

Modélisation d'environnements complexes à partir de nuages de points et d'images acquis depuis le sol

■ **Matthieu DEVEAU**

Cet article aborde certaines problématiques traitées par la thèse de Matthieu Deveau, ingénieur géomètre et doctorant.

Cette thèse se déroule au laboratoire MATIS de l'IGN, en partenariat avec TRIMBLE/MENSI et avec EDF R&D, et sa soutenance est prévue en 2006. Ces travaux ont pour objectif de proposer une solution pour la modélisation d'environnements complexes (architecture, industrie, etc.) exploitant à la fois les informations provenant d'une image numérique et celles issues d'un nuage de points 3D obtenus à partir d'acquisitions terrestres.

■ mots-clés

modélisation 3D,
orientation relative,
segmentation 2D-3D,
fusion image-LASER

Lessor des scanners à balayage suscite des changements dans le monde de la topographie depuis maintenant une quinzaine d'années. Ces scanners viennent en concurrence de la photogrammétrie sur de nombreux chantiers. Ils ont en particulier l'intérêt de fournir immédiatement une description de la scène sous forme de nuages de points denses. Mais lorsqu'il faut produire une description structurée de la scène, sous forme de primitives, et construire un modèle géométrique, on se confronte toujours, comme pour la photogrammétrie, à une saisie interactive, qui au lieu de se traduire par une saisie dans un environnement stéréoscopique, se déroule en monoscopie sur des fenêtres permettant de manipuler le nuage de points en 3D au travers d'une vue perspective.

Pour modéliser une scène en éléments géométriques, il faut pouvoir distinguer à quel élément chaque ensemble de points appartient. Le principe est de

sélectionner chaque portion du nuage de points correspondant à un objet à partir d'un outil de saisie polygonale dans une fenêtre de visualisation 3D. Pour pouvoir isoler convenablement chaque objet, il est souvent nécessaire de renouveler la sélection. Chaque sélection dans la fenêtre 3D correspond en effet à un cône et la sélection à partir de ce cône ne se soucie pas de la présence de plusieurs groupes de points appartenant à plusieurs objets distincts.

La saisie procède donc par itérations de deux opérations, l'opération de sélection polygonale, et la rotation du nuage de points. Indépendamment des questions de méthodologies propres à la lasergrammétrie et à la photogrammétrie, ce mode de traitement conduit à des temps de modélisation globalement comparables à ceux obtenus par levé photogramétrique. Dans tous les cas ces opérations restent très longues, et, dans certains cas, pénibles. Le problème de la segmentation des nuages de

points reste donc un point crucial pour la mise en valeur de la lasergrammétrie dans une optique de modélisation. Mais plus qu'une valorisation d'une technique par rapport à une autre, n'est-il pas nécessaire de s'accorder sur les atouts respectifs de chacune d'entre elles et de profiter de ces atouts ?

Au vu des caractéristiques de l'acquisition photographique et de l'acquisition LASER, le premier constat possible est que l'image numérique peut être utilisée comme un complément géométrique du nuage de points. Le nuage de points réalise un échantillonnage ou une discrétisation de la surface mesurée. Les limites des objets sont donc, dans de nombreux cas, des structures difficiles à localiser correctement. L'image réalise également une discrétisation de la surface, mais le processus d'enregistrement de l'information conduit à une continuité du signal : deux pixels contigus partagent des informations provenant du même point dans l'espace. Aussi, les processus de traitement d'image permettent de localiser avec une grande précision les ruptures du signal dans les images, ruptures qui correspondent en grande partie aux limites des objets, que l'on a du mal à estimer à partir du nuage de points seul. La précision de localisation des ruptures du signal atteint des ordres de grandeur sub-pixellaires lorsqu'on dispose d'un bon rapport signal à bruit dans l'image.

Partant du principe que l'image peut enrichir l'information géométrique

...

... contenue dans le nuage de points, il faut s'intéresser à la configuration d'acquisition des données. Nous considérons ici une image prise d'un point de vue proche de celui du scanner, avec une différence de résolution en faveur de l'image pour exploiter la qualité géométrique de celle-ci.

