

SLAM : un cheminement polygonal pour du relevé mobile

■ Jérôme NINOT

Nous entendons tous parler de SLAM et nous avons tous une compréhension plus ou moins précise de ce que représente cette famille algorithmique initialement développée pour la robotique mobile et les véhicules autonomes. Ces algorithmes sont apparus dans le domaine de la topographie et du scan 3D dynamique, permettant de réaliser rapidement des mesures massives. Cependant, ces nouvelles technologies ne sont pas sans rappeler certaines méthodologies, on peut alors faire une analogie entre les principes du SLAM et des techniques topométriques plus traditionnelles : pour maîtriser techniquement le principe du scan dynamique SLAM et en connaître les limites, nous proposons dans cet article de comparer le SLAM aux techniques de relevé traditionnel par cheminement polygonal, donnant ainsi une compréhension opérationnelle du relevé dynamique. Nous abordons le sujet du scan dynamique à travers un cas concret d'un relevé d'intérieur massif.

MOTS-CLÉS

SLAM, scan dynamique, taux de dérive, cheminement, relevé d'intérieur

Le "SLAM", cet acronyme qui fait son apparition au sein de la profession de géomètre-topographe autour des années 2010, bouleverse les méthodes de travail et les capacités de mesure en permettant de réaliser des mesures en dynamique : le temps passé sur site pour un relevé 3D n'a pas d'égale. Cet acronyme qui signifie "Simultaneous Localization And Mapping" représente une famille algorithmique (calculs logiciels) donnant la capacité à un mobile de se localiser dans une carte qu'il enrichit au fur et à mesure de son

déplacement. C'est donc un procédé itératif auto-contraint : le modèle dans lequel se localise le mobile dépend de sa localisation précédente et de la compréhension de son environnement à l'instant précédent. Quatre étapes majeures constituent un algorithme SLAM :

- 1- estimation du déplacement (figure 1) ;
- 2- extraction des nouveaux amers¹ (figure 2) ;
- 3- recherche de correspondances

¹ Amer : un point de référence utilisé dans l'algorithme et dont sa caractéristique dépend du type de capteur utilisé

des nouveaux amers avec la carte d'amers (figure 3) ;

- 4- correction de la pose estimée et mise à jour de la carte d'amers (figure 4).

Ces amers peuvent être de différentes natures, issus de descripteurs ou non. Leur nature varie selon le type de capteur(s) de perception (vision, LiDARs, etc.) utilisé(s) au cœur de l'algorithme. Tels une constellation d'étoiles ou même une constellation de satellites GNSS, ces amers sont les points de référence que le mobile utilise pour se localiser.

Ainsi, un algorithme SLAM produit une succession de mesures de déplacement

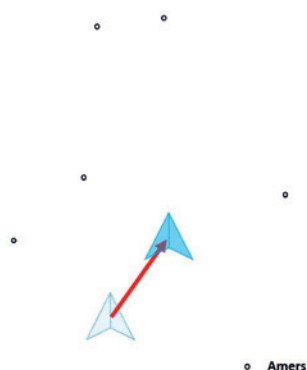


Figure 1. Étape 1 estimation de la nouvelle position à un instant t.

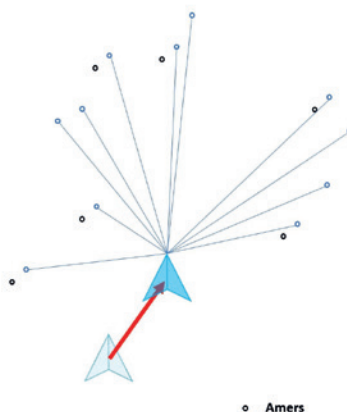


Figure 2. Étape 2 extraction des nouveaux amers issus des données d'un capteur de perception.



Figure 3. Étape 3 appariement des amers par couple (algorithme ICP).



Figure 4. Étape 4 calcul de l'erreur de position en déterminant la transformation inverse issue de l'ICP. La carte dispose désormais de nouveaux amers.

