

Recalages et Calibrages Automatiques pour l'Acquisition de Champs Lumineux Surfacciques

Frédéric Larue et Jean-Michel Dischler

LSIIT UMR CNRS-ULP 7005, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France

Résumé

Ce papier présente un nouveau protocole d'acquisition de champs lumineux surfacciques spécialement conçu pour numériser des objets délicats, c'est à dire ceux qui ne doivent être ni touchés ni déplacés. Cette contrainte est particulièrement importante dans le cadre de l'archivage du patrimoine, lorsque des oeuvres d'art sont impliquées. Notre protocole permet la reconstruction automatique d'un modèle géométrique à partir de nombreuses acquisitions et le recalage automatique de nombreuses images par rapport à cette géométrie. En premier lieu, un modèle de lumière structurée est utilisé pour projeter une paramétrisation sur la surface considérée. Chaque point de la surface atteint par cette paramétrisation est identifié de façon unique, quelque soit le point de vue, et la problématique de trouver des correspondances point-point ou point-pixel est immédiatement résolue. Ces correspondances sont finalement utilisées pour effectuer les recalages 3D et les calibrages caméra qui fourniront les données requises par un algorithme de rendu de champs lumineux surfacciques.

1. Introduction

Dans la recherche en informatique graphique, une partie de la communauté scientifique s'emploie, depuis de nombreuses années, à prendre en compte la réalité pour améliorer la qualité visuelle des images de synthèse. L'apparition et le développement d'outils de numérisation ont grandement promu ce genre d'approches en permettant la mesure de données réelles complexes. Malheureusement, bien que ces outils soient grandement utilisés de nos jours, ils sont souvent sujets à de fortes contraintes si bien que de telles mesures ne sont pas toujours simples à réaliser.

La tâche est d'autant plus difficile lorsque l'objet à mesurer ajoute au lot ses propres contraintes. C'est le cas pour notre travail, qui s'inscrit dans le cadre d'un projet national en collaboration avec des musées. L'un des buts de ce projet est l'archivage de pièces d'art grâce à l'établissement d'une empreinte numérique incluant des informations géométriques et photométriques. Nous sommes donc intéressés par le fait de capturer la forme ainsi que l'apparence de modèles fragiles, qui ne doivent pas être touchés ou manipulés trop souvent.

Concernant la géométrie, les dispositifs actuels ne sont



Figure 1: Gauche : photographie du vase grec. Centre : un modèle reconstruit à partir de plusieurs acquisitions. Droite : une vue synthétisée à partir du champ lumineux surfaccique capturé avec notre méthode. Tous les scans et toutes les images ont été recalés automatiquement.

pas en mesure d'acquérir immédiatement la surface entière d'un objet. La plupart des scanners ne sont capables de voir qu'un seul côté de l'objet à la fois et une numérisation complète nécessite plusieurs acquisitions, en plaçant le scanner

en différentes positions, afin de couvrir du mieux possible l'ensemble de l'objet. Les différents morceaux de surface résultants doivent alors être post-traités lors d'une phase de reconstruction. Comme chaque acquisition est définie dans le repère local du scanner, le premier problème posé par la reconstruction est d'exprimer tous les scans dans un même repère global. Ce problème, appelé *recalage*, peut être facilement résolu par des systèmes mécaniques ou robotiques, capables d'enregistrer tous les mouvements du scanner par rapport à sa cible. La transformation associée à chaque scan est obtenue de manière immédiate. Mais en dépit de leur efficacité, de tels systèmes sont onéreux et ne sont pas prévus pour être déplacés (vers un site de mesures, par exemple). Si le mouvement du scanner n'est pas enregistré, il doit être estimé. Le point crucial d'une solution de recalage efficace est alors de pouvoir déterminer avec précision des correspondances entre les points géométriques de différentes acquisitions.

Un autre aspect de la numérisation de surfaces réelles concerne les matériaux. En effet, comme l'illustre la figure 1, la forme seule ne suffit pas à représenter de manière réaliste la copie numérique d'un objet. Parallèlement aux outils de numérisation, des techniques de rendu dédiées ont vu le jour. Parmi celles-ci, les champs lumineux surfacciques tentent de représenter l'apparence d'un objet dans un environnement lumineux fixe mais pour un point de vue arbitraire. Le fait de travailler avec des données réelles nécessite d'avoir mesuré au préalable la luminance émanant de l'objet. Cette information est généralement acquise en prenant plusieurs photographies de la scène en des points de vue différents. Pour interpréter correctement cette apparence capturée, la direction d'observation associée à chaque image doit être connue. Cela peut être fait en résolvant le problème bien connu d'un calibrage caméra, où les paramètres optiques ainsi que la pose sont estimés. Comme cette estimation est calculée à partir des projetés dans l'espace image de nombreux points de la scène, l'efficacité du calibrage, une fois de plus, repose sur la capacité d'établir des correspondances précises entre deux jeux de données : les points géométriques et les pixels caméra correspondants.

