



**HAL**  
open science

## Repérage précis de caméras multispectrales et de scanners 3D pour le recalage de données multicateurs appliqué à l'étude du patrimoine

Camille Chane Simon, R. Schütze, Marzani F. Fachhochschule Mainz, Boochs Fachhochschule Mainz

► **To cite this version:**

Camille Chane Simon, R. Schütze, Marzani F. Fachhochschule Mainz, Boochs Fachhochschule Mainz. Repérage précis de caméras multispectrales et de scanners 3D pour le recalage de données multicateurs appliqué à l'étude du patrimoine. RFIA 2012 (Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle), Jan 2012, Lyon, France. pp.978-2-9539515-2-3. hal-00660978

**HAL Id: hal-00660978**

**<https://hal.science/hal-00660978>**

Submitted on 19 Jan 2012

**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.

# Repérage précis de caméras multispectrales et de scanners 3D pour le recalage de données multicateurs appliqué au patrimoine

C. M. Simon<sup>1,2</sup>

R. Schütze<sup>2</sup>

F. S. Marzani<sup>1</sup>

F. Boochs<sup>2</sup>

<sup>1</sup> le2i, Université de Bourgogne

<sup>2</sup> i3mainz, Fachhochschule Mainz (Allemagne)

Université de Bourgogne, Laboratoire Le2i,  
UFR Sciences et Techniques, Université de Bourgogne,  
B.P. 47870, 21078 DIJON CEDEX  
camille.simon@u-bourgogne.fr

## Résumé

*Nous présentons une technique de recalage de données 3D et multispectrales. La précision de recalage est indépendante de la qualité des données et fonctionne avec une variété de systèmes d'acquisition optiques. Cette solution est flexible et transportable. Elle est donc particulièrement adaptée au recalage de données dans le cadre de l'analyse d'objets du patrimoine.*

## Mots Clef

recalage de données 2D-3D, recalage multicateur, photogrammétrie, calibrations optiques, acquisitions 3D, acquisitions multispectrales, simulations, patrimoine

## Abstract

*We describe a registration method suitable for the registration of multispectral data on a 3D model. The precision of the registration is independent from the quality of the data and works with a variety of optical acquisition systems. This solution is flexible and transportable. It is thus particularly well adapted to the registration of data issued from cultural heritage objects.*

## Keywords

2D-3D registration, multisensor registration, photogrammetry, optical calibration, 3D digitization, multispectral imaging, simulations, cultural heritage

## 1 Introduction

L'utilisation de techniques optiques pour le recalage de données multicateurs est particulièrement utile dans le cadre de l'étude d'objets du patrimoine. Dans ce contexte, on préconise l'utilisation de techniques d'analyse non-intrusives. L'utilisation de capteurs multispectraux et la numérisation 3D sont de telles techniques qui sont de plus en

plus utilisées pour l'analyse et la documentation d'objets du patrimoine. Les données multispectrales peuvent être utilisées pour créer des reproductions couleur plus fidèles [1], pour l'identification de pigments [2] ou par exemple pour déchiffrer les textes sous-jacents d'un palimpseste [3,4]. Par ailleurs, les modèles 3D précis d'œuvres du patrimoine peuvent être manipulés sans risque d'endommager l'objet, ce qui les rend très utiles pour les conservateurs et en tant que moyen de communication.

L'imagerie multispectrale et la numérisation 3D produisent des données complémentaires. Il ne fait aucun doute que des modèles 3D à texture multispectrale sont fort utiles pour l'étude et la quantification de dégradations de surface. De tels modèles peuvent également être utilisés en tant qu'archive de l'objet, dans des musées virtuels ou pour des applications de réalité augmentée.

Il existe quelques systèmes d'acquisitions capables d'effectuer la numérisation 3D d'un objet tout en acquérant une texture multispectrale [5–8]. Mais de tels systèmes intégrés n'atteignent généralement pas la résolution que chaque système peut obtenir indépendamment. Un autre défaut de ces systèmes est qu'ils sont souvent développés pour une application spécifique (l'analyse de peintures murales par exemple) et sont difficilement adaptables à l'étude d'autres objets (statues ou peintures de plus petite taille). Généralement, les systèmes intégrés sont aussi difficilement transportables, alors que c'est indispensable si on veut étudier des objets in situ, dans des musées ou des monuments.

Nous avons donc choisi d'utiliser des systèmes indépendants pour l'acquisition des données multispectrales et 3D, afin que chacun puisse être adapté au mieux à l'application en cours. Ceci implique le besoin d'une technique de recalage entre les données multispectrales et le modèle 3D. De nombreuses méthodes de recalage ont pour première étape l'identification de points de correspondance entre les données 3D et multispectrales. Ce travail peut être très dif-

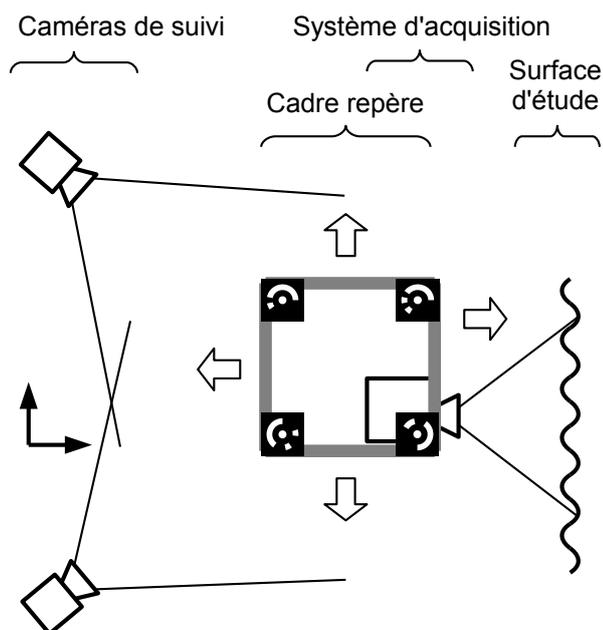


FIGURE 1 – Organisation des acquisitions sur site : plusieurs caméras observent un cadre repère fixé au système d'acquisition pendant que ce dernier acquiert des vues de la surface d'étude.

