

Comparaison de PhotoModeler Scanner et David Laserscanner pour l'obtention de nuages de points denses

■ Emmanuel ALBY - Pierre GRUSSENMEYER - Eddie SMIGIEL - Pierre ASSALI

L'étude d'objets lapidaires en archéologie se fait dans un souci de préservation. Il est courant de pouvoir étudier les objets, en partie, par le biais d'une représentation tridimensionnelle. Si l'on ne considère pas le coût, il existe des outils permettant cette acquisition pour toutes les échelles d'étude. Parmi ceux-ci, on peut citer : bras laser, scanner à main, laser à triangulation et laser terrestre. Cette gamme couvre une grande plage de caractéristiques permettant de produire toutes sortes de données tridimensionnelles. En archéologie, comme dans beaucoup de domaines de recherche, la question des coûts ne peut pas être ignorée.

C'est une des raisons pour lesquelles cette technologie est peu développée dans cette communauté. La question inhérente aux méthodes et savoir-faire a aussi toute son importance. Malgré les apparences, une acquisition tridimensionnelle ne se réalise pas sans un minimum de prérequis. C'est dans ce contexte qu'une solution de numérisation bon marché et à l'emploi accessible apparaît pertinente pour promouvoir les outils d'acquisition. Dans notre étude nous nous intéressons particulièrement à deux outils : David Laserscanner et PhotoModeler Scanner. Les techniques mises en œuvre dans les deux systèmes sont à base de lasergrammétrie et de photogrammétrie. Elles permettent toutes les deux la production de nuages de points de petits objets. Nous avons déterminé plusieurs critères pour mener à bien notre comparaison. Le plus important est indiscutablement la précision ; il est important de pouvoir quantifier la capacité à produire un nuage de points fidèle à l'objet. La comparaison entre deux jeux de données dans de bonnes conditions s'est faite par référence à des données beaucoup plus précises obtenues avec un bras laser articulé. Le deuxième critère considère la résolution spatiale que l'on peut obtenir par optimisation des paramètres de mesure. L'acquisition peut se faire sur une grande quantité d'objets et dans des conditions parfois difficiles ; l'ergonomie devient dans ces conditions un critère déterminant. Deux points de vue peuvent être pris en compte pour l'ergonomie : le matériel et le logiciel.

■ MOTS-CLÉS

Patrimoine culturel, documentation, acquisition 3D, photogrammétrie, lasergrammétrie, comparaison

La numérisation 3D fait l'objet de recherches intensives depuis de longues années. Les solutions actuellement à disposition sont matures et leurs performances sont en constante évolution. Ces technologies ont été mises en œuvre avec succès, et ce depuis de nombreuses années pour des applications patrimoniales et plus particulièrement en archéologie (Forte & Pietroni, 2009 ; Guidi et al., 2004 ; Papagiannakis et al., 2005). Malgré des résultats convaincants, la modélisation 3D reste une pratique complexe et nécessite des compétences et un matériel sophistiqué (Al-kheder et al., 2009). Bien que les technologies deviennent populaires, les archéologues, même s'ils s'y intéressent, se découragent dans la démarche qui les mène à cette pratique. Le besoin en solutions abordables subsiste.

Dans cet article, il est question de deux solutions à faible coût : une première basée sur la corrélation épipolaire dense par photogrammétrie (logiciel PhotoModeler Scanner, EOS Systems, PMS) et une seconde basée sur l'utilisation d'une source laser et d'une caméra vidéo (David Scanner Laser, DSL). Plutôt que de présenter les deux méthodes par leurs aspects théoriques, ce qui intéresse moins les utilisateurs, notre étude de cas peut être présentée depuis l'acquisition jusqu'au modèle numérique. L'accent est mis sur l'ergonomie des méthodes, et les compétences minimales nécessaires sont présentées pour convaincre le lecteur que s'il s'investit raisonnablement il sera en mesure d'obtenir des résultats d'une grande précision. Les performances des deux méthodes sont donc comparées du

point de vue de la précision. Nous finirons par une synthèse de la comparaison des deux méthodes pour faire office de guide pour qui voudrait expérimenter l'acquisition 3D.