La proximité des points de vue a plusieurs conséquences :

- la perspective est la même, donc l'aspect des objets est le même dans l'image et dans le nuage de points (les déformations géométriques sont identiques, et les parties cachées sont quasiment les mêmes). C'est utile pour la segmentation : il y a superposition complète des données ;
- corollaire du premier point, l'orientation du nuage de points par rapport à l'image est facilitée par la ressemblance des points de vue, l'espace de recherche pour l'appariement d'éléments étant réduit ;
- lorsqu'on cherche à déterminer la position d'une limite d'objet, la résolution supérieure de l'image permet une meilleure localisation de la position de la discontinuité dans le plan parallèle au plan optique.

L'utilisation d'une image de résolution supérieure à la résolution du nuage de points permet de tirer partie de la qualité géométrique de l'image. La résolution supérieure de l'image permet à la fois de mieux localiser la discontinuité et de diminuer la résolution de numérisation et donc les temps d'acquisition et de post-traitement.

De plus, la géométrie de perspective conique est plus rigide dans le cas de l'acquisition photographique que dans celle du scanner : la matrice CCD est constituée d'un seul tenant, donc l'image obtenue également, ce qui n'est pas le cas pour le scanner LASER, qui parcourt l'ensemble de la scène "imagée" par rotations autour de deux axes. De cette différence de rigidité dans les systèmes d'acquisition, on peut faire l'hypothèse qu'un recalage global des différentes stations sera meilleur en s'appuyant sur les images seules, qu'en utilisant les nuages de points seuls. Mais si on associe LASER et image, on peut supposer obtenir un recalage encore meilleur, puisqu'on ajoute des observations supplémentaires. L'enjeu est d'ajouter des observations provenant de l'association image-LASER qui ne dégradent pas les observations pro-

venant des images seules. Autrement dit, il faut obtenir des incertitudes de position et d'orientation issues de la combinaison image-LASER inférieures à celles issues d'une aérotriangulation purement formée à partir des images.

Remarquons que l'utilisation d'un seul point de vue LASER offre la possibilité de travailler dans la géométrie d'une image (grille de m lignes x n colonnes) pour les traitements sur le nuage de points. Le mode de balayage du scanner par variation angulaire constante en coordonnées sphériques permet en effet de représenter les résultats de l'acquisition dans la géométrie d'une image, chaque pixel contenant une information relative à une direction dans l'espace des coordonnées sphériques. Cette topologie a l'avantage d'une gestion simple et rapide des relations de voisinage. Mais l'intérêt majeur de l'image réside dans l'interprétation visuelle directe de la scène observée. Dans un nuage de points "manipulé" dans une interface 3D, les effets de transparence dus à l'échantillonnage LASER font qu'une nappe de points située derrière la surface que l'on regarde se superpose avec les points appartenant à l'objet ce qui nuit à l'interprétation de la scène.

Dans une vue statique constituée depuis le point de vue d'acquisition, le problème ne se pose plus, puisqu'on se trouve dans une configuration photographique, c'est-à-dire dans une configuration de perspective conique rigide. On se trouve en plus dans une situation que le cerveau humain a l'habitude d'interpréter, et sur laquelle il est plus à même de réaliser une analyse, puisqu'il s'agit d'une image 2D. (L'idéal reste de faire cette analyse sur une image stéréoscopique, dont les caractéristiques permettront de se rapprocher de la vision humaine).

La stratégie choisie s'appuie donc sur plusieurs propriétés géométriques favorables à la reconstruction. Les points étudiés dans cette thèse s'articulent autour de cette stratégie générale. D'abord, il a été nécessaire d'examiner l'orientation du nuage de points par rapport à l'image. Une fois cette orien-



Figure 1 : Images calculées à partir des informations collectées par le scanner. Image de profondeur (gauche), image d'intensité et d'ombrage (droite).

tation déterminée, la segmentation de la scène a été abordée. Il s'agit là de séparer les différents éléments présents dans la scène. Enfin, la segmentation étant connue, l'estimation des structures géométriques présentes a été orientée vers la reconstruction des surfaces construites par extrusion d'un profil en translation ou en rotation par rapport à une droite directrice.

Orientation du nuage de points par rapport à l'image

L'orientation du nuage de points par rapport à l'image correspond à un problème bien connu de la communauté. Il s'agit de déterminer les paramètres de rotation et de translation entre les repères respectifs des deux jeux de données. Nous considérons ici les paramètres internes associés à l'image comme connus. Cette orientation doit être la plus précise possible, pour assurer la cohérence de la modélisation à partir des deux jeux de données, image et nuage de points. C'est donc une étape cruciale dont dépend fortement la suite des traitements.