ficile dans le cas d'objets du patrimoine car les saillances structurelles ne correspondent pas forcément aux saillances spectrales. Les jeux de données 3D et multispectraux ayant une structure différente, il est difficile de trouver des points de correspondances entr eux, que ce soit à la main ou algorithmiquement. Les techniques de recalage basées sur la maximisation de l'information mutuelle [9, 10] sont adéquates si l'on cherche à créer un modèle pour des applications de visualisation. Mais le recalage qui en découle n'est précis qu'à deux pixels près [11], ce qui est insuffisant si le modèle 3D-multispectral doit être utilisé à des fins de quantification.

Si la position et l'orientation des capteurs au moment de chaque acquisition sont connues avec précision, le recalage de données multicapteurs ne présente pas de difficultés. Il est possible de repérer la position d'objets en utilisant la photogrammétrie. Cette technique est utilisée dans l'industrie pour guider des têtes de robots, soit en plaçant une caméra sur la tête du robot qui observe des mires dans l'environnement [12], soit en plaçant des mires sur la tête de robot, observée par des caméras environnantes [13, 14]. Nous nous basons sur ce deuxième processus pour repérer la position et l'orientation de systèmes d'acquisition 3D et multispectraux pour l'analyse du patrimoine. Dans la section suivante nous décrivons la procédure d'acquisition sur site, le protocole de simulation, les systèmes d'acquisitions que nous utilisons et les objets étudiés. Puis nous détaillons deux cas de simulations liés à des objets réels.

## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 Procédure d'acquisition

La procédure d'acquisition sur site est illustrée figure 1 : un ensemble de caméras que l'on nomme "caméras de suivi" observe successivement chaque système d'acquisition pendant qu'il analyse la surface d'étude. Les caméras de suivi capturent la scène simultanément aux systèmes d'acquisition. Un cadre fixé au système d'acquisition et un ensemble d'étapes de calibration optiques et géométriques permettent de connaître précisément la position de chaque système d'acquisition pour chaque acquisition effectuée. Nous détaillons ci-dessous les étapes de calibration et d'acquisition.

**Pré-traitements** Ces étapes peuvent être effectuées en laboratoire, soit avant soit après les acquisitions sur site.

**Calibration géométrique du cadre** On veut connaître la position relative de tous les repères fixés sur le cadre. On prend des photos du cadre sous différents angles de vue avec des repères supplémentaires pour aider la triangulation et au moins une barre d'échelle.

**Calibration optique du système d'acquisition** On a besoin des paramètres intrinsèques des systèmes utilisés. Pour cela on photographie sous de nombreux angles une mire connue (voir figure 2). On obtient les paramètres intrinsèques du capteur par triangulation en utilisant la librairie AXOri [15]. Ces paramètres sont connus avec d'autant plus de précision que le nombre de vues est grand et varié.

**Calibration cadre / système d'acquisition** On cherche la relation entre les repères fixées sur le cadre et le centre optique et l'axe optique du système d'acquisition une fois qu'ils ont été fixés l'un à l'autre. Pour cela on place une mire dans le champ du vue du système d'acquisition et on acquiert une image avec le système d'acquisition. On utilise un autre capteur pour prendre plusieurs vues du cadre et de la mire ensemble. Puisque la géométrie du cadre et l'optique du système d'acquisition a déjà été caractérisée, on obtient la relation entre les deux par triangulation.

**Acquisitions sur site** Les étapes suivantes doivent être effectuées après que les caméras de suivi aient été installées pour observer la zone de positionnement des systèmes d'acquisition.

**Calibration des caméras de suivi** On veut connaître les paramètres intrinsèques et extrinsèques des caméras de suivi. Puis on positionne à nouveau une mire connue dans de nombreuses positions, dans le champ de vue de toutes les caméras de suivi. On obtient les paramètres intrinsèques et extrinsèques par triangulation.

**Acquisitions** On effectue simultanément une acquisition avec les caméras de suivi pour chaque acquisition de chaque système d'acquisition.

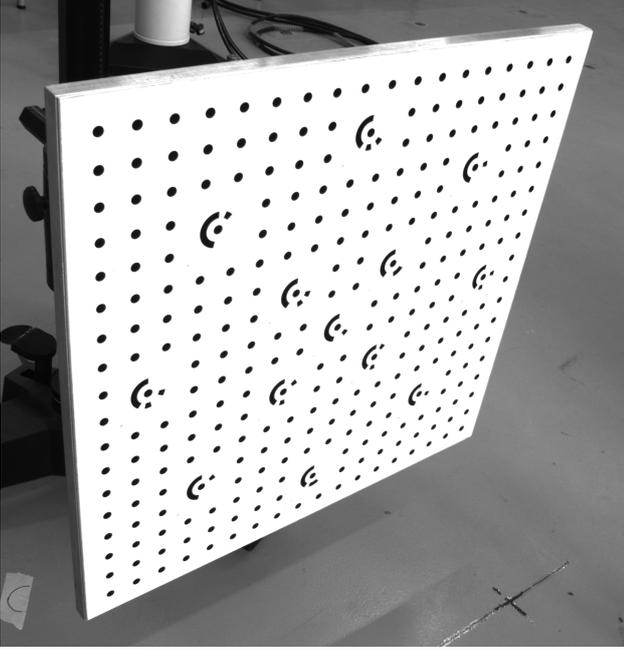


FIGURE 2 – Exemple de mire utilisé pour les étapes de calibration géométrique. Cette mire mesure 1 m × 1 m.