Technologies laser et photogrammétriques

■ Le système David Laserscanner DSL fait partie de la catégorie des dispositifs basés sur la télémétrie par triangulation laser. Une description complète du système est disponible (Winkelbach et al., 2006). Le principe est le suivant : une ligne laser est projetée par une lentille cylindrique ; l'image de l'intersection de ce plan avec une mire permet de déterminer l'équation du plan laser. Enfin l'image de l'intersection du plan laser et de la

▶ surface à numériser permet de déterminer les coordonnées XYZ des points résultants. C'est en déplaçant la ligne laser que l'on acquiert la totalité des données 3D de la surface. Alors que l'intersection du plan laser et de l'objet à numériser est obtenue par le biais d'une caméra vidéo en temps réel (webcam, par exemple), la ligne laser peut être actionnée à la main. Avec ce dispositif, il n'y a pas besoin de dispositif complexe, c'est ce qui rend l'outil très bon marché. Les besoins matériels sont principalement une caméra vidéo (une webcam haute résolution convient), un laser ligne à main du commerce et le logiciel DSL. Bien que ce ne soit pas l'objectif de cet article de décrire le fonctionnement du système (ce qui est fait dans le tutorial du logiciel), il est important d'insister sur quelques points pour permettre aux débutants de savoir s'ils sauront maîtriser le processus complet.

La *figure 1* montre le dispositif expérimental. L'arrière-plan (référentiel d'étalonnage) est constitué de deux planches disposées en angle droit où ont été collés des motifs spécifiques. Un jeu de 25 cercles codés est néces-



Figure 1. Dispositif expérimental, référentiel d'étalonnage, fragment lapidaire calcaire, ligne rouge laser, webcam et trépied.



Figure 2. Intersection du plan laser et du fragment calcaire à la lumière du jour

saire pour l'étalonnage de la caméra et le repérage de l'objet. Sur la *figure 1*, il est possible de distinguer plus de 25 points. Ce sont en réalité trois jeux de points qui ont été imprimés pour s'adapter aux différentes dimensions des objets scannés. La *figure 2* met en évidence la ligne laser déformée par la forme de l'objet.

Toutefois, pendant l'acquisition, les paramètres de caméras doivent être réglés de telle façon que l'image soit composée uniquement de la ligne laser (répartie correctement entre le fond et l'objet) comme le montre la *figure 3*. Le dispositif peut être utilisé en plein jour avec de bons paramètres de caméra, mais plus la pièce sera sombre, meilleurs seront les résultats. A ce stade, le référentiel n'est plus visible ; l'expérience doit être précédée d'une phase initiale d'étalonnage de la caméra pour permettre les corrections des distorsions optiques et pour prendre en compte la position de l'arrière-plan codé sur l'image de la caméra.

Pour cette étape préliminaire, les paramètres de la caméra doivent permettre le contraste maximum entre le noir des points et le blanc du papier. Il faut bien sûr pouvoir changer les paramètres de la caméra. Bien que la ligne laser puisse être manipulée à la main, elle a été fixée pendant le test sur un trépied à mât télescopique. La ligne laser est ainsi translatée très lentement de bas en haut. Il faut veiller à la position de l'objet à numériser en rapport avec celle du fond de référence et de la caméra. Pour profiter du maximum de la résolution de la caméra, il est important que l'objet couvre la plus grande surface de l'image possible.



Figure 3. Intersection entre le plan laser et le fragment calcaire dans le noir.

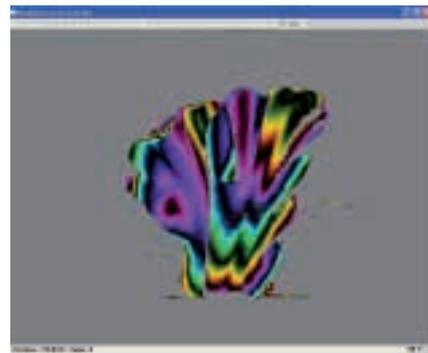


Figure 4. Image de profondeur (distance à l'objet en temps réel lors de l'acquisition).