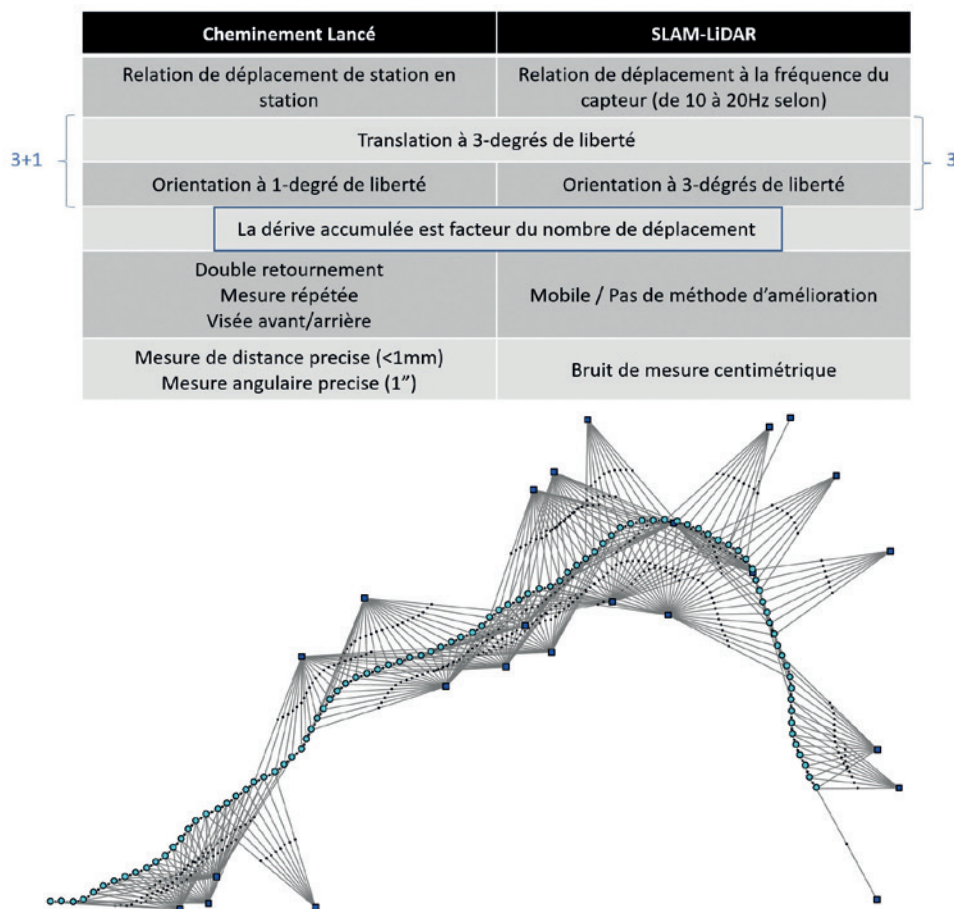


Figure 5. Graphe de contraintes. Image issue de (Kaess & Dellaert, 2017)³

dans l'espace (6 degrés de liberté) i.e. une relation de proche en proche à la fréquence du capteur, en partant d'une pose² initiale arbitraire en coordonnée locale. Chaque relation intégrant un bruit même très minime, la dérive finale cumule un ensemble de petites erreurs. On parle alors du taux de dérive global τ de l'algorithme, le rapport entre la somme des erreurs et la distance curviligne D parcourue.

$$\vec{\partial}_t^{\text{mesuré}} = \vec{\partial}_t^{\text{reel}} + \vec{\varepsilon}_t$$

$$\tau = \frac{\|\sum_{t=T_0}^T \vec{\varepsilon}_t\|}{D} ; D = \sum_{t=T_0}^T \|\vec{\partial}_t^{\text{reel}}\|$$

Cet ensemble de relations de proche en proche, par l'intermédiaire des amers successivement appariés, constitue un graphe de contraintes (figure 5) qui peut être enrichi d'informations complémentaires. Dans le cas d'un cheminement topométrique, nous retrouvons, de

2 Pose : vecteur positionné dans l'espace représentant l'état du mobile dans l'espace (position et orientation)

3 Kaess, M., & Dellaert, F. (2017). Factor Graphs for Robot

manière analogue, le fait de réaliser des mesures successives permettant de positionner une nouvelle station par rapport à une autre, en déterminant une nouvelle pose dans l'espace, mais cette fois-ci à 4 degrés de liberté par l'intermédiaire d'une contrainte de gisement et de distance.