## 2.2 Traitements des données

Nous décrivons maintenant comment les étapes de calibration et d'acquisition nous permettent de projeter toutes les données acquises dans le même repère.

Soient  $R_0(O_0, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ ,  $R_F(O_F, \vec{x}_F, \vec{y}_F, \vec{z}_F)$  et  $R_S(O_S, \vec{x}_S, \vec{y}_S, \vec{z}_S)$  les repères orthonormés liés respectivement aux caméras de suivi, au cadre et au capteur (voir figure 3). Le repère  $R_S$  a pour centre le centre du capteur et est orienté tel que  $\vec{z}_S$  soit colinéaire à l'axe optique.

Pour chaque acquisition, nous obtenons la position et l'orientation du cadre dans le repère  $R_0$  grâce aux caméras de suivi. Cette position est donnée par les coordonnées de  $O_F$  dans le repère  $R_0$ , que l'on note  $O_F|_{R_0}$ . L'orientation nous est donnée par la matrice de rotation  $P_{0,F}$ . Cette matrice est telle que, pour tout point  $A$  dont on connaît les coordonnées  $A|_{R_F}$  dans le repère  $R_F$ , les coordonnées  $A|_{R_0}$  dans le repère  $R_0$  sont données par :

$$A|_{R_0} = O_F|_{R_0} + P_{0,F} A|_{R_F}. \quad (1)$$

Par ailleurs, la calibration entre le cadre et le système d'acquisition nous donne la position et l'orientation du capteur dans le repère  $R_F$  défini par le cadre, c'est à dire  $O_S|_{R_F}$  et  $P_{F,S}$ . Pour tout point  $A$ , la relation entre  $A|_{R_S}$  et  $A|_{R_F}$  est, comme précédemment :

$$A|_{R_F} = O_S|_{R_F} + P_{F,S} A|_{R_S}. \quad (2)$$

En combinant les équations 1 et 2 on obtient les coordonnées du point  $A$  dans le repère  $R_0$ , connaissant ses coordonnées dans le repère  $R_S$  :

$$A|_{R_0} = O_F|_{R_0} + P_{0,F} (O_S|_{R_F} + P_{F,S} A|_{R_S}). \quad (3)$$

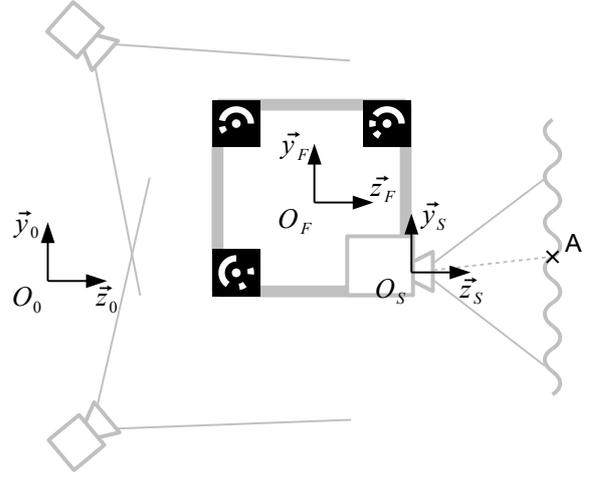


FIGURE 3 – Définition des repères liés aux caméras de suivi, au cadre et au capteur.

Cette équation peut s'écrire sous la forme :

$$A|_{R_0} = O_S|_{R_0} + P_{0,S} A|_{R_S}, \quad (4)$$

car  $P_{0,F} O_S|_{R_F} = (O_S - O_F)|_{R_0}$  et  $P_{0,S} = P_{0,F} P_{F,S}$ . Si  $A$  est un point de l'objet capturé par le capteur,  $A'$  l'image de  $A$  n'a que deux coordonnées  $x_{a'}$  et  $y_{a'}$  dans  $R_S$ , par construction du repère. En utilisant un modèle de caméra sténopé qui prend en compte la focale  $f$ , on obtient les coordonnées du point  $A$  de l'objet connaissant  $x_{a'}$  et  $y_{a'}$  par :

$$A|_{R_S} = \lambda \underbrace{\begin{pmatrix} f & \tau & 0 \\ 0 & \eta f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1}}_K \begin{pmatrix} x_{a'} \\ y_{a'} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

où  $\tau$  modélise l'obliquité des pixels ( $\tau = 0$  si les pixels sont orthogonaux),  $\eta$  est le rapport hauteur / largeur des pixels ( $\eta = 1$  lorsque les pixels sont carrés) et  $\lambda$  est un facteur d'échelle. Si la distance  $Z$  entre le capteur et l'objet est connue alors  $\lambda = Z$ .