Ce papier propose un nouveau protocole pour l'acquisition de la géométrie et de la luminance spécialement conçu pour mesurer des modèles délicats. Aucun contact ni aucun déplacement de l'objet n'interviennent, et les calibrages et recalages sont entièrement automatiques. Dans la suite du papier, le contexte scientifique est d'abord exploré dans la section 2. Le principe général de la méthode est présenté en section 3, suivi des explications techniques en sections 4 et 5. Les analyses et les résultats sont présentés en section 6, suivis d'une conclusion en section 7.

2. Travaux Antérieurs

Un *champs lumineux* est une approximation de la fonction plénoptique [AB91] qui décrit, en chaque point de l'es-

pace, l'incidence lumineuse provenant de l'ensemble de la scène. Les premières approches proposées pour représenter cette fonction étaient des rendus purement à base d'images [LH96, GGSC96], capables de générer de nouvelles vues à partir d'un ensemble de photographies. Plus tard, les *champs lumineux surfacciques* [MRP98, CBCG02] proposent de stocker le champs lumineux directement sur la surface de l'objet, amenant à d'intéressantes simplifications. D'abord, seule l'information pertinente est conservée, négligeant les données d'arrière-plan. Ensuite, des méthode d'application de textures peuvent être utilisées pour accélérer le rendu. Malheureusement, comme les champs lumineux surfacciques nécessitent un support géométrique, autant la forme que la luminance doit être mesurée s'il s'agit de travailler à partir de données réelles. Le problème de recalage est alors d'une grande importance et se situe à deux niveaux : de nombreux scans doivent être fusionnés pour former un modèle 3D unique et de nombreuses images échantillonnant la luminance doivent être recalées par rapport à cette géométrie.

Pour la géométrie, de nombreux travaux ont étudié le problème de la reconstruction à partir de différentes acquisitions. Lorsqu'un premier alignement grossier est connu, des méthodes itératives sont capables de raffiner progressivement la solution [BM92, TL94, BS99, GGT00, GG01]. Malheureusement, le choix d'une procédure entièrement automatique ne permet pas toujours d'avoir accès à une telle connaissance a priori. Reste alors la solution d'extraire des correspondances entre les différents jeux de données pour calculer la transformation permettant l'alignement. Basé sur l'idée que la pose du scanner n'est jamais choisie totalement au hasard, le fait de connaître la stratégie de numérisation [PFC*05] permet de prédire les relations de recouvrement entre les scans. La recherche de correspondances se limite donc à de petits sous-ensembles, et les calculs inutiles sont ignorés. Parfois, lorsque les données proviennent de situations spécifiques, des caractéristiques peuvent être extraites. Les scènes urbaines [ZSHQ04], par exemple, présentent de nombreuses arêtes apparentes et régulières qui peuvent être identifiées. Dans le cas d'un pipeline d'acquisition temps réel [RHHL02], la cohérence temporelle entre les acquisitions successives peut être exploitée. Mais même si l'extraction de caractéristiques ne nécessite pas de connaissance a priori, elle n'est applicable qu'à des scènes spécifiques et non pour des approches générales. Dans la même veine, d'autres travaux tentent d'extraire des caractéristiques invariantes qui ne reposent sur aucune hypothèse concernant la scène [JH97, CHC98, ZH99]. Le principe reste le même, mais ces méthodes fonctionnent sur des données arbitraires. L'inconvénient est qu'elles sont souvent basées sur une recherche exhaustive qui coûte chère en terme de calculs. Les techniques précédentes se focalisent toutes sur un recalage par paires, capable de ne traiter que deux jeux de données à la fois. Or, en général, une numérisation complète nécessite bien plus que deux acquisitions. Des méthodes de recalage global ont été proposées pour prendre en compte la totalité

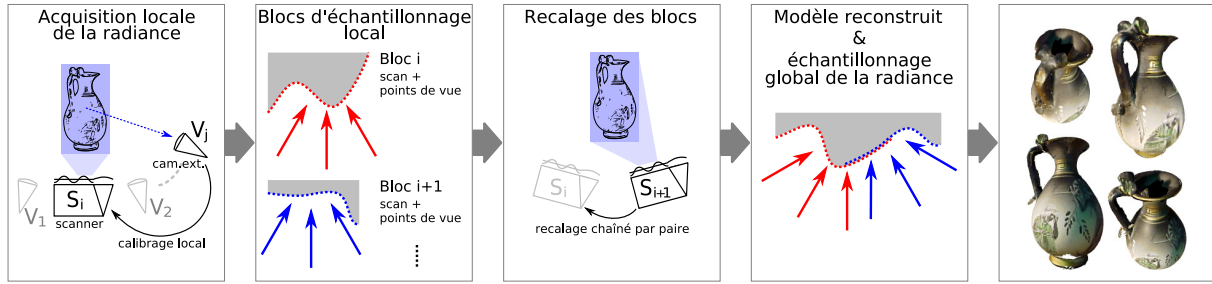


Figure 2: Notre protocole d'acquisition. Un échantillonnage local de la luminance est d'abord mesuré en recalant plusieurs images par rapport au scan courant. Les blocs d'échantillonnage locale qui en résultent sont alors fusionnés par une procédure chaînée qui recalc chaque bloc par rapport au précédent. Les transformations de recalage sont appliquées aussi bien aux scans qu'aux images qui leur sont associées, produisant un modèle 3D et un échantillonnage global de la luminance.