La caméra est fixée au bas du mât du trépied alors que la ligne laser est positionnée en hauteur. Le système forme un angle avec l'horizontale de telle façon que les lignes d'intersection avec les deux planches forment un angle sur l'image. Le résultat est meilleur si la translation est lente (de haut en bas), en termes de densité, de précision et de bruit de mesure. La *figure 4* montre l'image de profondeur (distance à l'objet) qui s'affiche en temps réel lors de l'acquisition. Pour obtenir une description tridimensionnelle complète de l'objet, il faut répéter l'acquisition avec un nombre de posi-

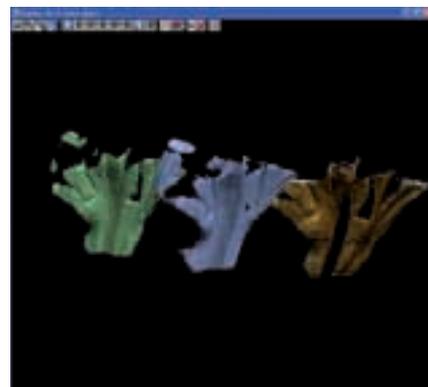


Figure 5. Nécessité de plusieurs points de vue pour produire un modèle 3D complet.

tions en rapport avec la complexité de l'objet. Les données issues de ces différentes acquisitions seront recalées entre elles et fusionnées.

■ PhotoModeler Scanner

La photogrammétrie permet de générer des nuages de points en 3D à l'aide de photographies. Les principes fondamentaux utilisés en photogrammétrie sont aussi à base de triangulation (Remondino, El-Hakim, 2006). Les photos issues de points de vue différents permettent de déterminer les caractéristiques tridimensionnelles des points de l'objet, souvent en multipliant le nombre de points sur plusieurs photos. La description des principes mathématiques n'étant pas l'objectif de cet article, nous présentons la méthode par l'exposé du processus depuis la prise de vue jusqu'à l'obtention du nuage de points final.

L'étalonnage du dispositif de prise de vue constitue la première étape. Aucun système optique n'est parfait. En photographiant une mire de référence (cibles codées sur une affiche blanche), les défauts de l'optique sont calculés et les images sont ensuite corrigées des distorsions radiales et tangentielles. Avec l'appareil étalonné, on réalise ensuite un couple d'images de l'objet à numériser. Cette étape doit se dérouler de telle façon à ce que les caractéristiques optiques soient identiques aux conditions de l'étalonnage, ce qui généralement revient à ne changer ni le facteur zoom ni la mise au point de l'objectif. L'obtention du nuage de points se fait à partir de couples stéréoscopiques. Les directions des deux prises de vue doivent être parallèles à quelques degrés près. Deux paramètres sont à mettre en relation, la distance à l'objet D et la distance relative des points de vue (base) B ; un rapport D/B de l'ordre de 8 est conseillé. Il faut également trouver un compromis entre la taille de l'objet sur l'image et le décalage (base) entre les deux photos pour tirer profit de la résolution du capteur. La *figure 6* représente un couple stéréoscopique pris dans de bonnes conditions. Les paramètres de prise de vue doivent permettre une très grande netteté de l'image ; il faut donc veiller aux conditions d'éclairage de l'objet.

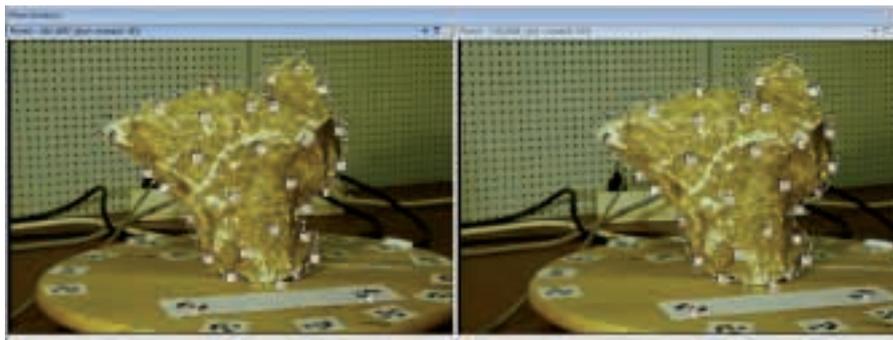


Figure 6. Couple stéréoscopique du fragment calcaire avec un bon rapport base / éloignement.