Plusieurs solutions existent pour l'orientation d'une image par rapport à un nuage de points. L'une d'entre elles consiste à rendre solidaires les deux capteurs. La liaison rigide peut alors être étalonnée régulièrement. Les paramètres d'orientation n'ont pas à être estimés à chaque acquisition. Si cette solution est simple, elle limite les possibilités d'adapter l'acquisition à la configuration de la scène. Aussi, le problème d'orientation est considéré dans une configuration légèrement plus souple, où les capteurs sont supposés proches mais pas nécessairement solidaires.

La proximité des points de vue, on l'a dit, génère deux perspectives très semblables. Aussi, il est possible d'apparier des éléments présents dans la scène sans grande ambiguïté et sans difficulté. Pour obtenir une bonne estimation de l'orientation, nous souhaitons détecter un maximum d'éléments à apparier. Nous nous sommes basés sur un détecteur de coins et un détecteur de

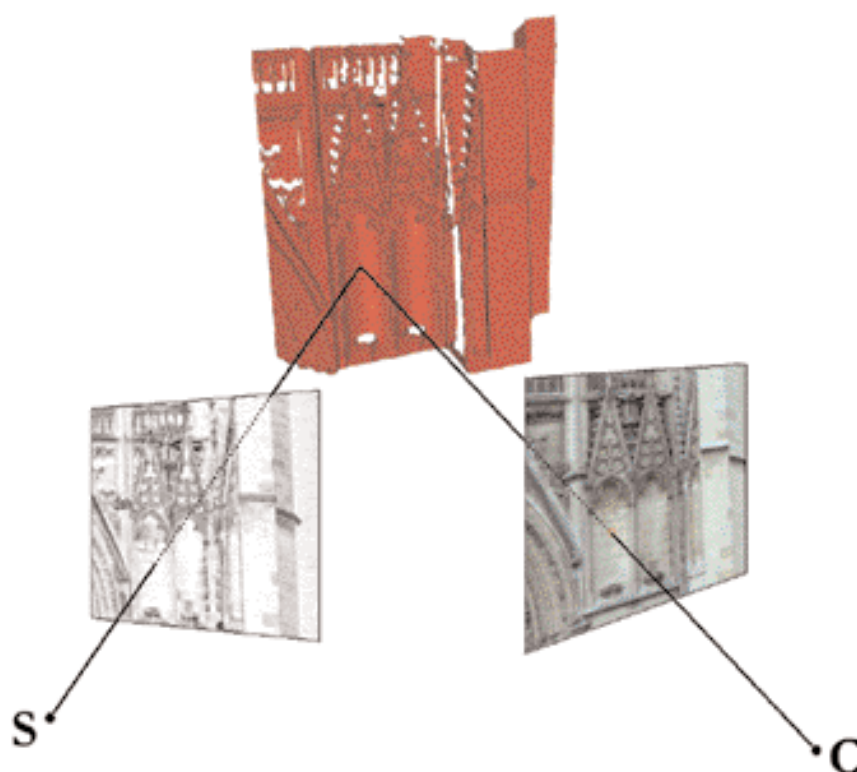


Figure 2 : Géométrie d'appariement des points entre image d'intensité LASER et image photographique.



Figure 3 : Projection de l'image haute résolution sur le nuage de points triangulé.

contour pour extraire des points caractéristiques et des segments dans l'image. Ces éléments peuvent être appariés avec leurs homologues par corrélation à proximité de leur projection dans la vue LASER (cf. figure 2). Les points sont détectés dans des zones planes et texturées tandis que les segments sont détectés au niveau des discontinuités géométriques. Ils sont donc complémentaires. L'estimation précise des éléments dans l'image et dans le nuage de points conduit à une bonne orientation des deux jeux de données, comme l'illustre la figure 3, où le nuage de points est triangulé, et l'image est projetée sur la surface à partir de l'orientation calculée. Cette approche présente un grand atout : il n'est pas nécessaire de disposer des cibles artificielles dans la scène ou de saisir des éléments dans l'image et dans le nuage de points pour connaître l'orientation relative des données.

Segmentation conjointe du nuage de points et de l'image

La segmentation reste un problème complexe. Elle a pour but de séparer les différents éléments présents dans la scène. Elle a été traitée dans un formalisme de segmentation hiérarchique, maîtrisé en particulier grâce aux travaux de Laurent Guigues. La segmentation hiérarchique procède par fusion de régions, à partir d'une sur-segmentation de la scène. La sur-segmentation correspond à une division de la scène en petites régions. Elle est réalisée dans l'image par un algorithme de Ligne de Partage des Eaux, qui s'appuie sur les contours présents dans l'image.