Le tableau ci-dessus résume les analogies entre SLAM-LiDAR et cheminement lancé. Le cheminement lancé est très comparable au SLAM-LiDAR sans boucle. Le taux de dérive s'accumule au fur et à mesure que le nombre de stations augmente.

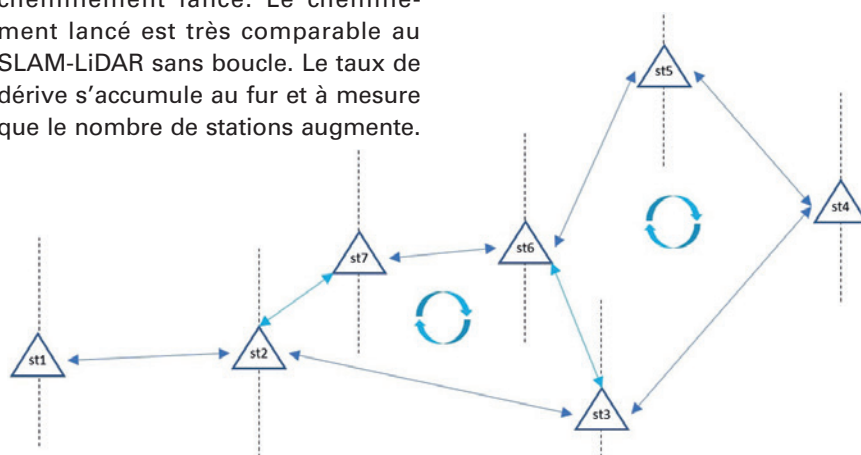


Figure 6. Cheminement polygonal, l'équivalent de la fermeture de boucle topométrique pour réduire les dérives d'un cheminement lancé (en antenne).

Seulement, dans le cas du SLAM-LiDAR, l'équivalent d'une station pourrait être une trame LiDAR. Dans le cas d'un LiDAR produisant dix trames par seconde, le taux de dérive lié au nombre de stations et du nombre de fois que l'on estime son déplacement au cours du temps est le facteur majeur qui implique que le taux de dérive d'un algorithme SLAM est bien supérieur à celui obtenu sur un cheminement lancé. Un algorithme SLAM peut également se doter d'un algorithme de fermeture de boucle lui permettant de réduire son taux de dérive lorsque le mobile est en capacité de "revenir" dans une zone connue. En topométrie, ce cheminement lancé devient alors un cheminement polygonal réduisant ainsi les erreurs cumulées. À chaque fois qu'une nouvelle station, positionnée par rapport à la station précédente, peut "reboucler" et réaliser une seconde mesure par rapport à une station plus ancienne, de nouvelles contraintes s'ajoutent au calcul pour optimiser l'ensemble et réduire la dérive cumulée au sein de cette boucle (figure 6). L'algorithme de fermeture de boucle du SLAM-LiDAR est similaire, en ce sens qu'il doit pouvoir "répartir" l'erreur observée sur l'ensemble des déplacements réalisés au sein de cette boucle (figure 7 et figure 8). Cette répartition est appelée la compensation d'erreur.

Il est alors possible d'enrichir un ou plusieurs relevés topométriques précédents par des compléments en réalisant de nouvelles stations, elles-mêmes rattachées à une ou plusieurs stations plus anciennes. Dans ce cas, les calculs sont



Figure 7. La fermeture de boucle en SLAM-LiDAR pour réduire le taux de dérive.