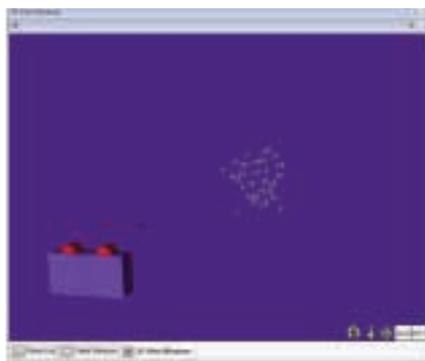


Figure 7. Représentation 3D de la configuration relative des caméras et des points.

L'utilisation de cibles codées disposées autour de l'objet permet de réaliser l'orientation automatique des images. Le nuage de points dense est calculé à partir d'une surface issue de quelques points placés par l'utilisateur sur l'objet sur les deux images. Le résultat de l'orientation est représenté sur la *figure 7* : la vue en 3D montre le couple stéréoscopique et des points sélectionnés sur l'objet.

La création du nuage de points peut démarrer. Elle est basée sur un algorithme de corrélation épipolaire dense (Dianchao, 2008). L'algorithme utilise les similarités entre les images pour déterminer les pixels correspondants aux mêmes parties de l'objet. Plus la texture de l'objet est importante (si la variation des couleurs est significative) plus le nuage de points sera dense et régulier. Inversement, en l'absence de texture, il sera difficile d'obtenir un nuage de points représentatif de l'objet.

La *figure 8* montre le modèle 3D résultant d'un calcul à partir d'un couple d'images. On peut facilement associer la texture des pixels des images aux points du nuage. Pour modéliser complètement l'objet, il convient de

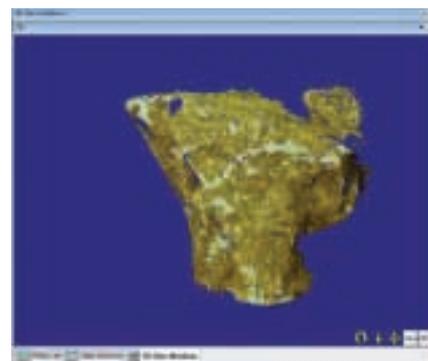


Figure 8. Modèle 3D texturé obtenu dans PMS à partir d'un seul couple stéréo.

réaliser plusieurs couples de photos. Le nombre de couples nécessaires dépend de la complexité de l'objet.

Expérimentations

Cette partie présente les conditions expérimentales et insiste sur les facteurs déterminants à contrôler.

■ Objet de référence

L'objet qui est utilisé pour l'expérimentation est un fragment calcaire d'un chapiteau Corinthien. C'est un élément de décoration, sa surface comporte beaucoup de variations et a une texture contrastée. Son volume est d'environ 4 décimètres cubes. La plus grande longueur est de 20 cm.

Un nuage de points très précis (quelques dixièmes de millimètre) du fragment a été réalisé avec un scanner à bras FARO. Ce nuage est utilisé comme référence pour cette étude, il rend possible un contrôle quantitatif complet de la surface alors qu'elle est non décomposable géométriquement. Le nuage de points résultant peut être maillé, ce qui permet de le comparer visuellement avec l'objet réel.

Acquisition laser

L'acquisition des données tridimensionnelles avec DSL est assez simple. La facilité d'usage est essentiellement due à l'interface du logiciel. Le nombre de points de vue est dépendant de la configuration de l'objet. Pour notre étude, 17 saisies ont été nécessaires. Ce nombre élevé est lié à l'application "shapefusion" qui regroupe automatiquement les surfaces issues de différentes saisies. En effet, cette application requiert de grandes parties communes entre les surfaces à recalcr. Il faut donc un temps plus important pour l'acquisition mais ce temps est économisé ensuite par le recalage automatique.

Les caractéristiques de l'acquisition avec DSL sont les suivantes :

- Durée de saisie : 30 secondes à 1 minute par point de vue (plus la saisie est lente, plus les données sont denses)
- Caméra utilisée : webcam haute résolution 2 mégapixels
- Ligne laser à mise au point ajustable de 5mW
- Distance à l'objet : 50 cm

Acquisition photogrammétrique

La construction du modèle virtuel du fragment par photogrammétrie a été



Figure 9. Maillage complet issu de l'acquisition avec DSL.

réalisée grâce à 7 couples stéréoscopiques avec PMS. On peut différencier deux étapes principales. Le bon déroulement de la phase de prise de vue dépend des compétences en photographie de l'utilisateur. Quelques notions de bases sont nécessaires pour réaliser les clichés facilement en termes de mise au point, temps d'obturation, profondeur de champ et éclairage.