Dans notre cas,  $Z$  est connu lorsque le système d'acquisition acquiert des modèles 3D. Si le capteur appartient à une caméra multispectrale, on déduit  $Z$  de l'intersection entre le rayon défini par l'équation 5, et le modèle construit par un système d'acquisition 3D. Ce modèle peut être étendu pour prendre en compte la distorsion de l'image induite par la lentille. Les paramètres de distorsion ainsi que des valeurs précises de  $f$ ,  $\tau$  et  $\eta$  sont obtenues lors de la calibration optique du système d'acquisition.

On obtient ainsi pour chaque pixel de coordonnées  $(x'_{a'}, y'_{a'})^T|_{R_S}$  les positions possibles du point  $A$  dans  $R_0$  grâce aux équations 4 et 5 :

$$A|_{R_0} = O_S|_{R_0} + \lambda P_{0,S} K \begin{pmatrix} x_{a'} \\ y_{a'} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

La précision du recalage final dépend évidemment de la précision avec laquelle sont effectuées les étapes précédentes. Il s'agit, à chaque étape, d'introduire le moins de bruit possible, afin que la succession de changements de repères n'entraîne pas une trop grande propagation des erreurs. On s'intéresse plus particulièrement à la première étape du traitement de données : la détermination de la position et de l'orientation du cadre dans le système défini par les caméras de suivi.

La précision obtenue lors de cette étape dépend de nombreux paramètres : le nombre et le type (taille du capteur, nombre de pixels) de caméras utilisées pour le suivi, leur position, la distance focale des objectifs, les dimensions de la zone dans laquelle les systèmes d'acquisition se déplacent, etc. Nous utilisons une série de simulations pour contrôler ces nombreux paramètres et trouver des configurations stables qui correspondent à nos situations d'acquisition.

### 2.3 Protocole de simulation

**Matériel** Nos simulations reposent sur trois logiciels. D'abord, sous 3ds Max, on crée une scène comprenant l'objet d'étude, le cadre dans les positions correspondant aux positions d'acquisition et des caméras de suivi. Le cadre est un parallélépipède défini par quelques dizaines de points. Le nombre de points constituant ce parallélépipède correspond en pratique au nombre de repères que l'on fixera sur le cadre.

Cette scène est ensuite exportée en format \*.WRL pour être traitée par un logiciel développé au sein d'i3mainz. Ce logiciel calcule les images capturées par chaque caméra de suivi. Les paramètres de distorsion des objectifs peuvent être entrés manuellement. Surtout, ce logiciel nous permet d'ajouter du bruit pour simuler des acquisitions réelles. Ce bruit Gaussien peut être ajouté indépendamment aux paramètres suivants :

**Coordonnées des points du cadre repère :** les coordonnées relatives des points connues grâce à la calibration géométrique du cadre. Des premiers tests en laboratoire ont montré qu'il est possible de connaître la position de ces points avec une précision de  $0,05$  mm à  $2\sigma$ . Cette valeur est donc utilisée par la suite.

**Coordonnées des points dans l'image :** les coordonnées des repères vus dans les images prises par les caméras de suivi. Celles-ci sont généralement connues avec une précision de  $1/10$  de pixel. Avec un contraste et une netteté suffisants, on peut même atteindre des précisions meilleures que  $1/30$  de pixel.

**Translation des caméras :** la position des caméras de suivi (coordonnées  $X, Y, Z$ ). La précision de ces valeurs dépend du processus de calibration des paramètres extrinsèques. On atteint généralement une précision meilleure que  $0,05$  mm.

**Rotation des caméras :** l'orientation des caméras de suivi (coordonnées  $\Omega, \Phi, K$ ). Généralement connues avec une précision meilleure que  $0,05$  mrad, bien que

cette valeur varie, comme précédemment, en fonction du processus de calibration des paramètres extrinsèques.

Le résultat de ces bruitages est alors traité par un deuxième logiciel, basé sur la librairie AXOri [15], qui calcule par triangulation la position des caméras de suivi, leur paramètres intrinsèques ou la position de l'objet, en fonction des paramètres d'entrée.

**Stratégie de simulation** Les simulations ont lieu en trois temps : D'abord nous ne bruitons que les coordonnées de points de l'image et essayons d'obtenir un nombre et un positionnement optimal des caméras de suivi. L'expérience et les fondamentaux de la photogrammétrie nous permettent de savoir qu'on obtient de meilleurs résultats lorsque les rayons des caméras s'intersectent à  $90^\circ$ .

Nous simulons ensuite le processus de calibration des caméras. L'objet de la scène est maintenant une mire plane que nous déplaçons dans toute la zone de suivi. Cette fois-ci, nous bruitons uniquement les coordonnées des points de l'image car nous supposons que notre mire plane est parfaitement calibrée, alors que la position et l'orientation des caméras sont inconnues.

Les résultats de cette phase de simulation nous permettent de déterminer la précision avec laquelle nous pouvons connaître la position et l'orientation des caméras de suivi sur site. Ces valeurs (rehaussées d'une faible marge) sont utilisées comme paramètres d'entrée pour la dernière phase de simulation qui décrit les objets réels avec un bruit réaliste et permet de connaître la précision du suivi dans les circonstances données.

### 2.4 Matériel d'acquisition

**Caméras multispectrales** Nous avons deux caméras multispectrales à disposition : l'une développée au sein de notre laboratoire et l'autre provenant de l'entreprise Flux-Data. Les caractéristiques de ces deux caméras sont décrites dans la partie supérieure du tableau 1.