La segmentation hiérarchique présente l'intérêt de proposer un grand nombre de solutions possibles parmi lesquelles la segmentation recherchée doit se trouver. D'autre part, cette approche

permet de s'adapter à la présence d'objets à des échelles variées.

La fusion des régions est réalisée en fonction d'une énergie associée aux données. Ici, l'énergie est définie à partir d'informations géométriques. A une région donnée dans l'image correspond un ensemble de points 3D provenant de l'acquisition LASER. L'énergie associée à chaque région est définie de telle sorte à favoriser la proximité géométrique des points à des plans.

Certaines étapes de construction de la hiérarchie prennent en compte également la radiométrie. Le résultat est une segmentation de la scène à la résolution de l'image, où les structures sont séparées à la fois grâce à des critères géométriques et grâce à des critères radiométriques. La difficulté tient en partie du besoin de ne manquer aucune discontinuité géométrique, à la phase de sur-segmentation. Puisque ces discontinuités ne



Figure 4 : Une étape de segmentation pour la construction du graphe hiérarchique. Vue sur la chapelle du château de Vincennes.

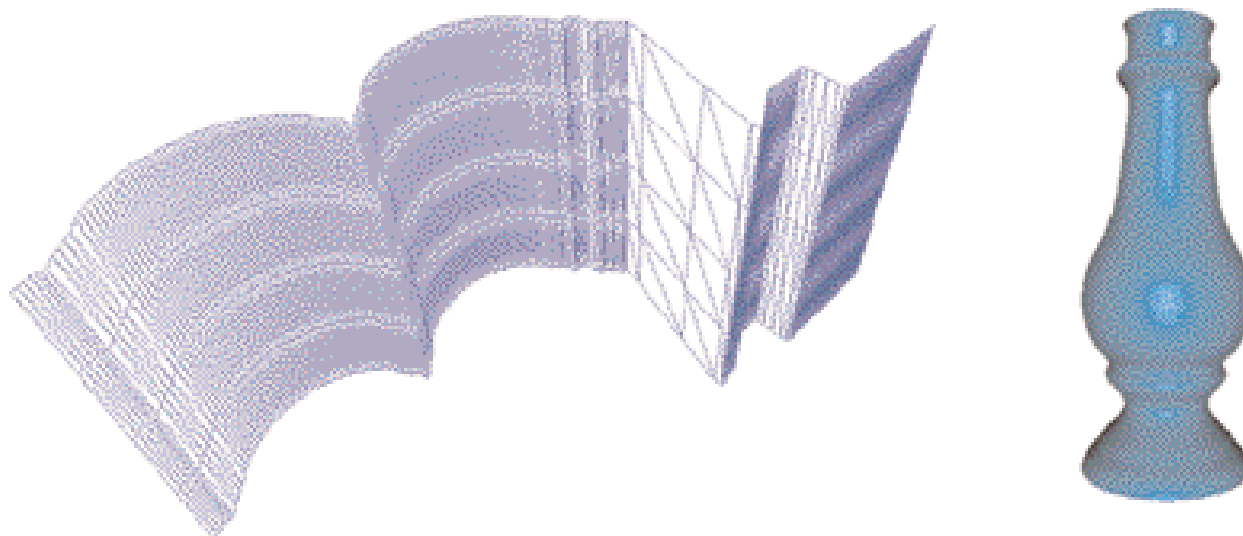


Figure 5 : Surface de translation - coupe des alcoves ; et surface de révolution estimées à partir du nuage de points.

sont pas nécessairement toutes présentes dans l'image numérique, il faut détecter ces discontinuités dans le nuage de points et les incorporer dans l'image.

Reconstruction de primitives géométriques

La reconstruction de primitives géométriques se veut la plus générale possible. Nous ne supposons aucune connaissance de modèles a priori en dehors des plans, des surfaces profilables. Les surfaces plus complexes seront triangulées. A partir de cet ensemble de formes, la grande majorité des éléments pré-

sents dans une scène peut être modélisée. Les surfaces construites par extrusion d'un profil sont elles-mêmes très libres, puisque leur profil peut être quelconque. L'estimation de ces surfaces est divisée en deux étapes : calcul de la droite directrice puis estimation du profil (pour plus de détails, consultez le rapport de thèse). Le profil est déterminé par projection du nuage de points par rotation ou translation du plan par rapport à la droite.