La deuxième phase peut être réalisée de façon complètement indépendante de la première : les images peuvent être traitées par d'autres personnes, à un autre endroit et à un moment différent. Les caractéristiques d'acquisition par photogrammétrie sont les suivantes :

- Prise de vue : quelques secondes par image
- Appareil photo : Canon EOS 5D 12 mégapixels
- Longueur focale : 50 mm
- Distance à l'objet : 80 cm

Résultats

Les modèles obtenus par les deux systèmes ont été comparés au modèle de référence.

David Scanner Laser

La figure 9 présente le modèle obtenu après une acquisition avec DSL et maillé sans couleur. Les détails fins sont bien visibles.

La figure 10 illustre les résultats de la comparaison entre le modèle DSL et le modèle de référence (bras FARO). Les parties foncées correspondent à un manque de données dû à un détail profond et étroit du fragment. La triangulation est certainement à l'origine de ce manque de données. La comparaison des modèles montre que 82 % des points (en vert foncé sur la figure 10) présentent un écart inférieur à 1 mm par rapport à la référence. Dans la configuration employée pour cette étude, DSL atteint une précision submillimétrique.

PhotoModeler Scanner

La figure 11 montre le modèle maillé obtenu avec PMS et sans couleur (pour le comparer à celui généré avec DSL). Le maillage apparaît un peu plus lissé que celui de DSL, mais malgré cette légère différence, les détails sont bien perçus. La figure 12 présente la comparaison des résultats issus de PMS avec le modèle acquis avec le bras FARO. Pour les mêmes raisons que précédemment des parties foncées apparaissent. La triangulation entre l'objet et les deux clichés ne permettent

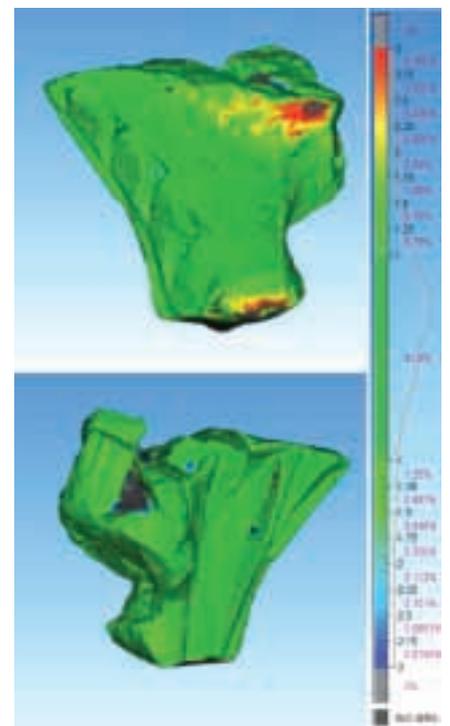


Figure 10. Carte d'erreur (en mm) de la comparaison entre les données DSL et le modèle de référence mesuré à l'aide d'un bras FARO.



Figure 11. Maillage complet issu de l'acquisition PMS.

pas de saisir les détails dans des configurations profondes et étroites. Pour comparer quantitativement les résultats fournis par PMS, la même référence a été utilisée. 77 % des points présentent un écart inférieur au millimètre par rapport au modèle de référence (points en vert foncé sur la figure 12). PMS permet d'atteindre dans la configuration de l'étude une exactitude submillimétrique.

