



HAL
open science

Correction de nuages de points lidar embarqué sur véhicule pour la reconstruction d'environnement 3D vaste

Pierre Merriaux, Yohan Dupuis, Rémi Boutteau, Pascal Vasseur, Xavier Savatier

► To cite this version:

Pierre Merriaux, Yohan Dupuis, Rémi Boutteau, Pascal Vasseur, Xavier Savatier. Correction de nuages de points lidar embarqué sur véhicule pour la reconstruction d'environnement 3D vaste. Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle (RFIA), Jun 2016, Clermont-Ferrand, France. hal-01906323

HAL Id: hal-01906323

<https://hal.science/hal-01906323>

Submitted on 26 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Correction de nuages de points lidar embarqué sur véhicule pour la reconstruction d'environnement 3D vaste

P. Merriaux¹

Y. Dupuis²

R. Bouteau¹

P. Vasseur³

X. Savatier¹

¹Irseem, Esigelec ²Cerema ³Litis, Université de Rouen

pierre.merriaux@esigelec.fr

Résumé

Dans ces travaux, nous évaluons l'impact de différentes trajectoires de véhicule routier sur les nuages de points lidar embarqué. Effectivement, les fréquences de balayage des lidars sont faibles au regard des vitesses véhicule. Nous proposons une méthode pour palier ce problème et des métriques de comparaison. Nos résultats montrent qu'il est nécessaire de redresser les mesures de lidar embarqué avant de reconstruire en 3D des environnements vastes.

Mots Clef

lidar, environnement large, déformations, véhicule.

Abstract

In this paper, we investigate the impact of different kind of car trajectories on lidar scans. In fact, lidar scanning speeds are considerably slower than car speeds introducing distortions. We propose a method to overcome this issue, and metrics. Our results suggest that the vehicle trajectory should be taken into account when building 3D large-scale maps from a lidar embedded on a moving vehicle.

Keywords

lidar, large-scale environment, distortions, vehicle.

1 Introduction

Depuis quelques années, l'ensemble des acteurs de l'automobile - laboratoires, constructeurs, équipementiers - s'attache à développer des solutions de conduite automatisée avec comme but ultime la mise au point de véhicules entièrement autonomes. L'accélération que l'on peut constater dans ce domaine s'est accompagnée d'une diffusion importante de la technologie lidar, dans un premier temps avec des versions mono-nappes et depuis quelques années des lidars multi-nappes dits lidars 3D ; le plus connu étant le Velodyne, capteur emblématique de la Google car. Les lidars 3D sont très efficaces dans les fonctions de perception de l'environnement afin de détecter le marquage au sol nécessaire à la fonction de contrôle latéral pour des scénarios de conduite automatique sur voie séparée ou encore pour détecter et suivre l'ensemble des objets - statiques et

dynamiques - autour du véhicule et permettre à la couche décisionnelle la planification et l'exécution de trajectoires. Pour aller vers plus d'autonomie dans la conduite, l'enjeu est désormais d'améliorer la fonction de localisation précise du véhicule, en particulier dans des scénarios d'usage en environnement urbain. Actuellement la localisation précise et rapide d'un véhicule est possible en utilisant un positionnement inertiel (IMU) hybridés à un GPS différentiel (RTK) mais ces technologies restent onéreuses. Une autre approche consiste à utiliser une connaissance a priori de l'environnement, par exemple en se basant sur une cartographie 3D constituée au préalable.

La création de cartes 3D de référence peut être faite par des techniques de type SLAM, cependant ces approches souffrent encore de limitations en particulier avec des problèmes de dérive lorsqu'il s'agit de reconstruire de grands environnements.

Les lidars embarqués sur des véhicules routiers, couplés à un positionnement précis IMU et GPS RTK sont donc couramment utilisés pour la construction de carte 3D d'environnement. Cependant afin d'atteindre une précision de reconstruction suffisante, il est nécessaire de corriger les déformations des mesures dues au déplacement du véhicule.