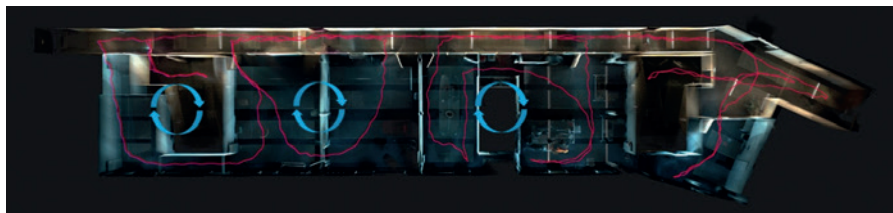


Figure 8. Fermetures de boucle multiples.

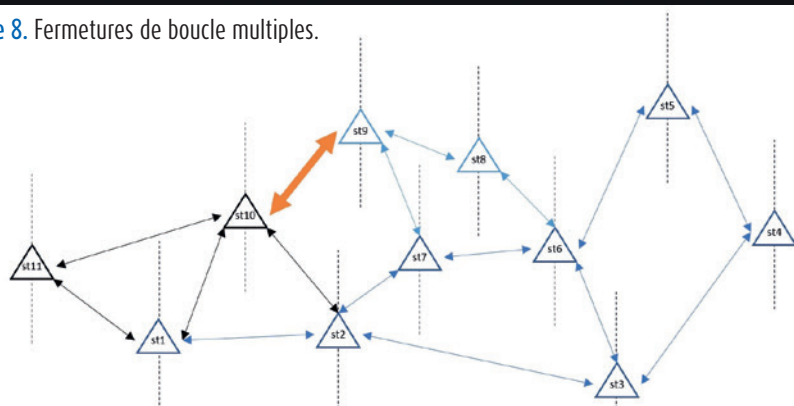


Figure 9. Mesures additionnelles pour enrichir le projet initial, avec rattachements multiples avec le projet initial ET entre les nouvelles stations.

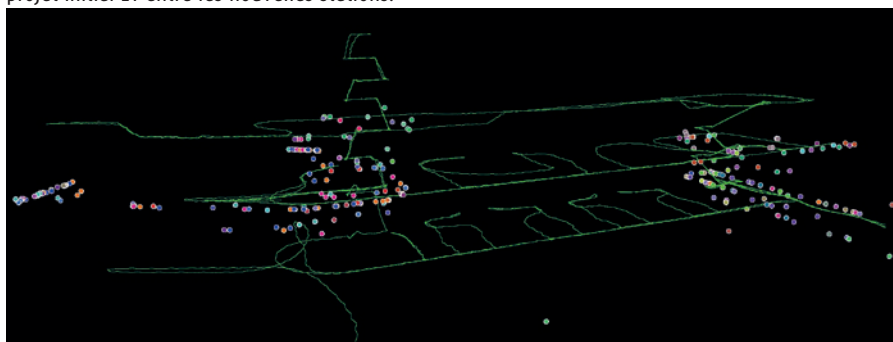


Figure 10. Contraintes entre 3x scans et ajustement global via de nouvelles contraintes entre les scans.

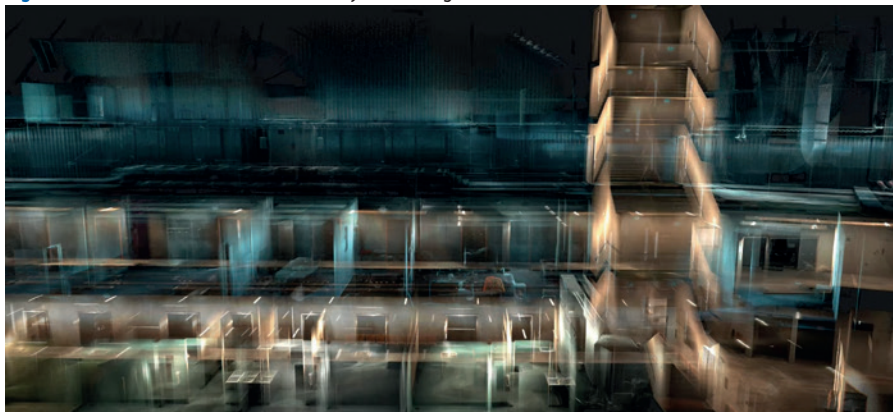


Figure 12. Relevé indoor avec technologie SLAM, constitué de 3x scans distincts (1x par étage), compensé globalement via les zones de recouvrement dans les deux cages d'escaliers pour constituer un nuage de points global.