Les prochains développements devront se tourner vers la reconnaissance de formes dans le profil, pour fournir des modèles paramétriques, qui pourront

venir enrichir les bases de modèles, comme celle mise en place par le laboratoire MAP à partir de traités d'architecture.

Vers un outil semi-interactif de gestion conjointe image-LASER

Même s'il est envisagé d'aboutir à un degré d'automatisation élevé, la complexité du problème de segmentation empêche d'atteindre une solution parfaite.

Le résultat de la segmentation automatique peut être proposé à l'utilisateur, à travers une interface de saisie (figure 5), qui fournit à la fois une vue image, une

...

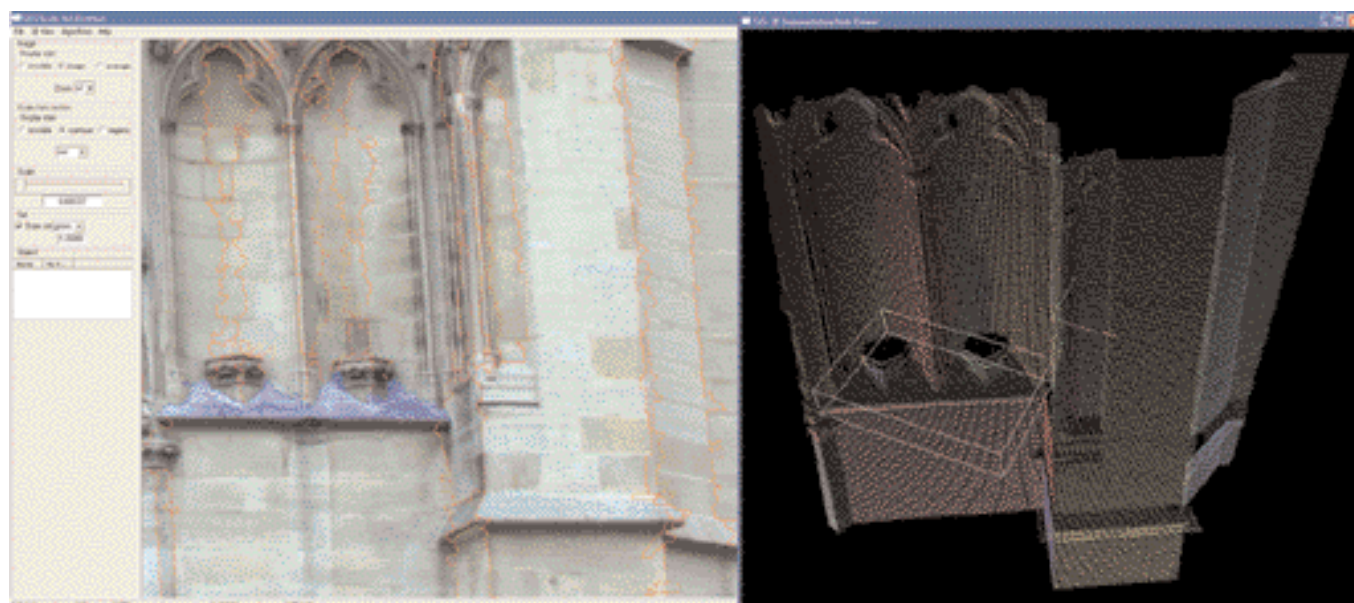


Figure 6 : Interface de saisie semi-interactive conjointe image-LASER.

... vue 3D et des informations relatives aux objets. Cette interface permet de sélectionner une région, ou plusieurs régions, d'appliquer différentes fonctions sur ces régions, par exemple de modélisation, et également d'améliorer les limites de régions lorsque la segmentation proposée n'est pas correcte. L'interaction avec l'utilisateur ne se situe plus au niveau de la saisie de la géométrie, mais au niveau de l'interprétation. C'est plus un processus de décision. L'interface se place comme un intermédiaire, une aide à la saisie. Elle doit permettre d'accélérer considérablement les temps de modélisation. Elle peut également servir de support à l'intégration d'outils d'analyse.