Ce problème est peu traité en robotique d'intérieur, car les méthodes de numérisation s'apparentent plus à une suite de déplacements et acquisitions statiques qu'à une acquisition en continu. Dans ce type d'applications, la vitesse est de toute façon suffisamment faible pour ne pas rencontrer d'importants problèmes de déformation de nuage de points. La problématique est différente dans le cas d'application sur véhicules routiers. En effet, la vitesse y est nettement plus importante qu'en robotique mobile et la précision attendue des reconstructions est supérieure aux outils de cartographie aéroportés.

Si on peut supposer que ce problème est résolu - l'utilisation de lidar 3D pour la construction de cartes n'est pas nouvelle - il est très peu documenté dans la littérature. Or, dans toute implémentation d'un lidar 3D sur un véhicule lorsque le but est de construire une carte 3D précise, ce problème doit être impérativement pris en compte. Dans cet article, nous présentons une analyse des effets du mou-

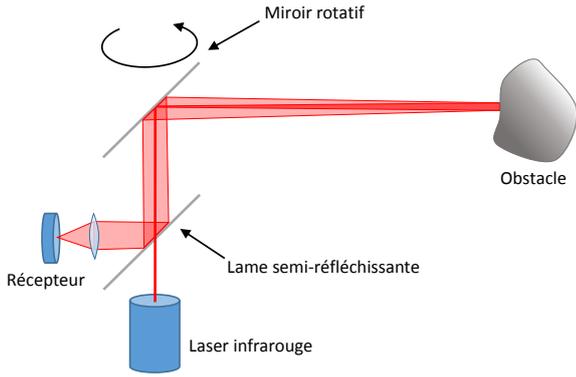


FIGURE 1 – Synoptique simplifié du fonctionnement d'un télémètre lidar (*lidar rangefinder*)

vement d'un véhicule sur l'altération de mesures lidar et une méthode pour le recalage des acquisitions. Les expérimentations présentées mettent en évidence les effets de mouvement de translation et de rotation sur la déformation des scans et démontrent l'intérêt de mettre en oeuvre une méthode de correction.

2 Méthodologie

Dans le but d'évaluer un algorithme de localisation lidar, nous voudrions réaliser de vastes cartes de l'environnement avec un lidar 3D embarqué sur un véhicule. Comme évoqué plus haut, les mesures lidar sont déformées par le mouvement du véhicule porteur. Ces déformations sont suffisamment importantes pour altérer la précision de la carte obtenue. Il est donc nécessaire de corriger la déformation des scans lidar, avant de reconstruire la carte.

Il existe plusieurs solutions pour prendre en compte ce problème :

- Augmenter la fréquence d'acquisition du lidar. Pour une fréquence deux fois plus rapide, le véhicule aura parcouru deux fois moins de distance et les déformations seront deux fois plus faibles. C'est la solution adoptée pour la réalisation de la localisation du robot du *Challenge Argos* [1], car les déplacements étaient relativement lents.
- Obtenir le déplacement du véhicule, pour corriger le nuage de points mesurés. La mesure de mouvement peut être réalisée avec un capteur annexe : odométrie, IMU, caméra [2],...ou directement à partir de deux scans lidar successifs [3].

[4] présente plusieurs méthodes d'interpolation de la trajectoire dans le cas où la fréquence d'acquisition de ce mouvement est faible, par exemple lorsqu'il faut attendre deux scans complet d'un lidar motorisé [5].

2.1 Déformation scan lidar

Un lidar balaye l'environnement à l'aide d'un miroir déviant son faisceau laser (figure 1). Le plus souvent un moteur entraîne en rotation le miroir pour former un scan

couvrant un certain champ de vue. La durée d'un scan T_s dépend donc de la vitesse de rotation qui peut varier de quelques hertz à quelques centaines de hertz selon les modèles. Pendant la durée T_s , si le lidar n'est pas immobile (figure 3a), le scan ne sera plus centré sur un point unique. Comme le montre la figure 3b, le mouvement du véhicule s'ajoute à la rotation du lidar et vient déformer la mesure obtenue.

