- [Tournas & Tsakiri, 2009] Tournas, E., & Tsakiri, M. 2009. Automatic 3D Point Cloud Registration for Cultural Heritage Documentation. *Laser scanning 2009, IAPRS*, **XXXVIII**(September), 189–194.
- [Trucco & Verri, 1998] Trucco, Emanuele, & Verri, Alessandro. 1998. *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice Hall.
- [Tuytelaars & Mikolajczyk, 2007] Tuytelaars, Tinne, & Mikolajczyk, Krystian. 2007. Local Invariant Feature Detectors : A Survey. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, **3**(3).
- [Wendt, 2008] Wendt, Axel. 2008. *Objektraumbasierte simultane multisensorale Orientierung*. Ph.D. thesis, Universität Hannover.
- [Wikipedia, 2014] Wikipedia. 2014. Article *Wikipedia - Scanner tridimensionnel*. http://fr.wikipedia.org/wiki/Scanner_tridimensionnel.