

## Consolidation de relevés laser d'intérieurs construits : pour une approche probabiliste initialisée par géolocalisation

■ Jean-François HULLO

*Jean-François HULLO, lauréat du prix de l'AFT 2008-2009 (voir XYZ n°122 page 17), a soutenu le 10 janvier 2013 l'INSA de Strasbourg une thèse de doctorat en Sciences de l'ingénieur. Cette thèse CIFRE (Convention industrielle de formation par la recherche) a été financée conjointement par l'ANRT (Association nationale de la recherche et de la technologie) et EDF R&D (Recherche et développement) sur la période janvier 2010 - janvier 2013. Elle a été co-encadrée par le groupe TRIO-PAGE du LSIT (Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection Strasbourg) et le département SINETICS (Simulation neutronique, technologies de l'Information et calcul scientifique) à EDF R&D (Clamart).*

### ■ MOTS-CLÉS

consolidation, scanner laser terrestre, environnements industriels, géolocalisation, approche probabiliste, primitives géométriques, appariement

en environnements industriels d'une part en étudiant les moyens d'acquisition et d'autre part en développant les méthodes de consolidation. Celles-ci doivent garantir la précision et l'exactitude nécessaires des données et optimiser le temps et les protocoles d'acquisition sur site en libérant l'opérateur d'un certain nombre de contraintes inhérentes au relevé topographique classique.

Nous avons dans un premier temps examiné les moyens et méthodes actuellement mis en œuvre lors de l'acquisition de nuages de points denses de scènes d'intérieurs complexes (partie I du mémoire). Puis nous avons étudié et évalué les données utilisables pour la consolidation : données laser terrestres, algorithmes de reconstruction de primitives et systèmes de géolocalisation d'intérieur (partie II). Nous avons ensuite formalisé et expérimenté un algorithme de recalage basé sur l'utilisation de primitives reconstruites dans les nuages de points (partie III). Nous avons enfin proposé une approche probabiliste de l'appariement de primi-

La préparation d'interventions de maintenance dans les installations industrielles a dorénavant recours à des outils d'étude et de simulation exploitant des modèles virtuels 3D des installations. L'acquisition de ces modèles s'effectue par scanner laser terrestre à balayage angulaire horizontal et vertical d'un faisceau laser par scanner laser terrestre. Dans le cas de l'acquisition de nuages de points 3D denses d'installations complexes, plusieurs points de vue, appelés stations, sont nécessaires à l'exhaustivité des données du relevé. L'expression dans un repère commun de l'ensemble des données acquises est appelée *consolidation*. Le terme *recalage* est employé lorsque le repère d'expression est le repère de l'une des stations de mesures. Le terme *référencement* est utilisé lorsque le repère d'expression est extérieur aux données laser. Au cours de ce processus, les paramètres de changement de repères entre les stations sont calculés (paramètres de poses).

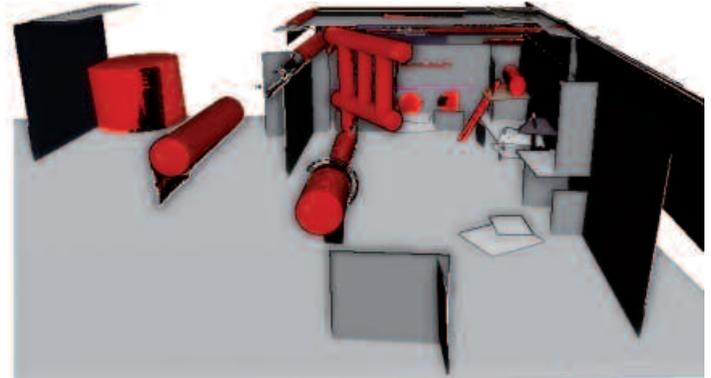
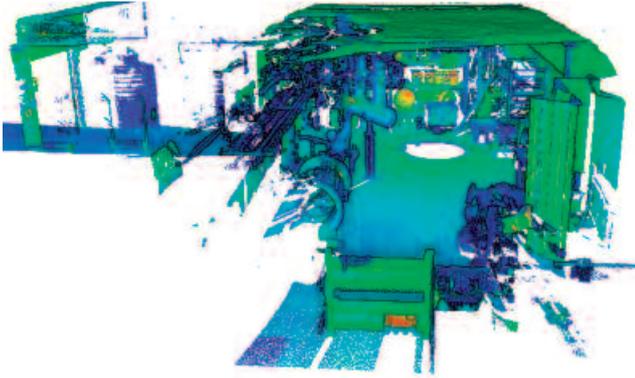
Les moyens et méthodes mis en place au cours du levé et lors du traitement des mesures sont choisis par le topographe pour répondre au mieux aux critères de précision et d'exactitude spécifiés par l'utilisateur, tout en s'adaptant aux contraintes induites par l'environnement de la scène. A l'heure actuelle, le cheminement topographique est principalement utilisé pour la consolidation des points de vue et représente la seule méthode capable de garantir la qualité des données référencées.