■ Comparaison

Les résultats montrent que les deux systèmes comparés ont des performances similaires pour la numérisation du fragment calcaire. Il est important de noter que ces résultats sont dépendants du matériel employé et surtout des résolutions des capteurs (caméra vidéo et appareil photo). Les critères d'usage et d'ergonomie doivent aussi être abordés dans cette étude. L'objectif de cet article est de donner la possibilité à l'utilisateur débutant dans le domaine de l'acquisition 3D, de faire un choix entre les deux techniques présentées. L'accessibilité du protocole d'acquisition est un critère déterminant. En effet, pour être utilisé par un débutant, le dispositif doit être manipulé aisément et permettre des marges de manœuvre sans incidence majeure sur le résultat. PMS se différencie de DSL en permettant

une dissociation de la prise de vue et du traitement. L'utilisation de DSL impose que tout se déroule simultanément, ce qui peut causer des difficultés pour l'obtention du modèle. L'avantage de DSL est par ailleurs l'obtention du modèle en temps réel. Les conditions d'acquisition (configuration, éclairage) forment un autre critère de comparaison. L'obscurité et le référentiel d'étalonnage imposent des conditions d'acquisition intérieures et maîtrisées pour l'utilisation de DSL, alors qu'une lumière ambiante et un trépied permettent d'aboutir à de bons résultats avec PMS.

Système	DAVID Laserscanner	PhotoModeler Scanner
Coût	Très bas	Bas
Simplicité d'usage	Logiciel très facile d'usage, la mise en place du dispositif demande quelques astuces.	Premiers pas et apprentissage du logiciel assez laborieux, mais de bons tutoriaux.
Dimensions de l'objet	Ajustable entre 5 et 50 cm	S'adapte à toutes les dimensions d'objets.
Précision	Submillimétrique	Submillimétrique (pour cette étude). Dépend de la taille de l'objet.
Texture du modèle	Issues de la caméra mais de qualité moyenne.	Issues de l'image, de bonne qualité.
Export du modèle	3 formats disponibles	De nombreux formats d'export.

Tableau 1. Synthèse de la comparaison technique entre DSL et PMS.

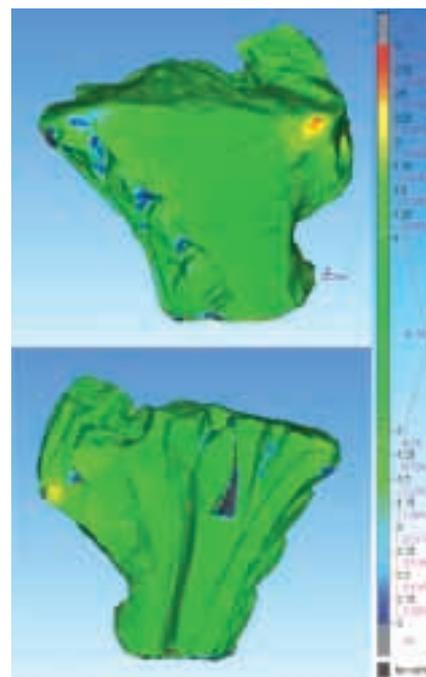


Figure 12. Carte d'erreur (en mm) issue de la comparaison entre les données PMS et le modèle de référence.

L'ergonomie (matériel et logiciel) interviennent dans le choix du dispositif d'acquisition. Dans cette étude, ce critère est difficile à prendre en compte car, en ce qui concerne le matériel, cela dépend des modèles choisis (caméra, ligne laser). L'ergonomie du point de vue logiciel sera la seule considérée pour cette raison. DSL est organisé sous la forme d'un assistant, ce qui permet de gérer chaque étape dans le bon ordre, sans oublier d'élément important. Ce qui n'est pas le cas de PMS, qui nécessite un apprentissage



plus long. L'interface de DSL est ainsi centrée autour de l'utilisateur, contrairement à PMS.

Le tableau 1 synthétise les caractéristiques des deux systèmes pour guider un futur utilisateur dans son choix.

Le critère de polyvalence doit aussi être considéré. Notre comparaison concerne des artefacts archéologiques. DSL ne permet pas, sans une explosion de moyens d'acquisition, la modélisation d'objet dépassant les dimensions de 50 x 50 x 50 cm³, alors que PMS est plus indépendant de la taille de l'objet.