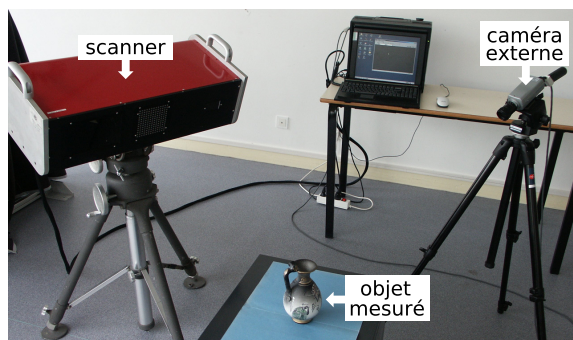


Figure 3: Notre banc de numérisation pour capturer des champs lumineux surficiels. Peu de matériel est nécessaire : un scanner à lumière structurée et une caméra.

des scans en même temps [Pul99, HH01, NI02, ZSHQ04]. Malheureusement, elles nécessitent pour la plupart un alignement initial pour être efficaces, ou même simplement pour fonctionner.

En plus de la forme, un protocole d'acquisition de champs lumineux surficiels doit pouvoir effectuer un calibrage caméra afin de recalculer un ensemble de photographies avec la géométrie. Le moyen le plus connu est l'utilisation de mires [CBCG02]. Ces mires doivent être vues par le dispositif d'acquisition et la tâche n'est pas si évidente. La numérisation de pièces d'art, par exemple, interdit de placer les mires directement sur l'objet. Placées dans son voisinage, des problèmes d'occlusion peuvent se produire. De plus, en fonction des conditions d'éclairage, une segmentation automatique peut échouer à localiser les mires dans l'image. Les méthodes basées sur la concordance des silhouettes [MK99] ne sont pas suffisamment robustes non plus, comme dans le cas de surfaces de révolution ou d'objets symétriques. Plus récemment, [FDG*05] propose un système capable d'inférer de nouvelles relations à partir d'un ensemble de correspondances image-géométrie connues. Mais, même si elle de-

vient négligeable, l'intervention de l'utilisateur reste tout de même nécessaire puisque l'ensemble initial de correspondances doit être spécifié manuellement.

3. Principe Général

Nous nous intéressons à la capture de l'apparence d'objets fragiles, comme des oeuvres d'art, qui ne peuvent pas être touchés ou déplacés. A la fin de la numérisation, nous récupérons toutes les données requises par un outil de visualisation de champs lumineux surficiels, c'est à dire un modèle entièrement reconstruit et un ensemble d'images, échantillonnant la luminance, dont les points de vue sont connus. Pour atteindre ce but, nous proposons un protocole qui effectue la reconstruction du modèle et la détermination des points de vue de manière entièrement automatique et sans aucun contact ni déplacement de l'objet mesuré. De plus, par soucis de mobilité, nous n'avons besoin que d'un matériel léger : seuls un scanner à lumière structurée et une caméra numérique externe sont nécessaires (voir figure 3).

Notre protocole, résumé par la figure 2, fonctionne ainsi : une procédure permet de recalculer automatiquement un ensemble d'images avec un unique scan. Cette étape est répétée autant que nécessaire pour couvrir toute la surface de l'objet, générant de nombreux blocs isolés constitués d'un scan et de l'ensemble d'images qui lui est associé. Les blocs sont ensuite recalés par une procédure chaînée qui recalc chaque bloc nouvellement acquis par rapport au précédent. Les transformations de recalage sont calculées automatiquement et sont appliquées non seulement aux scans mais aussi à leurs ensembles d'images calibrées. Ainsi, la géométrie et les images d'échantillonnage de la luminance sont exprimées dans un même repère global.

Les deux types de recalage impliqués (deux morceaux de surface entre eux ou une image avec une surface) consistent à calculer une transformation entre deux jeux de données à partir d'une liste de correspondances qu'il faut déterminer. L'apport majeur de ce travail est la solution proposée pour

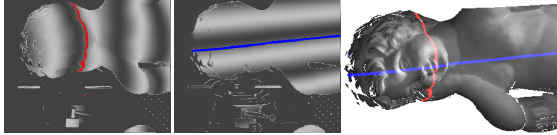


Figure 4: La phase est strictement croissante orthogonalement à la direction des franges, produisant des lignes d'iso-phase sur la surface mesurée. En considérant deux orientations de franges, chaque point est associé à l'intersection de deux lignes d'iso-phase qui l'identifie de manière unique.

résoudre ce problème de relation. Nous utilisons un modèle de lumière structurée pour projeter une paramétrisation 2D sur la surface considérée. En conséquence, tous les points de la surface couverts par cette paramétrisation sont identifiés par un couple unique de coordonnées. La recherche de correspondances se résume alors à trouver dans les différents jeux de données les points dont les coordonnées de paramétrisation sont identiques. Les points de vue associés aux images et les alignements des scans sont ensuite calculés à l'aide d'algorithmes éprouvés (voir les sections 5.1 et 5.2).