La caméra développée par notre laboratoire est basée sur une roue à filtres. Elle a déjà été utilisée pour analyser les objets d'étude. À travers un processus de calibration et un algorithme à réseau de neurones, nous obtenons pour chaque pixel un spectre de réflectance [16].

La caméra FluxData est un système tri-CCD qui acquiert sept bandes spectrales simultanément. Cette caméra possède une moins bonne résolution spectrale que la caméra développée par notre laboratoire, mais la grande taille du capteur nous permettra de recalibrer les données plus précisément.

**Numérisation 3D** Celle-ci est effectuée avec un scanner Atos III de la compagnie GOM, système basé sur la projection de franges. Ce système permet de numériser une surface de  $500 \times 500$  mm avec une précision de  $0,25$  mm. La précision obtenue est de  $0,07$  mm pour une surface de  $150 \times 150$  mm.

TABLE 1 – Caractéristiques des systèmes d’acquisition multispectraux et de l’objectif de simulation associé pour détecter le capteur avec une précision d’un demi pixel. L’objectif le plus contraignant est mis en évidence par la police en gras.

	Distance capteur – objet	Caméra multispectrale du laboratoire	Caméra multispectrale FluxData	
Taille du capteur		1392 × 1040	659 × 494	(pixels <sup>2</sup> )
Taille du pixel		6.45	9.9	(μm)
Distance focale		25	25	(mm)
Objectif de précision angulaire		<b>0.128</b>	0.198	(mrad)
Champ de vision		178 × 134	130 × 98	(mm <sup>2</sup> )
Taille d’un pixel sur l’objet	0,5 m	0.129	0.198	(mm)
Objectif de précision spatial		0.064	0.099	(mm)
Champ de vision		641 × 482	469 × 352	(mm <sup>2</sup> )
Taille d’un pixel sur l’objet	1,8 m	0.464	0.713	(mm)
Objectif de précision spatial		0.232	0.356	(mm)

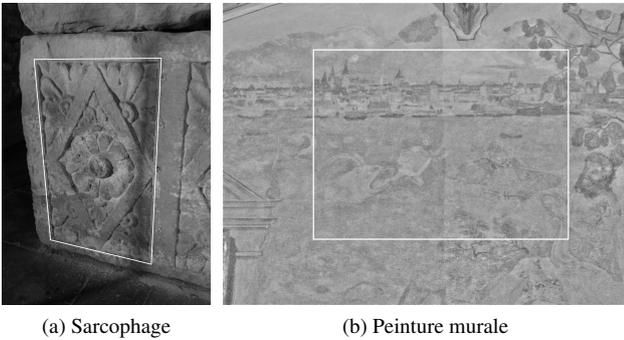


FIGURE 4 – Objets d’étude (détails), la zone d’intérêt est encadrée en blanc. (a) Les zones plus claires à mi-hauteur du sarcophage correspondent aux restes de polychromie. (b) On distingue nettement la frontière entre zone restaurée (à droite) et zone non-restaurée (à gauche).

**Caméras de suivi** Nous utilisons des caméras 5 mégapixels en niveaux de gris (AVT Stingray F-504B) avec un capteur 2/3". Ce capteur est assez grand pour garantir de bons résultats, tout en étant compatible avec les optiques qu’il nous faut (nous utilisons des objectifs Pentax de longueur focale 8 mm).

**Cadre** Nous utilisons un cadre cubique de  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  m. Pour les simulations, ce cadre est modélisé par 56 points répartis de manière équidistante sur la surface du cube. Certains de ces points ne sont pas utilisés car ils ne peuvent être vus par les caméras de suivi.

## 2.5 Objets d’étude

Ce travail découle du besoin d’étudier simultanément les caractéristiques spectrales et spatiales de deux objets du patrimoine : un sarcophage du 3<sup>ème</sup> siècle et un ensemble de peintures murales du 16<sup>ème</sup> siècle.

**Sarcophage** Nous nous intéressons à la détérioration de la surface d’un sarcophage en grès du 3<sup>ème</sup> siècle présent

dans une crypte sous la chapelle Friedhofs de l’abbaye St. Matthias à Trèves (Allemagne). Depuis que ce sarcophage a été découvert, il y a environ cinquante ans, le sarcophage se dégrade rapidement à cause des courants d’air et de l’humidité de la crypte. Les restes de couche picturale et la surface du sarcophage sont en train de s’effriter. Cette dégradation est particulièrement marquée dans la zone qui fait face à l’entrée de la crypte par où s’engouffre l’air.

Depuis plusieurs années, nous étudions une zone de  $40 \times 70$  cm de cette face du sarcophage. Nous effectuons annuellement une numérisation 3D pour mesurer l’usure de la surface. Des acquisitions multispectrales nous permettent également d’étudier les variations calorimétriques de la surface. Pour déceler des corrélations entre les altérations spatiales et spectrales de la surface d’étude, il est indispensable que les deux jeux de données soient précisément recalés.

Vu la taille de la zone d’intérêt, nous plaçons les systèmes d’acquisitions à environ 50 cm de la surface du sarcophage. Il faut alors  $3 \times 6$  acquisitions avec la caméra multispectral pour acquérir toute la surface avec suffisamment de recouvrement ( $4 \times 8$  en utilisant la caméra FluxData). Nous souhaitons détecter la position et l’orientation des systèmes d’acquisition avec une précision d’un demi pixel. Dans la plupart des cas, la précision angulaire est plus difficile à atteindre que la précision spatiale. De plus la caméra multispectrale du laboratoire est plus difficile à repérer avec une précision d’un demi pixel car ses pixels sont plus petits que ceux de la caméra FluxData. La précision angulaire nécessaire pour repérer la caméra multispectrale du laboratoire avec une précision d’un demi pixel est de 0,128 mrad, ceci est donc l’objectif que nous nous fixons pour les simulations.