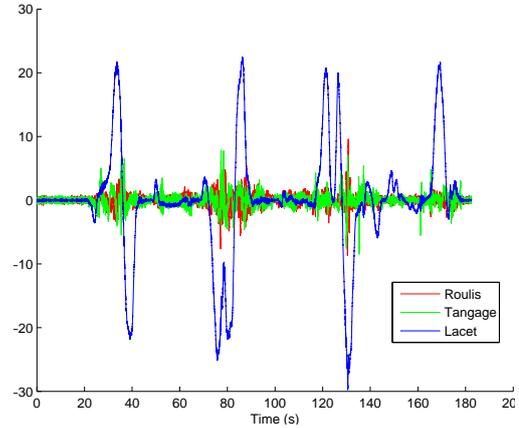


FIGURE 2 – Taux de rotation du véhicule sur un trajet autour de notre campus : le lacet est prédominant dans les virages à basse vitesse, les 2 autres dimensions restant négligeables.

Les déformations sont dues à un mouvement du mobile porteur et sont proportionnelles à sa vitesse et à la durée d'acquisition d'un scan T_s . Par exemple avec un *Lidar velodyne HDL64* à 10Hz :

- mouvement linéaire à 50km/h : on constate un décalage de 1.38m entre le début et la fin du scan ;
- mouvement de rotation à 25°/s : à 50m du lidar, le décalage est de 2.19m.

Les nuages de points obtenus sont très déformés au point d'être incompatibles avec une reconstruction 3D précise.

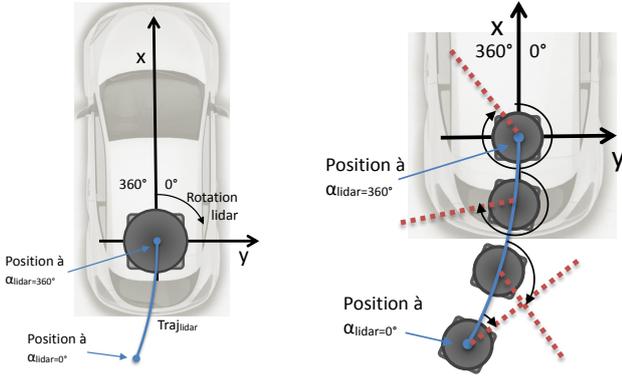
2.2 Correction de la déformation

La composition du mouvement d'un véhicule routier se trouve majoritairement dans le plan. La figure 2 nous confirme que les vitesses de rotation sont maximales sur l'axe de lacet et que les freinages et les accélérations latérales n'entraînent pas de fort taux de tangage et de roulis. Dans ce cas d'application, nous pouvons donc nous contenter d'une correction 2.5D.

Le mouvement du véhicule dans le plan peut être approximé par son odométrie. Il faut commencer par déterminer les composantes de mouvement linéaire Δx et de rotation $\Delta\theta$ par les équations 1 et 2.

$$\Delta x = r \frac{\Delta\theta_R + \Delta\theta_L}{2} \quad (1)$$

$$\Delta\theta = r \frac{\Delta\theta_R - \Delta\theta_L}{L} \quad (2)$$



(a) Trajectoire parcourue par le lidar pendant la durée d'un scan.

(b) Le mouvement du véhicule s'ajoute à la rotation du lidar, le repère lidar n'est plus fixe et le scan se retrouve déformé

FIGURE 3 – Déformation du scan lidar par le mouvement du véhicule.

- r : rayon de la roue
- L : voie du véhicule
- $\Delta\theta_R$: angle (radian) de rotation roue droite
- $\Delta\theta_L$: angle (radian) de rotation roue gauche
- Δx : déplacement linéaire
- $\Delta\theta$: rotation

Il est alors possible d'utiliser la méthode de *Runge-Kutta* pour intégrer ces déplacements locaux et déterminer la trajectoire parcourue :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix}_{i-1} + \begin{bmatrix} \Delta x_i \cos(\theta_{i-1} + \Delta\theta_i/2) \\ \Delta x_i \sin(\theta_{i-1} + \Delta\theta_i/2) \\ \Delta\theta_i \end{bmatrix}_i \quad (3)$$

Dans le cas d'un lidar fixe, la position des échos bruts E_b en fonction des distances retournées est déterminée par une transformation du repère polaire vers un repère cartésien, avec l'équation 4. ω représente l'élévation et α l'azimut de la raie lidar concernée :

$$E_b = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega)\cos(\alpha) \\ \cos(\omega)\sin(\alpha) \\ \sin(\omega) \end{bmatrix} * Distance \quad (4)$$

Comme le lidar n'est pas fixe pendant T_s , nous allons utiliser l'équation 3 pour déterminer une transformation le long de la trajectoire parcourue $Trajlidar$; et reconstituer les échos corrigés E_c en fonction de l'évolution de l'angle d'azimut α du lidar.