Etant donné que notre but est l'acquisition et non la visualisation, nous utilisons un algorithme basique de rendu de champs lumineux surfaiques pour fournir quelques exemples.

4. Extraction des Correspondances

Dans cette section, nous traitons d'abord des propriétés intéressantes du modèle de lumière structurée que nous utilisons, puis nous voyons comment nous étendons ce modèle pour produire une paramétrisation spatiale de la surface mesurée. Cette paramétrisation définit un unique identifiant en chaque point et est utilisée pour établir un ensemble de correspondances entre différents jeux de données. Etant donné que la mesure induit nécessairement des erreurs, certaines des correspondances trouvées peuvent être erronées. Il est donc capital d'estimer la précision des données acquises. C'est pourquoi nous introduisons une métrique basée sur notre paramétrisation pour classifier facilement et efficacement les intrus éventuels.

4.1. Propriétés du modèle de lumière structurée

Le modèle de lumière structurée que nous utilisons est basé sur le principe de décalage de phase. Un ensemble de franges dont la variation d'intensité est décrite par une sinusoïde est projeté sur la surface. Grâce à un traitement d'image, il est possible de déterminer la phase ϕ de cette sinusoïde en chaque point de la surface observé par une caméra d'acquisition. De nombreuses méthodes de mesure de formes, comme [HZ05] par exemple, se basent sur ce principe pour calculer une information de profondeur par triangulation optique. Nous recommandons au lecteur de s'inté-

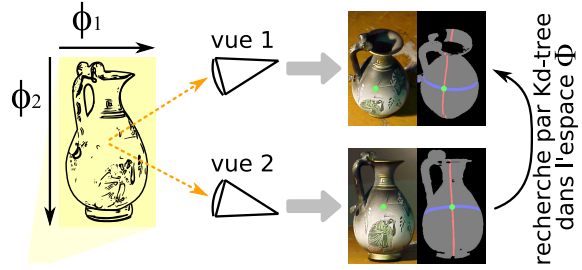


Figure 5: La même paramétrisation Φ (le projecteur et l'objet restent fixes) est capturée depuis deux points de vue différents pour définir des correspondances. Un élément de la première vue est apparié à l'élément de la seconde vue dont le couple de phases est le plus proche.

resser à ces travaux pour de plus amples informations sur les principes de lumière structurée.

La propriété intéressante d'un tel modèle est qu'il induit une paramétrisation 1D de la surface mesurée. En effet, l'information de phase est strictement croissante et est définie de manière continue sur l'ensemble du domaine de projection, perpendiculairement à la direction des franges. Chaque frange est donc clairement identifiée par une unique valeur de phase, générant des lignes d'iso-phase à la surface de l'objet. Une seconde propriété nous dit que le calcul de la phase est indépendant du point de vue choisi pour son acquisition. Tant que le projecteur reste statique par rapport à l'objet d'intérêt, les valeurs de phase calculées en un même point de la surface pour différents points de vue sont identiques, quelques soient les paramètres de la caméra.

4.2. Extension à une paramétrisation de la surface

La paramétrisation 1D induite par ce modèle de lumière structurée peut être facilement étendue à une paramétrisation 2D. En projetant le même modèle de franges selon deux orientations différentes, un couple $\Phi(p) = (\phi_1(p), \phi_2(p))$ de valeurs de phases est défini en chaque point p de la surface. Comme les deux fonctions $\phi_1(p)$ et $\phi_2(p)$ sont strictement croissantes sur leurs domaines respectifs, et ne prennent donc jamais deux fois la même valeur, le couple $\Phi(p)$ représente un identifiant unique pour le point p , comme illustré sur la figure 4. Dans la suite du papier, nous appelons cette paramétrisation 2D la *paramétrisation* Φ .

En considérant les propriétés énoncées précédemment, tant que le scanner et l'objet mesuré restent fixes, la paramétrisation Φ demeure la même et est totalement indépendante du point de vue choisi pour la capturer. En conséquence, tant que la paramétrisation ne change pas, deux pixels p et q pris dans deux points de vue différents et ayant leurs coordonnées $\Phi(p)$ et $\Phi(q)$ identiques font nécessairement référence au même point de la surface.

4.3. Sélection des correspondances

Cette identification de certains points de la surface est utilisée dans le but de trouver des correspondances entre différents jeux de données. Malheureusement, des problèmes d'ordre pratique surviennent du fait que les outils de numérisations sont sujets à de nombreuses sources d'erreur ([RHHL02]). La plus contraignante est la discrétisation CCD : comme la caméra d'acquisition est incapable de capturer un domaine continu, deux pixels de différentes vues ne peuvent jamais voir exactement la même portion de surface, ce qui induit des dissimilarités entre leurs coordonnées Φ respectives. La recherche de correspondances n'est donc plus un test d'égalité mais une recherche du plus proche élément.