**Peinture murale** Nous étudions également un ensemble de peintures murales du 16<sup>ème</sup> siècle situées dans le Brömser Hof à Rüdeshcim (Allemagne). Une zone d’environ  $4 \text{ m}^2$  à été restaurée en 2008 et nous souhaitons comparer le vieillissement des surfaces restaurées avec celui des surfaces non-restaurées.

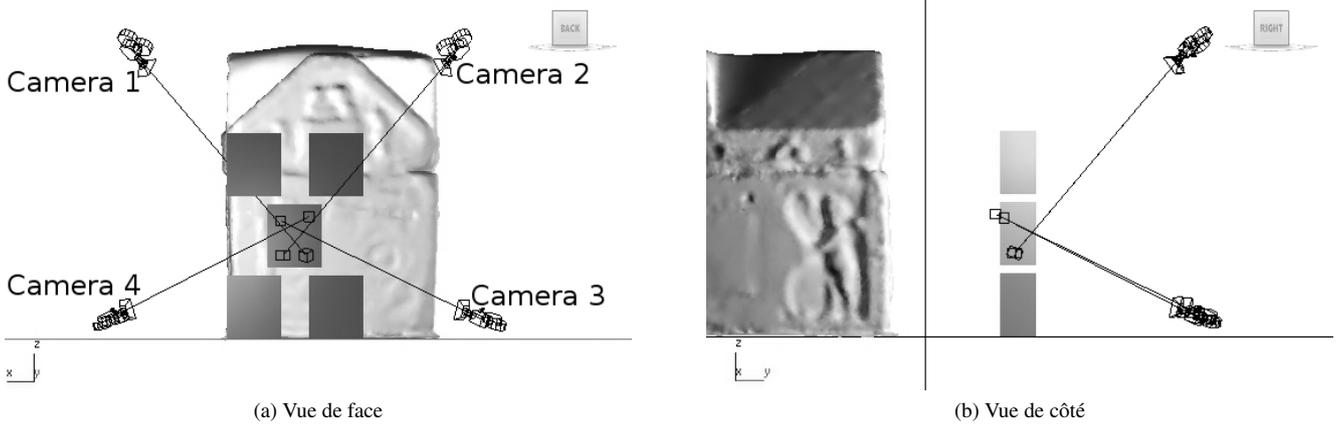


FIGURE 5 – Position des six caméras en face du sarcophage.

TABLE 2 – Résultats des simulations pour l'objet "sarcophage".

Type de simulation	Coordonnées cadre (mm)	Paramètres d'entrée				Résultats	
		Coordonnées image (pixel = $\mu\text{m}$ )	Translation caméras (mm)	Rotation caméras (mrad)	Précision spatiale (mm)	Précision angulaire (mrad)	
Positionnement de 4 caméras	0	1/10	0,345	0	0	0,016	0,100
	0	1/30	0,115	0	0	0,0046	0,032
Calibration des 4 caméras	0	1/10	0,345	0	0	0,021	0,030
	0	1/30	0,115	0	0	0,007	0,010
Simulations globales	0,05	1/10	0,345	0,03	0,04	0,0252	0,176
	0,05	1/30	0,115	0,01	0,02	0,014	0,100

La zone qui nous intéresse mesure environ  $2 \times 1,5$  m. Pour cela, nous avons également besoin de données multispectrales et 3D parfaitement recalées. En plaçant les caméras multispectrales à 1,8 m de la surface d'acquisition il faut soit 16, soit 25 acquisitions pour couvrir toute la zone d'intérêt, en fonction de la caméra utilisée. Pour atteindre notre objectif d'un demi pixel de précision de recalage, notre limite est à nouveau la précision de 0,128 mrad de précision angulaire de détection des capteurs.

### 3 Résultats et discussion

Les résultats suivants sont les résultats maximaux obtenus pour cinq positions (les quatre coins et le centre, illustré figure 5) lorsque quatre caméras surveillent la scène. Quand six caméras surveillent la scène, les résultats sont les résultats maximaux obtenus pour huit positions, illustrées figure 6. Toutes les valeurs sont données à 2 sigma, c'est à dire qu'il y a 95,5 % de probabilité que l'erreur réelle soit plus petite ou égale à la valeur donnée.

#### 3.1 Sarcophage

Vu l'étendue de la zone à couvrir en rapport avec la taille des objets, nous ne voulons pas utiliser plus de quatre caméras pour effectuer le suivi des capteurs, ces camé-

ras étant utilisées en triangulation multi-vues. Au vu des contraintes liés à l'environnement, le positionnement des caméras illustré figure 5 est donc proche de l'optimal. En effet, nous sommes limités dans le positionnement des caméras du bas (numéros 3 et 4) par le sol. Placer les caméras 1 et 2 plus haut aurait pour conséquence d'améliorer la vue sur la face supérieure (qui n'est pas visible par les caméras 3 et 4) mais en créant une vue de perspectives sur la face parallèle au sarcophage, visible par les quatre caméras. La précision du suivi diminuerait donc. La précision obtenue dans cette configuration lorsque seules les coordonnées des points de l'image sont bruitées est donnée dans la première partie du tableau 2.