Il est préférable d'obtenir un scan corrigé dans le repère final du lidar $\alpha_{lidar} = 360^\circ$ (la fin de la trajectoire) plutôt que par rapport à la position initiale du scan $\alpha_{lidar} = 0^\circ$ (figure 3a). En effet ce repère final est fixe par rapport au véhicule, et ne dépend pas de sa vitesse. Il faut donc dans un premier temps reconstituer la position du lidar P_α en fonction de α du miroir du lidar et de l'odométrie :

$$\begin{aligned} \Delta x_\alpha &= -\Delta x \frac{\alpha}{2\pi} \\ \Delta \theta_\alpha &= -\Delta \theta \frac{\alpha}{2\pi} \\ P_\alpha &= \begin{bmatrix} X_\alpha \\ Y_\alpha \\ \theta_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta x_\alpha \cos(\theta_\alpha - \Delta\theta_\alpha/2) \\ -\Delta x_\alpha \sin(\theta_\alpha - \Delta\theta_\alpha/2) \\ -\Delta\theta_\alpha \end{bmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

Puis dans un second temps, nous pouvons corriger la transformation en repère cartésien (équation 4) avec le changement de repère dû au mouvement du lidar. Les échos corrigés E_c deviennent :

$$\begin{aligned} E_c &= \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_\alpha \\ Y_\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \cos(\theta_\alpha) & \sin(\theta_\alpha) & 0 \\ \sin(\theta_\alpha) & \cos(\theta_\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega)\cos(\alpha) \\ \cos(\omega)\sin(\alpha) \\ \sin(\omega) \end{bmatrix} * Distance \quad (6) \end{aligned}$$

Les matrices du changement de repère sont à calculer pour chaque nouvel α , au fur et à mesure de l'acquisition du scan.

2.3 Évaluation des déformations

Le type de déplacement du véhicule, linéaire ou de rotation, n'influence pas de la même manière les déformations lidar :

- Lors d'un déplacement linéaire (figure 4) : nous projetons les points lidar dans le repère de fin de la trajectoire $Trajlidar$, c'est à dire quand $\alpha_{lidar} = 360^\circ$. La déformation est alors minimale, alors qu'elle est maximale pour le début du scan $\alpha_{lidar} = 0^\circ$. Par rapport au déplacement du véhicule, avec le sens de rotation du lidar utilisé, les scans seront beaucoup plus déformés à droite qu'à gauche.
- Lors d'un déplacement en courbe : la rotation du lidar s'ajoute à la rotation du véhicule (figure 5). Comme le montre la figure 3b, selon le sens de rotation du véhicule, les raies lidar vont couvrir plus de 360° et dans ce cas des objets de la scène seront numérisés deux fois (en début et fin de scan) ou bien moins de 360° et une partie de la scène manquera. Évidemment, ce qui n'a pas été numérisé ne pourra pas être reconstitué, mais l'étape de correction doit corriger ce décalage angulaire.

La trajectoire d'un véhicule combinant les deux types de mouvements les déformations sont donc entremêlés.