Au vu des performances sans cesse améliorées des scanners laser terrestres typiquement, une densité et une précision quasi millimétriques à 5 mètres, pour un temps d'acquisition de moins de 10 minutes avec l'intervention d'un seul topographe, la lenteur du cheminement topographique limite le nombre de campagnes d'acquisition des sites industriels en maintenance.

L'objectif de la thèse est d'améliorer la méthode d'acquisition de données laser

### Le jury de la thèse était constitué de :

**Pierre Grussenmeyer**, Professeur des Universités à l'INSA, Directeur de thèse  
**Tania Landes**, Maître de Conférences à l'INSA, co-encadrant  
**Guillaume Thibault**, Chercheur Senior à EDF R&D, co-encadrant industriel  
**Bertrand Merminod**, Professeur EPF de Lausanne, rapporteur  
**Jacques Droulez**, Directeur de Recherches, Collège de France, rapporteur  
**Daniel Bennequin**, Professeur des Universités, Université Paris 7, examinateur  
**Thomas Chaperon**, Docteur, Trimble France, examinateur



Reconstruction automatique de primitives par Ransac. Vue du nuage de 5 millions de points en pseudo-couleurs d'intensité (à gauche) et des plans et cylindres automatiquement reconstruits par Ransac (à droite).

tives afin de permettre l'intégration des informations et incertitudes *a priori* dans le système de contraintes utilisé pour le calcul des poses (partie IV).

Aucune des nombreuses approches développées à ce jour pour la consolidation de nuage de points par minimisation de contraintes ne répond en tous points aux critères des levés d'installations industrielles. Étant donnée la proximité entre le scanner et bon nombre des objets de la scène, tout déplacement de l'appareil de mesure induit des différences importantes entre les nuages de points acquis. Ainsi, l'étendue et la complexité des scènes empêchent l'utilisation d'algorithmes basés sur l'établissement de contraintes entre les points du nuage, que ce soit en représentation cartésienne (*Iterative Closest Point* et variantes) ou en représentation polaire (utilisation des images d'intensité ou de profondeur). L'utilisation de cibles (sphères ou damiers) placées dans la scène, puis reconstruites à partir des données, permet d'utiliser ces points d'intérêts pour contraindre le calcul des poses. Mais la nécessité pour cette approche d'en disposer dans l'environnement en nombre défini et dans des configurations favorables rend parfois lourde son utilisation, notamment dans les corridors ou les successions de pièces qui limitent la visibilité.

Parmi les nombreuses évolutions dans le domaine de l'acquisition de modèles tridimensionnels, deux d'entre elles ouvrent de nouvelles perspectives pour la consolidation de données scanner laser acquises en environnements intérieurs complexes. D'une part, les algorithmes de reconstruction automatique (ou semi-automatique) de primi-

tives 3D (cylindres, sphères, plans, cônes et tores) dans des nuages de points ont émergé au cours des dernières années suggérant l'emploi de ces primitives reconstruites comme des "cibles naturelles" pour la consolidation. Nous avons évalué deux algorithmes de reconstruction de primitives dans des nuages de points d'intérieurs complexes (l'un automatique : Ransac, l'autre semi-automatique : croissance de région). Des données ont été acquises au cours de la thèse (8 stations de 25 millions de points chacune) et représentent correctement les installations industrielles, objet de nos travaux. L'analyse des résultats expérimentaux confirme la qualité des primitives reconstruites par ces algorithmes dont les évolutions constantes permettent d'envisager leur amélioration au cours des années à venir.