Nous simulons un processus de calibration des caméras tel que celui décrit section 2.1. Si nous pouvons détecter les coordonnées des mires avec une précision d'un dixième de pixel, nous connaissons la position des caméras à 0,021 mm près et leur orientation à 0,03 mrad près (voir la deuxième partie du tableau 2). On constate que les paramètres extrinsèques des caméras sont déterminés trois fois plus précisément si les coordonnées sont détectées trois fois plus précisément.

Lorsque les coordonnées des mires dans les images sont détectées avec une précision d'un dixième de pixel, nous

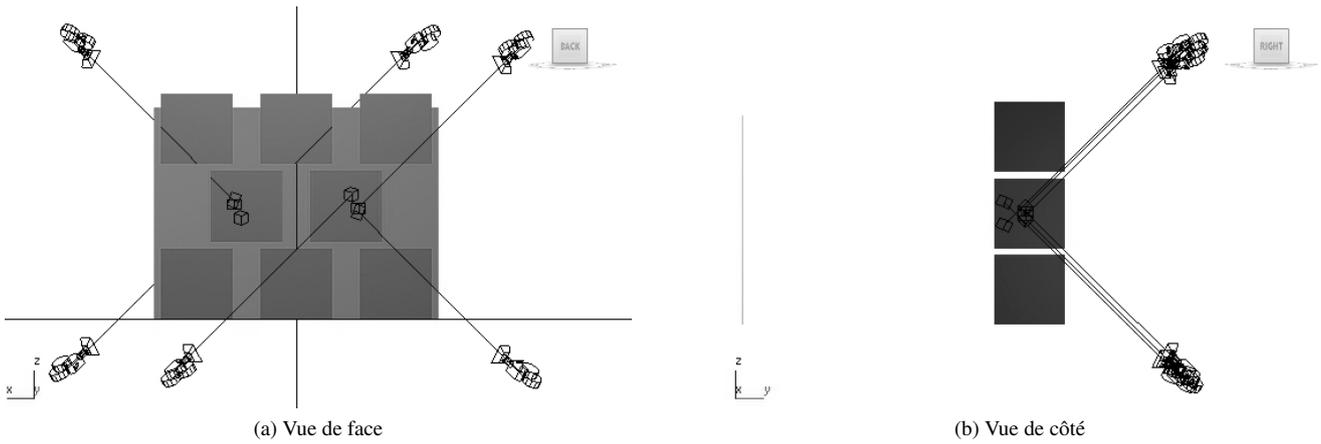


FIGURE 6 – Position des quatre caméras en face de la peinture murale.

TABLE 3 – Résultats des simulations pour l'objet "peinture murale".

Type de simulation	Coordonnées cadre (mm)	Paramètres d'entrée				Résultats	
		Coordonnées (pixel = $\mu\text{m}$ )	Translation (mm)	Rotation (mrad)	Précision (mm)	Précision (mrad)	
Positionnement de 4 caméras	0	1/10	0,345	0	0	0,0298	0,188
	0	1/30	0,115	0	0	0,0126	0,076
Positionnement de 6 caméras	0	1/10	0,345	0	0	0,0164	0,116
	0	1/30	0,115	0	0	0,0054	0,038
Calibration de 6 caméras	0	1/10	0,345	0	0	0,0408	0,036
	0	1/30	0,115	0	0	0,0138	0,012
Simulations globales	0,5	1/10	0,345	0,05	0,04	0,026 <sub>8</sub>	0,192
	0,5	1/30	0,115	0,02	0,02	0,015 <sub>2</sub>	0,106

appliquons donc un bruit de 0,03 mm au positionnement des caméras et 0,04 mrad à l'orientation des caméras de suivi. Ces valeurs découlent des résultats précédents, avec une marge supplémentaire. Nous évaluons aussi la précision du suivi lorsque la précision des points de l'image est de un trentième de pixel. Les résultats sont donnés dans la dernière partie du tableau 2. Nous atteignons nos objectifs de 0,128 mrad de précision angulaire et nos objectifs de précision spatiale sont eux, largement atteints (0,014 mm au lieu du but de 0,064 mm).

### 3.2 Peinture murale

Dans un premier temps, nous optimisons le positionnement de quatre caméras devant la zone d'intérêt. La précision du suivi, alors que seule la position des points de l'image est bruitée, laisse supposer que nous ne pourrions atteindre notre objectif avec si peu de caméras.

Nous optimisons donc le positionnement de six caméras autour de la zone d'intérêt. La pratique et la littérature [17] nous apprennent que la précision du suivi est très peu améliorée au delà de quatre caméras, nous divisons la zone d'intérêt en deux parties de  $1,2 \times 1,5$  m. Ces deux zones

se recouvrent sur 40 cm et sont observées chacune par trois caméras. Le positionnement final de ces six caméras est illustré figure 6 et la précision du suivi obtenu lors du positionnement successif de quatre, puis six caméras est donnée dans la première partie du tableau 3.

Comme précédemment, nous simulons la calibration de ces six caméras simultanément (deuxième partie du tableau 3) et utilisons ces résultats pour obtenir les valeurs à appliquer en entrée aux simulations réalistes. Les résultats de ces simulations sont donnés à la fin du tableau 3. Nous atteignons nos objectifs de 0,128 mrad de précision angulaire et la précision spatiale est atteinte avec un facteur 1,5 de marge (0,152 mm atteints alors que 0,232 mm suffissent).