2.4 Reconstruction

Pour évaluer la reconstruction 3D nous utilisons l'outil 3DTK¹. Il comporte deux phases :

1. <http://slam6d.sourceforge.net/>

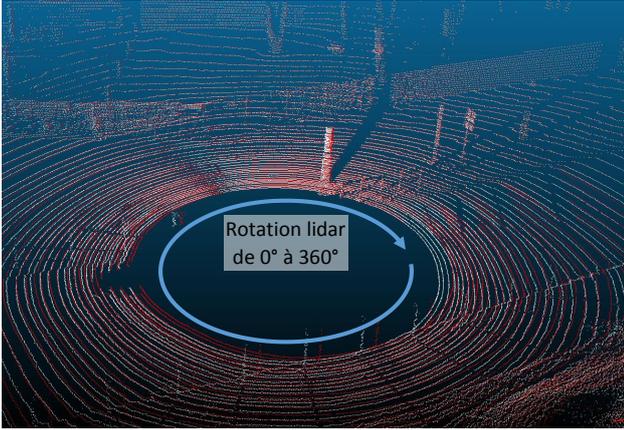


FIGURE 4 – Déformation des scans lidar due à une translation du véhicule à une vitesse de 10m/s. Scan brut (blanc) et scan corrigé par l'odométrie (rouge) : les déformations sont faibles pour $\alpha_{lidar} = 360^\circ$, les objets sont confondus ; alors que pour $\alpha_{lidar} = 0^\circ$ les déformations sont d'environ 1m, les poteaux au premier plan sont décalés d'1m.

Mode	GPS RTK	60s sans GPS
True Heading ($^\circ$)	0.01	0.01
Roulis/Tangage ($^\circ$)	0.005	0.005
Position X,Y (m)	0.02	0.1
Position Z (m)	0.05	0.07

TABLE 1 – Précision de la localisation du coffre de toit

- Dans un premier temps, un appariement des scans consécutifs deux à deux, basé sur une méthode optimisée [5] d'ICP (*Iterative Closest Point* [6]).
- Dans un second temps, une phase de recherche de fermeture de boucle [7] afin de réaliser une optimisation globale du nuage de points.

L'outil nécessite des fichiers de *points 3D* pour chaque scan, eux-mêmes associés à des fichiers de *pose*. Ces derniers servent de pose initiale à la convergence de l'algorithme d'ICP.

3 Expérimentation

Nous disposons d'un moyen de référence de trajectographie embarquée sur un véhicule routier (figure 6). Il est équipé de différents instruments :

- IMU à *FOG* : Landins IxBlue
- Un GPS RTK différentiel Proflex 800
- Un odomètre Peiseler installé sur la roue arrière
- Un lidar multi-nappes HDL64e
- PC embarqué i7-3610, SSD 1 To

La précision de son positionnement est donnée dans la table 1.

L'odométrie linéaire Δx est obtenue directement des capteurs d'*ABS* par lecture du *bus CAN* du véhicule. Le taux de rotation $\Delta \theta$ est fourni par le gyromètre de l'*ESP*.

Un ensemble de base de données a été enregistré dans un

environnement péri-urbain couvrant les différents types de mouvements.

Le système de coordonnées géodésiques *WG84* retourné par la centrale inertielle est converti selon une projection cylindrique *Universal Transverse Mercator (UTM)*, afin de travailler dans un repère cartésien.

Nous utilisons le *framework RTMaps*² pour l'acquisition synchronisée des données du coffre de toit et du *bus CAN*. Un composant *RTMaps* permet en post-traitement l'extraction d'un scan 3D et d'un fichier de *pose* issu des données de la centrale inertielle.

4 Résultats

Comme le montre la figure 4, pour un déplacement majoritairement linéaire, le décalage obtenu par l'algorithme par rapport à un scan correspond bien à la distance parcourue par le véhicule pendant T_s . De même pour les déplacements comprenant une forte rotation sur la figure 5 ; la barrière qui était vue deux fois sur la figure 5a, est correctement recalée figure 5b.

Cette évaluation reste qualitative. La mise en place de métriques pour objectiver la performance de la méthode n'est pas forcément évidente. Nous proposons deux idées :

- L'appariement de scans en mouvement est perturbé par les déformations qui s'y produisent. Nous proposons donc d'utiliser l'erreur de distance point à point d'un algorithme ICP lors de l'appariement des scans successifs.
- La reconstruction 3D est moins « étalée » avec des scans correctement corrigés. Nous proposons d'échantillonner le nuage de points obtenu pour en déterminer le volume occupé.