D'autre part, plusieurs sources potentielles d'information *a priori* (valeurs et incertitudes) des paramètres de poses ont été identifiées. L'utilisation de compensateurs bi-axiaux, garants de l'horizontalité du plan de rotation du scanner, simplifie le modèle géométrique du référencement. Par ailleurs, les technologies actuelles de géolocalisation d'intérieur ne cessent de gagner en précision et en exactitude. Nous avons évalué les performances de trois de ces systèmes pour l'approximation des paramètres de pose.

- Le premier système repose sur les capacités du topographe à indiquer la position d'un point sur un plan d'ensemble. Dans le but d'intégrer cette information d'ores et déjà présente dans les *croquis de terrain*, nous avons proposé une expérience de pointé sur plan à une quinzaine

d'étudiants ingénieurs topographes. - Les deuxième et troisième systèmes testés utilisent des capteurs magnétiques. Pour l'un, une centrale inertielle, nous avons proposé et évalué la mesure du champ magnétique terrestre pour la détermination du cap. Pour l'autre, un prototype magnéto-inertiel de la société Sysnav, nous avons testé les capacités de calcul de trajectoire par détection de changement du champ magnétique local.

Grâce à ces expériences, nous avons pu définir une plage vraisemblable d'incertitude des valeurs approchées des paramètres de pose. Bien que trop incertains pour mesurer les poses des stations de mesures, ces capteurs offrent de fait une approximation, enrichie par la connaissance de l'incertitude *a priori* des paramètres de pose.

Afin d'utiliser les primitives les plus représentées dans les scènes industrielles (cylindres, plans et sphères) lors du calcul des paramètres de poses, nous avons détaillé les représentations géométriques de trois entités (point, plan et ligne). Ces entités sont les parties sensibles aux changements de repères à 4 paramètres des primitives. En formulant l'influence d'un changement de repère sur les coordonnées de ces entités, nous avons ensuite pu décrire les contraintes qu'induit une paire d'entités appareillées. La minimisation par les moindres carrés pondérés de ce système de contraintes a été testé sur deux scènes représentatives des milieux industriels : un corridor et un grand hall. En simulant, par tirage aléatoire, l'incertitude a priori des primitives extraites et des approximations des paramètres de pose dans les





plages observées précédemment, nous avons pu décrire le comportement de l'algorithme dans les deux cas de figures évalués. Cette étude nous a permis de confirmer la validité de l'approche tout en soulignant deux limites actuelles : la nécessité d'exactitude de tous les appariements et l'utilisation trop partielle de l'information a priori dans l'estimation des inconnues.

L'approche proposée de consolidation basée sur les primitives géométriques se décompose donc en quatre étapes : Acquisition - Reconstruction - Mise en correspondance - Résolution. Il est apparu que la troisième étape conditionne la performance de la quatrième. Une approche probabiliste a été proposée pour améliorer la description des appariements et y intégrer les informations d'incertitude *a priori*. La question à laquelle répond cette approche est la suivante : "étant donnée une transformation *a priori* incertaine entre deux stations, quelle est la vraisemblance qu'une entité de la première station corresponde à une des entités de la seconde ?"

Afin de décrire le plus correctement possible l'incertitude du cap, ou orientation de la station, nous utilisons une distribution de von Mises. Les paramètres de position de la pose sont décrits par des lois normales. En propageant l'incertitude d'un changement de repère incertain sur les coordonnées des entités transformées, nous introduisons la notion de score probabilisé d'appariement. Nous appliquons ces concepts au cas d'une ligne 3D pour laquelle nous avons défini une représentation spécifique,

appelée DHM (Denavit-Hartenberg Modifiée). Des simulations de type Monte-Carlo ont permis de s'assurer de la validité du modèle d'incertitudes *a posteriori* sur les coordonnées de cette représentation. Des tests ont également été réalisés sur les données réelles acquises au cours de la thèse. Enfin, en vue de vérifier la cohérence globale des appariements d'une scène, nous avons introduit les entropies de Shannon pour décrire les appariements probabilisés.