## 4 Conclusion

Ces simulations prédisent qu'il est possible d'évaluer la position et l'orientation d'un système d'acquisition devant un objet de  $40 \times 70$  cm<sup>2</sup> avec une précision angulaire de 0,1 mrad et une précision spatiale de 0,014 mm en utilisant quatre caméras de suivi. En utilisant six caméras nous repérons la position des systèmes d'acquisitions devant

une surface de  $2 \times 1,5$  m avec une précision comparable (0,106 mrad de précision spatiale et 0,015 mm de précision angulaire). Ces configurations, qui correspondent à des objets réels, nous permettront de projeter des données multispectrales sur un modèle 3D avec une précision meilleure qu'un demi pixel de l'image.

Ces simulations doivent encore être validées à travers une série de tests en laboratoire. Ensuite, nous utiliserons cette technique pour étudier les deux objets du patrimoine qui ont motivé le développement de cette technique. Bien que nous présentons des résultats très spécifiques, cette technique peut-être facilement adapté à d'autres situations et d'autres contraintes. La technique de repérage est indépendante des systèmes d'acquisition utilisés, tant qu'il s'agit de capteurs optiques qui peuvent être caractérisés et calibrés. Les applications possibles sont donc nombreuses.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Conseil Régional de Bourgogne et le laboratoire i3mainz (Allemagne) pour le financement de ce projet. Nous remercions aussi l'Institut für Steinkonservierung (Allemagne) pour sa collaboration autour des problèmes de conservation que posent les objets étudiés.

## Références

- [1] R. S. Berns, "Color-Accurate Image Archives Using Spectral Imaging," in *Proc. of the Natl. Academy of Science - Scientific Examination of Art : Modern Techniques in Conservation and Analysis*, 2005, pp. 105–119.
- [2] A. Pelagotti, A. Del Mastio, A. De Rosa, and A. Piva, "Multispectral imaging of paintings," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 4, pp. 27–36, 2008.
- [3] R. L. Easton Jr., K. T. Knox, and W. A. Christens-Barry, "Multispectral imaging of the Archimedes palimpsest," in *Proc. of the 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, 2003, pp. 111–116.
- [4] K. Rapantzikos and C. Balas, "Hyperspectral imaging : potential in non-destructive analysis of palimpsests," in *IEEE Intl. Conf. on Image Processing 2005*, vol. 2, 2005, pp. 618–621.
- [5] A. Mansouri, A. Lathuiliere, F. Marzani, Y. Voisin, and P. Gouton, "Toward a 3D Multispectral Scanner : An Application to Multimedia," *IEEE MultiMedia*, vol. 14, no. 1, pp. 40–47, 2007.
- [6] K. Tonsho, Y. Akao, N. Tsumura, and Y. Miyake, "Development of goniophotometric imaging system for recording reflectance spectra of 3d objects," in *Proc. of SPIE Vol. 4663*, 2001, pp. 370–378.
- [7] R. Sitnik, G. Mczkowski, and J. Krzeslowski, "Integrated shape, color, and reflectivity measurement method for 3D digitization of cultural heritage objects," in *Proc. of SPIE Vol. 7526*, 2010, p. 75260Q.
- [8] N. Brusco, G. M. Cortelazzo, S. Capeleto, M. Fedel, a. Paviotti, L. Poletto, and G. Tondello, "A System for 3D Modeling Frescoed Historical Buildings with Multispectral Texture Information," *Machine Vision and Applications*, vol. 17, no. 6, pp. 373–393, 2006.
- [9] F. Maes, A. Collignon, D. Vandermeulen, G. Marchal, and P. Suetens, "Multimodality image registration by maximization of mutual information," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 16, no. 2, pp. 187–198, Apr. 1997.
- [10] P. A. Viola and W. M. Wells, "Alignment by maximization of mutual information," *Intl. Journal of Computer Vision*, vol. 24, pp. 137–154, 1997.
- [11] M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ponchio, and R. Scopigno, "Image-to-Geometry Registration : a Mutual Information Method exploiting Illumination-related Geometric Properties," *Computer Graphics Forum*, vol. 28, no. 7, pp. 1755–1764, Oct. 2009.
- [12] J. Hefele, "Real-time photogrammetric algorithms for robot calibration," *Intl. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV, no. Part 5, pp. 33–38, 2002.
- [13] H.-G. Maas, "Dynamic photogrammetric calibration of industrial robots," in *Proc. of SPIE Vol. 3174*, 1997, pp. 106–112.
- [14] R. Schütze, C. Raab, F. Boochs, H. Wirth, and J. Meier, "Optopose - a multi-camera system for fast and precise determination of position and orientation for moving effector," in *9th Conf. on Optical 3D Measurement Techniques*, 2009.
- [15] "Axori photogrammetric bundle block adjustment." [Online]. Available : [http://www.axios3d.de/produkte/funktionlibs/ori/index\\_en.html](http://www.axios3d.de/produkte/funktionlibs/ori/index_en.html)
- [16] A. Mansouri, F. S. Marzani, J. Y. Hardeberg, and P. Gouton, "Optical calibration of a multispectral imaging system based on interference filters," *Optical Engineering*, vol. 44, no. 2, p. 027004, 2005.
- [17] F. Remondino and S. El-Hakim, "Image-based 3D modelling : a review," *The Photogrammetric Record*, vol. 21, no. 115, pp. 269–291, Sep. 2006.