Ces deux idées sont développées pour les deux types de mouvements : linéaire et rotation. Un ICP est calculé entre deux scans successifs, les distances d'erreur résultantes sont présentées sur la figure 8. Nous pouvons noter que l'écart entre les scans bruts ou corrigés n'est pas très significatif. Effectivement, d'un point de vue de l'appariement, la déformation n'affecte pas forcément tous les points. L'appariement de deux scans déformés contiendra toujours un grand nombre de points en commun, bien que d'un point de vue géométrique, ils ne soient pas à la position réelle de leur mesure physique ; ce qui pose problème pour la constitution d'une carte.

La différence est encore plus faible pour le déplacement linéaire (figure 8b). Effectivement, comme nous l'avons expliqué précédemment, deux scans successifs auront subi les mêmes déformations (cf figure 4) et leur appariement se déroulera correctement. Si le sens de déplacement du véhicule était inversé entre les 2 scans, les déformations entre la droite et la gauche auraient fortement nui à la distance d'ICP.

Pour chaque type de déplacement, nous avons reconstruit l'environnement 3D puis échantillonné le nuage de points obtenu à l'aide d'un octree (figure 7) comportant des cases

2. <https://intempora.com/products/rmaps.html>

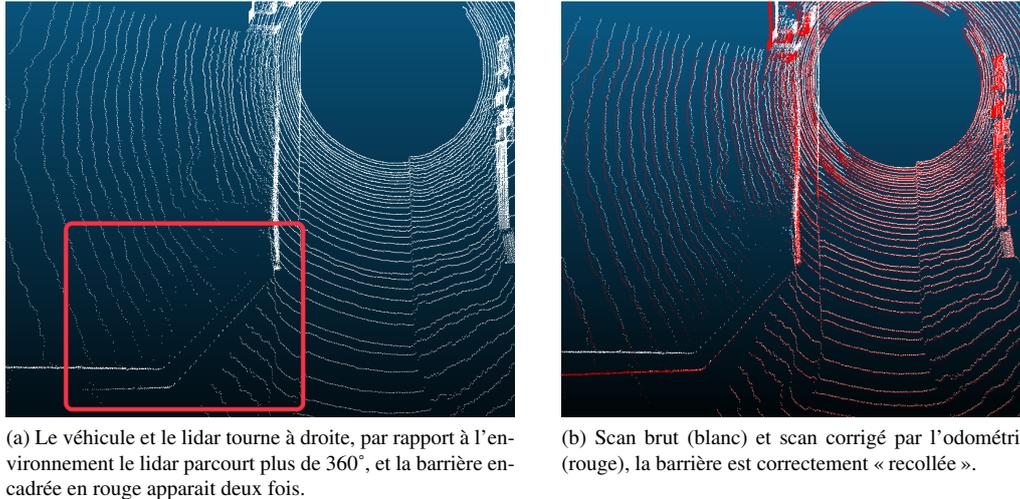


FIGURE 5 – Déformation des scans lidar due à la rotation du véhicule à droite à la vitesse de 25°/s.

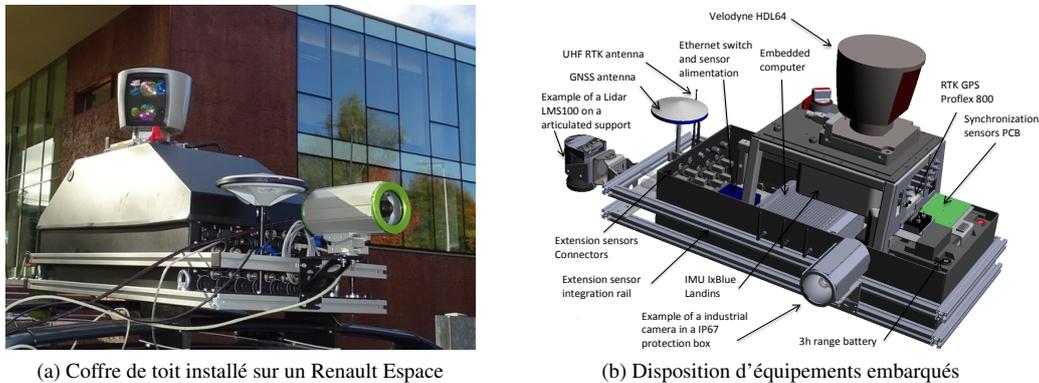


FIGURE 6 – Coffre de toit de référence de l'Irseem utilisé pour les expérimentations. Il est équipé d'un dispositif de positionnement centimétrique et du lidar 64 nappes Velodyne HDL64.