En conclusion, au cours de cette thèse, l'ensemble de la chaîne d'acquisition de données laser en intérieurs complexes a été analysée et les contributions sont de plusieurs ordres. En décrivant les moyens et méthodes actuels, nous en avons reconnu les qualités et constaté les limites. L'étude de la littérature et l'expérimentation d'algorithmes et de systèmes récents a permis de suggérer l'utilisation conjointe de primitives automatiquement reconstruites et d'informations *a priori* pour réduire le temps d'acquisition sur site sans altérer la qualité de référence des données.

Une contribution importante de notre travail réside également dans l'expression d'un modèle probabiliste de l'appariement. La description d'un modèle fonctionnel adapté à un modèle stochastique non gaussien a été nécessaire pour manipuler les changements de repères incertains des entités géométriques non ponctuelles. Chacune des quatre étapes de notre approche fait encore l'objet d'évolutions scientifiques ou techniques qui ouvrent des perspectives prometteuses :

**Acquisition** : les caractéristiques des scanners laser terrestres continuent d'évoluer, et tout laisse à penser qu'ils resteront l'outil majeur d'acquisition de nuages de points denses en intérieurs complexes, au moins pour les cinq années à venir.

**Reconstruction** : en raison de l'intérêt commun de différentes communautés de scientifiques, les algorithmes de reconstruction automatique de primitives font encore l'objet de recherches académiques et industrielles. Aidés par les capacités de calcul en permanente évolution, des gains en termes de performance temporelle, quantitative et qualitative sont vraisemblables.

**Mise en correspondance et Résolution** : en probabilisant la description des appariements, nous avons souhaité permettre l'utilisation d'outils puissants tels que les probabilités conditionnelles ou la théorie de l'information. Nous espérons que des recherches futures permettront d'incorporer l'ensemble de l'information *a priori* exploitable pour estimer un maximum de vraisemblance des inconnues de poses qui valide les relations de cohérence du système. Par ailleurs, l'évolution des méthodes basées sur les graphes de poses présagent du développement d'outils puissants pour la gestion de très vastes campagnes de levé. ●

## Contact

Jean-François HULLO  
jfh@hullo.fr

## Références

Hullo, J.-F., Grussenmeyer, P., Landes, T. et Thibault, G. (2011). *Georeferencing of TLS Data for Industrial Complex Scenes: Beyond Current Solutions*. In ISPRS Laser Scanning Workshop, volume XXXVIII, Calgary. p. 1-6, ISBN : 2194-9034 Best Poster Presentation Award

Hullo, J.-F., Thibault, G., Grussenmeyer, P., Landes, T. et Bennequin, D. (2012). *Probabilistic Feature Matching Applied To Primitive Based Registration Of TLS Data*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, pp. 221-226, ISBN : 2194-9042  
La Thèse est téléchargeable à l'adresse : <http://www.theses.fr/s75761>

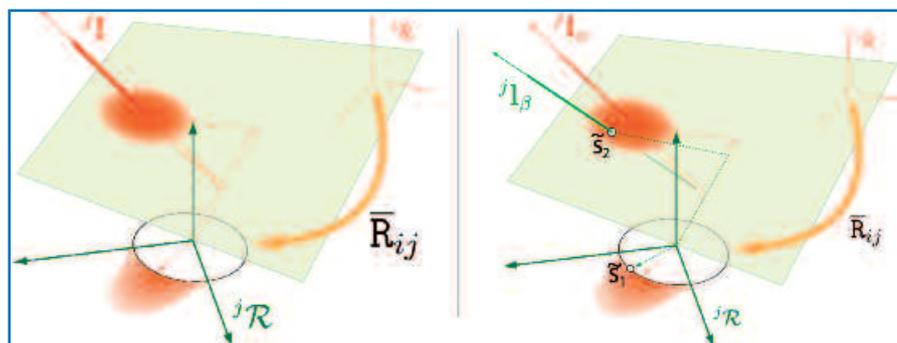


Illustration de la notion d'appariement probabiliste de lignes. Influence de l'incertitude d'un changement de repère sur les coordonnées DHM d'une ligne (à gauche) et valeur du score probabiliste de l'appariement d'une autre ligne (à droite). Pour plus de détail, se reporter au Chapitre IV-2 du mémoire.