Conclusion

Cette étude permet de montrer que des solutions d'acquisition et de modélisation 3D à faibles coûts sont disponibles, notamment pour la communauté des archéologues. Cependant, une formation préliminaire semble nécessaire pour gérer aisément toutes les étapes de modélisation. Le temps estimé pour une bonne prise en main est d'environ une semaine ; il est ensuite tout à fait envisageable de gérer un projet de numérisation 3D de façon autonome. Pour conclure cette comparaison, il est difficile de présenter un choix définitif. PMS paraît plus souple quant aux échelles de numérisation, si l'on admet que les connaissances liées à la photographie sont accessibles. Le système s'adapte à des objets de dimensions variables, depuis un simple fragment jusqu'à un bâtiment entier (Hullo et al., 2009). La phase d'acquisition est indépendante du traitement, et peut donc se faire en extérieur. Si les conditions décrites dans cette étude sont respectées, et pour des cas précis de collection d'objets adaptés, DSL peut très bien convenir mais reste cependant moins flexible. ●

Bibliographie

Al-kheder, S., Al-shawabkeh, Y., Haala, N., 2009. *Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry*. Journal of Archaeological Science, 36(2), 537-546.

Dianchao Liu, Cheng, S., 2008. *A Brief Introduction of Feature Matching*. Region 5 Conference, 2008 IEEE. pp. 1-4.

Forte, M., Pietroni, E., 2009. *3D Collaborative Environments in Archaeology: Experiencing the Reconstruction of the Past*. International Journal of Architectural Computing, 7(1), 57-76.

Guidi, G., Beraldin, J., Atzeni, C., 2004. *High-accuracy 3D modeling of cultural heritage: the digitizing of Donatello's "Maddalena"*. Image Processing, IEEE Transactions on, 13(3), 370-380.

Hullo, J.-F., Grussenmeyer, P., Fares, S., 2009. *Photogrammetry and dense stereo matching approach applied the documentation of the cultural heritage of Kilwa (Saudi Arabia)*. XXIIth CIPA International Symposium, Kyoto (Japan). CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XXII-2009, 6 pages.

Papagiannakis, G. et al., 2005. *Mixing virtual and real scenes in the site of ancient Pompeii*. Computer Animation and Virtual Worlds, 16(1), 11-24.

Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. *Image-based 3D modelling: a review*. The Photogrammetric Record, 21(115):269-291.

Winkelbach, S., Molkenstruck, S., Wahl, F., 2006. *Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach*. Pattern Recognition. (DAGM 2006), Lecture Notes in Computer Science 4174 ISBN: 3-540-44412-2, Springer 2006, pp. 718-728.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Jean-Yves MARC, professeur à l'université de Strasbourg, responsable du site archéologique de Mandeuve, Doubs, pour l'autorisation de publication du matériel archéologique.

Contacts

Emmanuel ALBY

emmanuel.alby@insa-strasbourg.fr

Pierre GRUSSENMEYER

pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr

Eddie SMIGIEL

eddie.smigiel@insa-strasbourg.fr

Pierre ASSALI

pierre.assali@insa-strasbourg.fr

Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg (INSA), Groupe Photogrammétrie Architecturale et GÉomatique (PAGE), UMR CNRS LSIIT 7005

ABSTRACT

The study of archaeological artifacts requires a great care for the object. Current technologies allow the study of the object scanned in three dimensions. Hence, the digitization of objects has almost become compulsory for simplicity of study and analysis. For each scale of objects, dedicated hardware equipment exist oftentimes at important costs. Among others, scanning arms, handheld scanners, triangulation scanners, terrestrial laser scanners offer a wide variety of possibilities to produce 3D data. However, the question of cost is central in the field of archaeological research. That is probably why the technology is not widely spread in the community. Besides, the question of knowhow is also an important issue. Despite the appearances, a 3D digitization project is not so easy to carry out. Hence a low cost solution susceptible of being operated with reasonable effort could contribute to popularize 3D acquisition tools. In our study, we focus particularly on two solutions: David Laserscanner and PhotoModeler Scanner. Both systems come from two different techniques: laser scanning and photogrammetry. They can both produce dense point clouds of small objects. Our comparison is completed according to several criteria. The most important criterion is undoubtedly accuracy; it is therefore significant to quantify the ability to produce a reliable point cloud. To compare the point clouds obtained with both systems, we use a point cloud provided by an arm scanner whose accuracy is less than 1/10th of a millimeter. As a second important criterion the maximum spatial resolution reachable for a specified hardware configuration is obtained by the optimization of the acquisition parameters. Acquisition is often repetitive and on site. Ergonomics of systems is also important to evaluate. The interface can be divided into two parts: hardware and software. The combination of the two phases of acquisition and processing take into account the general ergonomics of the systems.