TABLE 2 – Approximation des reconstructions par un octree : nombre de cases de $0.1 \times 0.1m$ occupées.

Type de mouvement	Scans bruts	Scans corrigés
Linéaire (10m/s)	1918170	1894744
Rotation (25°/s)	654488	639094

de 0.1m de côté. Le nombre de cases occupées nous permet de déterminer le volume occupé par la reconstruction. Les résultats sont donnés dans la table 2. De la même manière que précédemment, seuls les points bruts très déformés et se retrouvant dans un espace vide de l'environnement, comme la barrière dupliquée des figures 5a et 7, viennent ponctuer les écarts avec le nuage corrigé.

Pour valider qualitativement cette étude, nous avons procédé à une reconstruction 3D de l'ensemble de notre campus CISE à l'aide des scans corrigés, figure 9. Elle est constituée de 225 scans du lidar *Velodyne HDL64* et couvre un volume de $408 \times 275 \times 50m$. Le nuage de points obtenu

est de bonne qualité (les lignes sont bien droites, les poteaux de chaque côté de la chaussée sont alignés ...), et nous permettra de constituer notre carte de localisation.

Conclusion et perspectives

Malgré ce que nous aurions pu penser, ce ne sont pas les mouvements de types courbes à vitesse modérée qui génèrent les plus grandes déformations. Les lignes droites rapides et les manoeuvres à basse vitesse entraînent de forts taux de rotation qui sont donc plus impactants.

Bien que les métriques mises en oeuvre soient perfectibles, elles permettent tout de même de mettre en évidence la meilleure géométrie des scans redressés. Afin de mieux objectiver la performance de la méthode, il faudrait numériser l'environnement statique, par exemple avec une station scanner de type *Leica C10*³. Cela permettrait la comparaison des scans ayant subi une déformation par le mouvement du véhicule, puis corrigés par notre méthode avec ce

3. http://www.leica-geosystems.fr/fr/Leica-ScanStation-C10_79411.htm

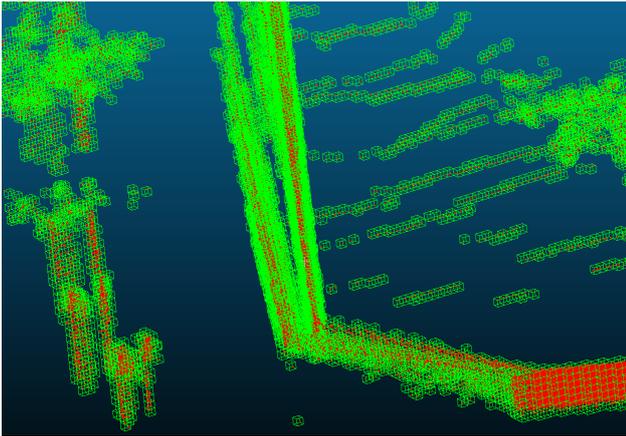


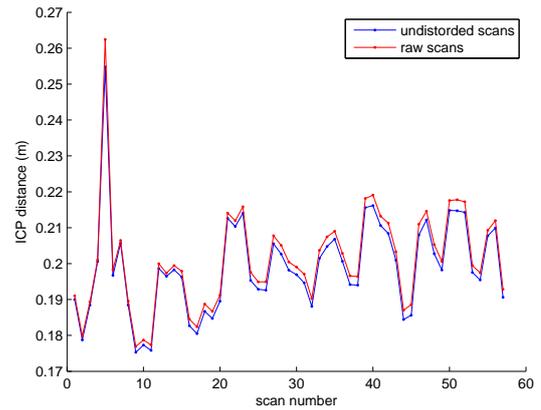
FIGURE 7 – Reconstruction 3D du mouvement de rotation échantillonnée par un octree comportant des cases d'0.2m de côté, afin d'illustrer le principe de la table 2. La barrière dupliquée (cf figure 5a) dans le nuage déformé (*en rouge*) est échantillonnée par des cellules de l'octree que l'on ne retrouvera pas dans la reconstruction basée sur les scans corrigés.

nuage de points de référence.