Nous utilisons la distance Euclidienne entre les couples de phases comme critère de précision. Etant donnés deux points x et y pris dans différents points de vue mais capturés avec la même paramétrisation Φ et leurs couples de phases respectifs $\Phi(x) = (\phi_1(x), \phi_2(x))$ et $\Phi(y) = (\phi_1(y), \phi_2(y))$, la distance entre x et y , notée $\varepsilon(x, y)$, est définie par l'équation 1 :

$$\varepsilon(x, y) = (\phi_1(x) - \phi_1(y))^2 + (\phi_2(x) - \phi_2(y))^2 \quad (1)$$

Comme l'illustre la figure 5, étant donnés deux ensembles de données identifiés par la même paramétrisation Φ , les correspondances sont déterminées en cherchant dans le second ensemble les éléments qui sont les plus proches des éléments du premier ensemble par rapport à la distance ε . Cette recherche est implantée de manière efficace à l'aide de *Kd-trees*. Comme nous explorons l'espace de la paramétrisation Φ , des arbres de dimension deux suffisent.

4.4. Classification des intrus

Parmi toutes les paires d'éléments résultantes, certaines peuvent ne pas être valides. En effet, même si la recherche par *Kd-tree* fournit un résultat, l'élément le plus proche qui a été trouvé n'est pas nécessairement une bonne correspondance. Nous utilisons la distance ε pour déterminer la validité de chaque association. Si la distance ε dépasse un certain seuil S_ε , les deux éléments sont considérés comme trop éloignés et leur appariement est alors éliminé. Ce seuillage, en plus d'éliminer les intrus, est un bon moyen de ne retenir que les correspondances les plus précises en choisissant un seuil suffisamment bas. Dans notre application, ce seuil dépend des données. Il est défini par $S_\varepsilon = \lambda S$, où S est la distance ε moyenne entre deux pixels adjacents du point de vue considéré et λ est un facteur dépendant de la qualité de recalage désirée.

5. Acquisition d'un Champs Lumineux Surfaceutique

Notre protocole est basé sur les principes précédemment énoncés. Aussi, nous avons modifié notre scanner pour lui permettre de nous restituer une carte de phase avant que celle-ci ne soit transformée en carte géométrique. Une seconde

modification nous permet de capturer la phase projetée par une caméra externe au scanner plutôt qu'avec celle embarquée. Le protocole se décompose en deux parties. D'abord, un échantillonnage local de la luminance qui consiste en un ensemble de photographies dont les points de vue sont calibrés est lié à chaque scan, résultant en ce que nous appelons des *blocs d'échantillonnage local*. Ensuite, tous ces blocs sont fusionnés par une étape de recalage qui remplace toutes les données (géométrie et points de vue) dans un même repère global.

5.1. Acquisition d'un bloc d'échantillonnage local

En ne considérant qu'un seul scan R_i , une information locale de luminance s'acquiert facilement grâce à notre modèle de lumière structurée, comme le montre la figure 6. Après avoir capturé la géométrie, le scanner projette la paramétrisation Φ sur l'objet et la capture. Le scanner n'ayant pas bougé, il existe une correspondance pixel à pixel entre la carte de phase et la carte géométrique R_i , et de nombreux points de la surface peuvent alors être identifiés comme nous l'avons décrit dans la section 4.2. La luminance est alors capturée grâce à la caméra externe. En plus de la photographie v_j , cette caméra capture également la paramétrisation Φ projetée par le scanner. Des correspondances peuvent alors être établies entre de nombreux pixels de v_j et leurs points 3D correspondant dans R_i à l'aide de la procédure de recherche présentée en section 4.3. L'algorithme de calibrage de Tsai [Tsa92] va finalement estimer la transformation scan-vers-caméra $t_{i \leftarrow v_j}$ à partir de ces correspondances point-pixels et ainsi associer une direction d'observation et une localisation à l'image v_j .

Cette procédure est répétée pour de nombreux points de vue de la caméra externe afin d'obtenir une information de luminance avec un échantillonnage des directions d'observation suffisamment dense. Naturellement, la caméra externe doit voir la paramétrisation projetée depuis la position courante du scanner. Aussi l'ensemble des images capturées ne correspond pas à un échantillonnage global de la luminance mais seulement à une partie de celui-ci, définit autour du point de vue du scanner. Nous appelons *bloc d'échantillonnage local* l'ensemble composé d'un scan géométrique R_i et de toutes les images v_0, \dots, v_n qui sont calibrées localement par rapport à ce scan.