scan #	1	2	3
1	62		
2	40	116	
3	16	38	55

Figure 11. Nombre de contraintes au sein de chaque scan, et nombre de contraintes entre les scans qui ont servi au rattachement et à la compensation globale.

très similaires à la fermeture de boucle, en venant constituer de nouvelles contraintes au graphe global. Chaque cheminement indépendant se rattache à un cheminement primaire, mais peut également se rattacher à d'autres cheminements secondaires (figure 9).

Et le rattachement global...

Enfin, le cheminement topométrique peut être rattaché à des points connus pour constituer une nouvelle famille de contraintes : des contraintes en position. Ces contraintes peuvent être utilisées dans le cadre d'un positionnement du projet global avec une transformation rigide (transformation d'Helmert), mais peuvent également participer à la compensation globale de chaque relevé. La position et l'orientation des stations deviennent alors optimisées dans le calcul pour respecter au mieux toutes les contraintes. Le SLAM permet également ce genre de compensation en intégrant des contraintes dites "absolues". Deux conséquences directes en découlent : 1- changement de repère, pour travailler dans un système de projection donné ; 2- minimisation des erreurs et réduction du taux de dérive de grande échelle.

L'intérêt lorsque le scanner 3D mobile SLAM dispose d'un récepteur GNSS est qu'il a la possibilité de générer ses propres contraintes absolues, éliminant ainsi, de fait, drastiquement le taux de dérive sur l'ensemble du projet lorsque ce scan extérieur est rattaché aux multiples scans intérieurs. Sur la figure 14, on observe un projet de relevé massif via le système mobile MS-96, constitué de seize scans indépendants, rattachés entre eux, comme le montre le tableau de la figure 15. Le site en question est un site de près de 6 000 m² sur un parc de 8,5 ha. Les seize scans cumulent 2 heures et 13 minutes de données avec 47 zones de recouvrement (figure 16).



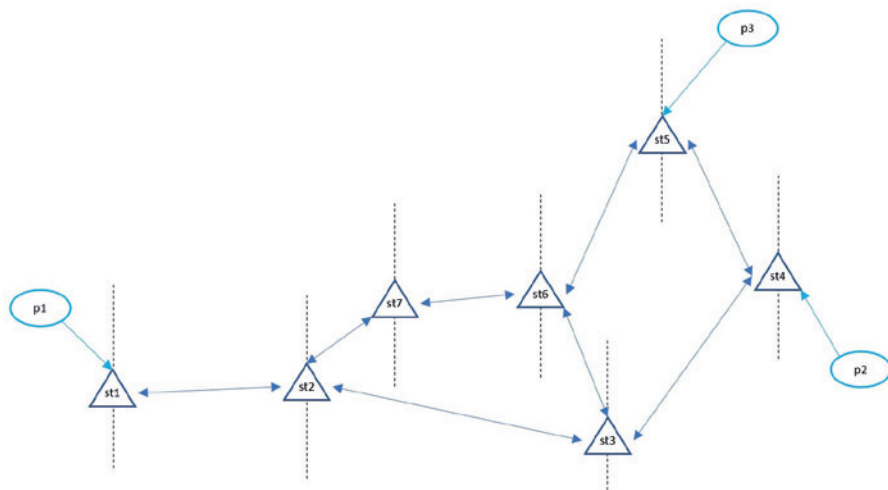


Figure 13. Contraintes absolues sur un cheminement polygonal par l'insertion de points connus dans le calcul.