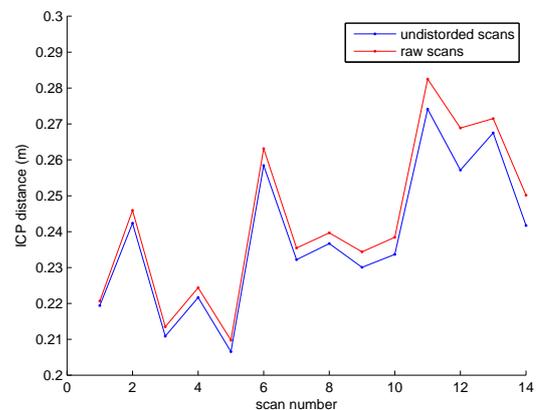
Nous avons réalisé une correction de déformation de scans lidar simple, par une estimation du mouvement en 2.5D. Le temps de calcul se limite à une transformation par point, et la détermination de cette transformation pour chaque angle azimut échantillonné par le lidar. Les performances atteintes sont suffisantes pour reconstruire des cartes 3D d'environnements vastes.

Références

- [1] P. Merriaux, Y. Dupuis, R. Bouteau, P. Vasseur, and X. Savatier, "Localisation robuste en milieu industriel complexe." Lyon, France : Grets, September 8-15, 2015 2015.
- [2] J. Zhang and S. Singh, "Visual-lidar odometry and mapping : Low-drift, robust, and fast," in *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 2174–2181.
- [3] F. Moosmann and C. Stiller, "Velodyne slam," in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*. IEEE, 2011, pp. 393–398.
- [4] H. Dong, "Performance improvements for lidar-based visual odometry," Ph.D. dissertation, University of Toronto, 2013.
- [5] A. Nüchter, "Parallelization of scan matching for robotic 3d mapping." in *EMCR*, 2007.
- [6] P. J. Besl and N. D. McKay, "Method for registration of 3-d shapes," in *Robotics-DL tentative*. International Society for Optics and Photonics, 1992, pp. 586–606.
- [7] J. Sprickerhof, A. Nüchter, K. Lingemann, and J. Hertzberg, "An explicit loop closing technique for 6d slam." in *EMCR*, 2009, pp. 229–234.



(a) 58 scans sur un déplacement linéaire à 10m/s.



(b) 16 scans sur un déplacement en rotation à 25°/s.

FIGURE 8 – Résultats de la distance d'appariement entre scans consécutifs avec un algorithme ICP.

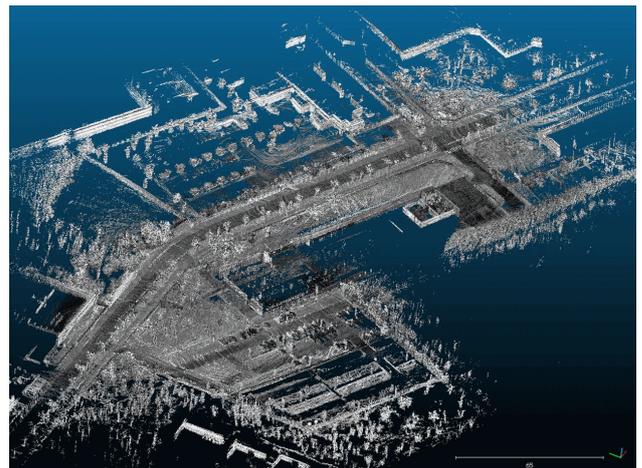


FIGURE 9 – Première reconstruction 3D du Campus CISE de l'Esigelec obtenue avec le coffre de toit et son lidar *Velodyne HDL64* à partir de 225 scans. Les niveaux de gris représentent la réflectance des impacts lidar. Le volume reconstitué est de $408 \times 275 \times 50m$.