5.2. Recalage des blocs

Chaque bloc représente une partie isolée du champs lumineux surfaceutique final. Tous ces blocs doivent donc être fusionnés par un processus de recalage. Ce processus fait plus que simplement aligner les différents morceaux de surface : la transformation rigide, qui est calculée à partir des données géométriques, est appliquée à l'ensemble du bloc d'échantillonnage local, c'est à dire autant au scan qu'à son ensemble d'images calibrées. Ainsi, l'ensemble des don-

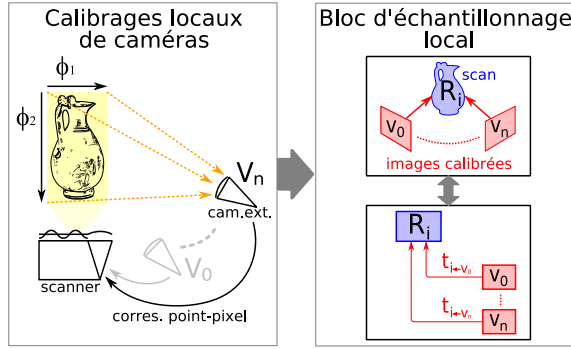


Figure 6: Acquisition d'un bloc d'échantillonnage local. Le bloc est composé d'un scan géométrique et de toutes les images qui ont été calibrées par rapport à celui-ci.

nées, géométriques et photométriques, sont replacés dans un même repère global.

Chaque fois qu'un nouveau bloc doit être acquis, le scanner est placé en une nouvelle position. Cependant, il n'y pas de référence commune explicite entre les différents blocs. Nous utilisons alors la caméra externe comme repère fixe entre deux acquisitions successives, comme le montre la figure 7. Placée à un endroit donné, la caméra capture les deux paramétrisations respectivement projetées depuis l'ancienne position du scanner et depuis l'actuelle. Comme nous l'avons montré précédemment, des correspondances peuvent être extraites entre les pixels de la caméra externe et certains points de chacun des scans R_i et R_{i+1} . Les pixels qui sont liés aux deux scans à la fois nous fournissent les correspondances géométriques nécessaires au recalage des blocs. La transformation rigide $T_{i \leftarrow i+1}$ qui place R_{i+1} dans le repère de R_i est finalement calculée à partir de ces correspondances par une méthode basée sur les quaternions [BM92]. Une fois la transformation de recalage connue, nous l'appliquons non seulement au scan mais aussi aux points de vue des images associées. Ainsi, chaque bloc est recalé par rapport au précédent par une procédure chaînée. La reconstruction géométrique finale est effectuée par l'algorithme VRIP [CL96].

Si deux scanners sont disponibles, une solution plus immédiate est évidemment possible. Le second scanner prend la place de la caméra externe : il capture la paramétrisation projetée par le premier, comme dans la figure 7b. La procédure de recherche basée sur la phase résulte alors en une application directe entre les repères des deux scanners. Il est clair que l'utilisation d'un dispositif intermédiaire au lieu de deux scanners introduit nécessairement une perte de précision. Ce point est abordé dans les résultats. Néanmoins, il est important de noter que les exemples fournis dans ce papier ont été produit avec la méthode utilisant un seul scanner et une caméra externe. L'usage et les mesures ont montré que cette solution est suffisamment précise pour être exploitée.

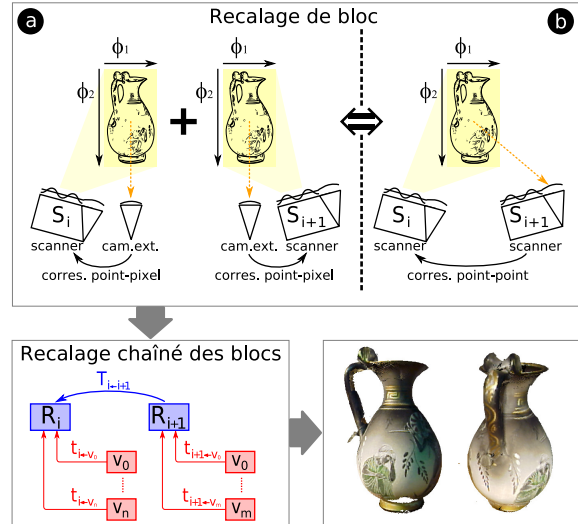


Figure 7: Un bloc d'échantillonnage local est recalé par rapport à celui précédemment acquis par une procédure chaînée. La caméra externe est utilisée comme repère fixe entre les deux positions du scanner.

6. Résultats

Afin de visualiser les données fournies par notre protocole, nous avons développé un algorithme simple qui calcule la couleur d'une primitive géométrique pour un point de vue donné par l'interpolation des trois échantillons de luminance les plus proches. Ces champs lumineux surfacciques ont été reconstruits à partir de 5 scans et de 27 photographies pour le Vase Grec, et de 6 scans et 42 photographies pour la Statue Africaine.

Concernant le calibrage, l'avantage majeur de notre méthode par rapport à l'utilisation de mires traditionnelles est le nombre de correspondances disponibles. Etant donné que le nombre de mires dans une scène est nécessairement limité, le nombre de correspondances ne dépasse généralement pas quelques dizaines. Dans notre cas, ce nombre peut s'élever à plusieurs milliers. De plus, comme nous utilisons une paramétrisation projetée, les problèmes d'occlusion parfois rencontrés avec les mires ne se posent pas.