Le scan SLAM-LiDAR est une méthode de relevé 3D particulièrement efficace et précise si l'on connaît ses limites et comment les contraindre : le taux de dérive du SLAM est généralement similaire pour un type d'environnement donné. On considère actuellement que le taux de dérive d'un SLAM-LiDAR fluctue

entre 0,2 % et 1,0 % en fonction de l'environnement (la répartition spatiale et la portée des amers influent directement sur la précision du calcul, plus les amers sont éloignés et répartis, plus grande est la précision). Ce taux de dérive peut être corrigé avec une bonne méthodologie, en constituant des boucles et en apportant des contraintes absolues. Les contraintes absolues sont nécessaires sur un relevé massif pour pouvoir compenser les dérives de grande échelle. Le SLAM-LiDAR dispose finalement des mêmes contraintes que le relevé traditionnel par station totale, avec des performances égales si l'utilisateur est conscient des limites. ●

scan #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1																
2	X															
3	X	X														
4																
5	X	X	X	X												
6	X	X	X	X	X											
7	X	X	X	X	X	X										
8																
9	X	X					X	X	X							
10	X						X	X	X	X						
11										X	X	X				
12				X						X	X					
13	X	X	X	X	X	X	X	X	X							
14	X															
15					X	X	X				X	X				
16					X											

Figure 15. Tableau des rattachements, chaque croix informe qu'il existe une ou plusieurs zones de recouvrement entre deux scans.

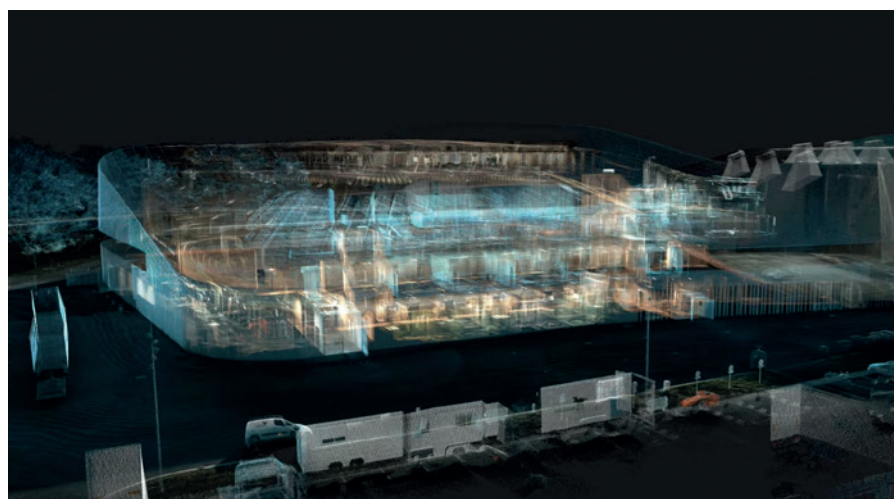


Figure 17. Nuage de points colorisé du site, rattaché dans le système RFG 93 en projection Lambert conique conforme grâce à l'intégration des contraintes absolues.



Figure 14. Contraintes absolues intégrées lors d'un relevé SLAM dans la compensation globale : les contraintes absolues sont des points GNSS-PPK. Chaque pastille de couleur représente une contrainte en position.



Figure 16. Aperçu des trajectoires pour réaliser le scan massif d'un site : les trajectoires vertes sont celles avec contraintes absolues, les trajectoires bleues permettent de rattacher l'intérieur et l'extérieur, les trajectoires rouges sont toutes les trajectoires intérieures.

ABSTRACT

We've all heard of SLAM, and we all have a more or less precise understanding of what this algorithmic family represents, originally developed for mobile robotics and autonomous vehicles. These algorithms have appeared in the field of topography and dynamic 3D scanning, enabling the rapid realization of massive measurements. However, these new technologies are reminiscent of certain methodologies, and an analogy can be drawn between the principles of SLAM and more traditional topometric techniques: to gain a technical grasp of the principle of SLAM dynamic scanning and to understand its limitations, we are proposing in this paper to compare SLAM with traditional polygonal traverse surveying techniques, thus giving an operational understanding of dynamic surveying. The subject of dynamic scanning through the case study of a massive indoor survey will be approached.

Contact

Jérôme NINOT,
VIAMETRIS, jninot@viametris.fr