Puisque cet outil s'appuie sur un seul point de vue, il peut être associé à la phase d'acquisition sur le terrain. La saisie dans l'image peut servir de support de cadrage de la surface à scanner. La définition du cadre est donc réduite à une saisie, là où elle pouvait atteindre au mieux deux saisies (pour un cadre rectangulaire), et au pire autant de saisies que la zone comporte de coins. Cela permet d'adapter la résolution de numérisation à la complexité de la surface considérée. D'autre part, dès la phase d'acquisition, il est ainsi possible d'extraire des structures géométriques qui seront vues depuis les points de vue suivants. Ces structures géométriques pourront donc servir d' "amers" de recalage. Cette dernière possibilité présente plusieurs intérêts.

Premièrement, à partir de cette configuration, le recalage peut être réalisé à partir de toutes les structures géométriques de la scène présentes dans la zone de recouvrement. L'importance relative de chaque portion est donc mieux représentée : le risque d'être influencé par une faute dans la minimisation aux moindres carrés du problème d'orientation est moindre.

De plus, on peut s'affranchir de l'utilisation de cibles ou de points de calage, qui sont, malgré les efforts d'automatisation de leur détection, des charges importantes de la phase d'acquisition. Il faut préparer la configuration des cibles, les placer sur le terrain (... ce qui

suppose de pouvoir accéder facilement aux différentes parties de la scène à modéliser ; nous avons tous expérimenté cet aspect de la troisième dimension sur le terrain), et enfin, il faut détecter ces cibles dans les nuages.

Le troisième intérêt lié à cette configuration tient dans l'inversion des phases de segmentation et de recalage du nuage de points. La méthode généralement utilisée consiste à recaler les nuages de points les uns par rapport aux autres puis à réaliser une segmentation en objets, et enfin à estimer les paramètres des objets sélectionnés. Le recalage des nuages de points n'étant pas parfait, cette façon de faire introduit un biais (bruit) qui nuit à l'estimation des paramètres. Si l'on choisit de réaliser la segmentation et l'estimation des paramètres avant le recalage, on s'affranchit de l'erreur de recalage lors de l'estimation des paramètres, et on bénéficie d'objets modélisés avec précision pour le recalage.

Conclusion

Ces travaux veulent montrer l'intérêt de l'association entre l'image et le LASER pour la reconstruction 3D de scènes complexes. Cet intérêt se trouve dans la configuration géométrique qui permet une contribution géométrique commune de l'image et du LASER pour la détermination des limites d'objet. Il est ainsi possible d'obtenir une automatisation quasi complète de la modélisation. Un outil de saisie qui s'appuie sur les avantages respectifs de l'image et du nuage de points et sur les résultats des étapes automatiques vient compléter la chaîne de modélisation. Cet outil offre une grande facilité d'interprétation et une architecture basée sur une segmentation hiérarchique qui doivent conduire à accélérer la modélisation.

Bien sûr, dans le domaine de l'image, des perspectives se dessinent ! Le recalage global de plusieurs stations en configuration couplée image-laser reste à examiner. Ensuite, la fusion des différentes reconstructions obtenues, qui auront servi au recalage global, rejoindra

des questions de fusion de points de vue en photogrammétrie.

L'exploitation de plusieurs points de vue image associés à un point de vue LASER est aussi une piste prometteuse. Une configuration en triangle, c'est-à-dire avec deux points de vue image dont un point de vue proche de la station scanner entraînerait une contribution de l'image dans la détermination de la localisation de la discontinuité en profondeur (ces considérations ont bien sûr une forte dépendance à la configuration géométrique de la scène). Au final, pour une meilleure localisation des discontinuités géométriques à partir de l'image et pour compléter l'information là où elle fait défaut, on pourrait envisager de recourir à l'acquisition en multivues couplée à l'acquisition LASER. On aurait alors toujours une image prise du même point de vue que celui du scanner et *n* images de part et d'autre de la station scanner. Cette voie pourrait prolonger les travaux relatifs à cette thèse, afin d'améliorer la reconstruction et la modélisation des environnements complexes. ●

Contact

Matthieu DEVEAU
Institut Géographique National
Laboratoire MATIS
2, avenue Pasteur
94165 Saint-Mandé Cedex
matthieu.deveau@ign.fr

ABSTRACT

This paper examines some of the issues covered by Matthieu Deveau's doctoral thesis, conducted within IGN's MATIS Laboratory in partnership with Trimble/Mensi and EDF R&D, and which will be presented during 2006.

The objective of the thesis is to develop 3D modeling solutions for complex environments (architectural, industrial, etc.) using both digital image and 3D point cloud data acquired from terrestrial viewpoints.