Concernant le recalage, le tableau 1 compare ICP avec notre méthode en terme de précision. Comme on peut le voir, ICP demeurent plus précis, certainement du fait de sa nature itérative. Mais il est important de rappeler que ICP nécessite un alignement initial là où notre méthode est entièrement automatique. De plus, ICP peut tomber dans un minimum local si les deux surfaces ont une forme similaire. Nous avons rencontré ce problème avec le modèle du Vase Grec, comme le montre le tableau 1. Nous avons également comparé les deux variantes de notre protocole, celle impliquant un seul scanner et la caméra externe et celle impliquant deux scan-

Modèle	ICP		param. Φ	
	moy.	dév. std.	moy.	dév. std.
Ange	0.270	0.235	0.328	0.235
Vase Grec 1	0.234	0.360	0.292	0.371
Vase Grec 2	–	–	0.234	0.336
Statue Africaine	0.248	0.265	0.250	0.262

Table 1: Comparaison de la méthode ICP par rapport à la nôtre. Les valeurs correspondent à la distance moyenne (en mm) entre les plus proches voisins dans la zone de recouvrement des deux scans. Les cellules non renseignées signifient que le recalage par ICP a échoué.

ICP		Caméra inter.		Deux scanners	
moy.	dév. std.	moy.	dév. std.	moy.	dév. std.
0.270	0.235	0.328	0.235	0.303	0.239

Table 2: Comparaison des deux variantes de notre solution de recalage. Les valeurs correspondent à la distance moyenne (en mm) entre les plus proches voisins dans la zone de recouvrement des deux scans.

ners. Les deux scanners ont effectué une acquisition géométrique et la caméra externe a été placée entre les deux durant l'acquisition de phase. Le résultat, reporté dans le tableau 2, montre la perte de précision introduite par l'utilisation de la caméra externe. Cette perte était prévisible mais pas aussi significative que nous le pensions.

En terme de performance, les temps de recalage sont donnés dans le tableau 3. Ces temps ont été obtenus avec un processeur AMD Athlon 3800+. La partie la plus lourde de notre technique est la recherche basée sur la phase. Cette recherche est faite dans l'espace de la paramétrisation Φ et une seule fois, contrairement à ICP pour lequel des *Kd-trees* de dimension trois doivent être recalculés pour chaque itération. Les performances du calibrage n'ont pas été mesurées puisqu'elles ne dépendent que de l'efficacité de l'algorithme de Tsai.

Il y a deux inconvénients avec notre méthode. Le principal est la nature cumulative de l'erreur due au recalage chaîné. En fait, ce problème se pose pour toutes les méthodes qui ne sont pas conçues dans le but d'un recalage global. Cependant, nos résultats peuvent être utilisés comme bon point de départ pour un algorithme de recalage global nécessitant un alignement initial. Les temps donnés dans le tableau 3 montrent que notre recalage est suffisamment rapide pour être utilisé comme initialisation pour une autre méthode. Le second inconvénient se situe au niveau de l'acquisition de la luminance. Comme la paramétrisation Φ doit être connue de chaque point de vue, l'usage d'une caméra à l'épaule n'est pas permis. En effet, le point de vue de la caméra doit rester fixe pendant le temps nécessaire à l'acquisition d'une photographie et de deux cartes de phases. Le temps d'acquisition pour l'information de luminance risque alors d'être plus long

Nb. points ds. le 1 ^{er} scan	Nb. points ds. le 2 nd scan	Nb. corres. trouvées	Temps de recalage
325K	331K	15K	629
331K	329K	2K	455
75K	76K	3K	419
215K	182K	10K	579
23K	20K	11K	250

Table 3: Temps mesurés lors des recalages de différentes paires de scans (en ms.). Ces temps incluent la recherche des correspondances et le calcul de la transformation rigide.

comparé à l'utilisation de mires standards. De plus, comme le calibrage dépend du recalage pour déterminer l'échantillonnage global de la luminance, l'accumulation de l'erreur énoncée précédemment se répercute forcément sur la précision de la localisation des points de vue.

7. Conclusions & Perspectives

Nous avons présenté un nouveau protocole pour l'acquisition de champs lumineux surfacciques. Peu onéreux et entièrement automatique, ce protocole est conçu pour mesurer des objets délicats, comme des oeuvres d'art, qui ne peuvent être déplacés ou touchés. Nous utilisons un modèle de lumière structurée pour projeter une paramétrisation sur la surface analysée qui nous permet d'identifier de manière unique de nombreux points de la scène. Cette identification est utilisée pour déduire les directions d'observation associées à un ensemble d'images qui capturent la luminance de la scène, mais également pour effectuer un recalage chaîné afin de reconstruire un modèle unique à partir de différents scans.

Grâce à l'utilisation d'une paramétrisation spatiale, une relation quasi immédiate est établie entre les différents jeux de données. La recherche de correspondances, et donc le recalage, est alors très rapide comparé à des méthodes itératives, même si les résultats ne sont pas aussi précis. Pour obtenir une meilleure précision, notre solution pourrait être utilisée comme le point de départ d'une méthode de recalage global, ce qui empêcherait l'accumulation de l'erreur.

Concernant l'acquisition des matériaux, nous travaillons sur une extension de ce protocole afin de permettre la numérisation de modèles avec leur information bidirectionnelle complète. Nous sommes particulièrement intéressés par la simplification du processus de numérisation qui est, encore aujourd'hui, une tâche fastidieuse du fait de la nécessité d'un échantillonnage exhaustif de l'illumination. En effet, capturer une information bidirectionnelle signifie contrôler l'environnement lumineux. La capacité à localiser précisément une source lumineuse est alors un autre but à atteindre.

8. Remerciements

Ce travail est financé par le ministère français de la recherche (projet RIAM, AMI3D, no. 04 C 292).

Références

- [AB91] ADELSON E., BERGEN J. : The plenoptic function and the elements of early vision. In *Computational Models of Visual Processing* (1991).
- [BM92] BESL P. J., MCKAY N. D. : A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14, 2 (1992), 239–256.
- [BS99] BENJEMAA R., SCHMITT F. : Fast global registration of 3d sampled surface using a multi-z-buffer technique. In *Image and Vision Computing 17* (1999), pp. 113–123.
- [CBCG02] CHEN W.-C., BOUGUET J.-Y., CHU M., GRZESZCZUK R. : Light field mapping : efficient representation and hardware rendering of surface light fields. In *SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (2002), pp. 447–456.
- [CHC98] CHEN C.-S., HUNG Y.-P., CHENG J.-B. : A fast automatic method for registration of partially-overlapping range images. In *ICCV '98 : Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision* (1998), p. 242.
- [CL96] CURLESS B., LEVOY M. : A volumetric method for building complex models from range images. In *SIGGRAPH '96 : Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1996), pp. 303–312.
- [FDG*05] FRANKEN T., DELLEPIANE M., GANOVELLI F., CIGNONI P., MONTANI C., SCOPIGNO R. : Minimizing user intervention in registering 2d images to 3d models. *The Visual Computer* 21, 8-10 (sep 2005), 619–628. Special Issues for Pacific Graphics 2005.
- [GG01] GREENSPAN M., GODIN G. : A nearest neighbor method for efficient icp. In *3DIM'01 : Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling* (2001), pp. 161–168.
- [GGSC96] GORTLER S., GRZESZCZUK R., SZELISKI R., COHEN M. : The lumigraph. In *SIGGRAPH '96 : Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1996), pp. 43–54.
- [GGT00] GREENSPAN M., GODIN G., TALBOT J. : Acceleration of binning nearest neighbor methods. In *Vision Interface 2000* (2000).
- [HH01] HUBER D., HEBERT M. : Fully automatic registration of multiple 3d data sets. In *IEEE Computer Society Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum (CVBVS 2001)* (Dec 2001).
- [HZ05] HUANG P. S., ZHANG S. : A fast three-step phase-shifting algorithm. In *Proceedings of SPIE, OpticsEast* (2005).
- [JH97] JOHNSON A. E., HEBERT M. : Surface registration by matching oriented points. In *NRC '97 : Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling* (1997), p. 121.
- [LH96] LEVOY M., HANRAHAN P. : Light field rendering. In *SIGGRAPH '96 : Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1996), pp. 31–42.
- [MK99] MATSUSHITA K., KANEKO T. : Efficient and handy texture mapping on 3D surfaces. In *Computer Graphics Forum (Eurographics '99)* (1999), vol. 18(3), pp. 349–358.
- [MRP98] MILLER G., RUBIN S., PONCELEON D. : Lazy decompression of surface light fields for precomputed global illumination. In *Rendering Techniques '98* (1998), pp. 281–292. Proc. 9th Eurographics Rendering Workshop, Vienna, Austria, June 29–July 1, 1998.
- [NI02] NISHINO K., IKEUCHI K. : Robust simultaneous registration of multiple range images. In *Proceedings of Fifth Asian Conference on Computer Vision ACCV'02* (2002), pp. 454–461.
- [PFC*05] PINGI P., FASANO A., CIGNONI P., MONTANI C., SCOPIGNO R. : Exploiting the scanning sequence for automatic registration of large sets of range maps. *Computer Graphics Forum* 24, 3 (2005), 517–526.
- [Pul99] PULLI K. : Multiview registration for large data sets. In *International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling* (1999), pp. 160–168.
- [RHHL02] RUSINKIEWICZ S., HALL-HOLT O., LEVOY M. : Real-time 3d model acquisition. In *SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (2002), pp. 438–446.
- [TL94] TURK G., LEVOY M. : Zippered polygon meshes from range images. In *SIGGRAPH '94 : Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1994), pp. 311–318.
- [Tsa92] TSAI R. Y. : A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. In *Radiometry* (1992), pp. 221–244.
- [ZH99] ZHANG D., HEBERT M. : Harmonic maps and their applications in surface matching. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '99)* (1999), vol. 2.
- [ZSHQ04] ZHANG A., SUN W., HU S., QIAN C. : Automatic global registration of multiple 3d data sets from outdoor urban environments based on feature units. In *SCCG '04 : Proceedings of the 20th spring conference on Computer graphics* (2004), pp. 193–199.