

Une représentation locale ordonnée intrinsèque aux surfaces 3D:

Application à un algorithme de recalage rapide

GADACHA Wieme, GHORBEL Faouzi

Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique

Laboratoire Cristal/Pole GRIFT

Manouba 2010, Tunisie

{wieme.gadacha, Faouzi.ghorbel }@ensi.rnu.tn

Résumé

Dans cet article, nous proposons d'introduire un algorithme de recalage rapide des surfaces de l'espace tridimensionnel réel \mathbb{R}^3 indépendamment du paramétrage initial. Par une procédure d'échantillonnage des coordonnées géodésiques autour d'un point de référence préalablement fixé sur la surface, l'ensemble des points qui en résulte est ordonné et sera à la base de l'algorithme de recalage proposé. Cet ensemble est par ailleurs, relativement invariant vis à vis des transformations du groupe des isométries affines de l'espace tridimensionnel $M(3)$. Le pas d'échantillonnage minimum est déterminé à partir d'une version généralisée du théorème de Shannon au paramétrage des coordonnées géodésiques de la surface. La robustesse d'extraction des coordonnées locales est évaluée sur des surfaces mathématiques. L'algorithme de recalage est appliqué ensuite sur des surfaces 3D réelles, les expérimentations sont réalisées sur la base Bosphorus [6] des visages 3D.

Mots clefs

Recalage 3D de surfaces, paramétrage de surfaces, coordonnées géodésiques, Théorème de Shannon.

1 Introduction

Le recalage rigide de surfaces de l'espace tridimensionnel représente actuellement un sujet d'intérêt de premier plan dans le domaine de la représentation de formes et de mouvements des objets 3D. L'engouement récent de cette problématique trouve son origine dans les nouvelles applications telles que l'indexation et la compression des maillages qu'ils soient statiques (3D) ou dynamiques (4D), la biométrie par le biais de la reconnaissance faciale, le contenu 3D sur les réseaux Internet, les visites virtuelles... Les domaines plus traditionnels tels que la vision robotique, l'imagerie médicale et l'imagerie aérienne, à titre d'exemples, sont tout aussi concernés dans leurs nouvelles tendances et développements.

Plusieurs approches de recalage 2D ont été proposées dans la littérature au fil des dernières décennies. Celles-ci souffrent toujours de la sensibilité à la différence d'éclairage et de la variation du point de vue. Le recalage 3D est une des solutions préconisées pour répondre à de telles contraintes difficiles.

L'algorithme le plus communément utilisé pour le recalage de surfaces 3D est l'algorithme du plus proche voisin itéré (ICP) initié par [10] et [11]. Sa mise en œuvre se base sur la minimisation d'une distance donnée entre une surface référence et une surface test. Son principe consiste à itérer et alterner jusqu'à convergence deux étapes: la mise en correspondance des nuages de points des deux surfaces et l'estimation de la transformation rigide existante entre elles. Une bonne estimation de la transformation est conditionnée par la phase d'appariement des points. Un recalage grossier permettant d'estimer les positions relatives des deux surfaces est nécessaire comme initialisation à la réalisation d'ICP.

Nombreuses variantes d'ICP ont été proposées dans [8], celles-ci affectent les différentes phases de l'algorithme allant du choix de la méthode de mise en correspondance [9] à la minimisation de la métrique d'erreur entre la surface test et la surface transformée.

D'autres versions d'ICP se sont orientées vers la sélection d'un ensemble de points participants à la procédure de recalage. Nous citons à ce propos, les travaux de [14] qui introduisent une pondération sur les points, liée à la fiabilité des données offrant une version optimisée de la procédure de sélection.

D'autres approches de recalage 3D ont eu recours à des méthodes d'alignement basées sur un ensemble de points d'intérêt appartenant aux surfaces de \mathbb{R}^3 . A cet effet, nombreux travaux dans la littérature traitent des techniques d'extraction de points particuliers.

L'une de ces méthodes est inspirée de celles développées sur les images planes couleurs appelée transformation de caractéristiques visuelles invariante à l'échelle (Scale-invariant feature transform : SIFT) [13].

Des propriétés différentielles des surfaces bien exposées dans [3] comme les courbures principales, la concavité, la convexité, peuvent servir pour sélectionner des points

caractéristiques répondants à certaines propriétés de stabilité et de robustesse.

[17] propose un paramétrage uniformément invariant de la surface 3D, générant des points paramétriques qui assurent une représentation uniforme de la surface.

D'autres catégories de travaux se basent sur l'extraction de points descripteurs à partir de courbes définies sur la surface 3D. Différentes représentations de courbes ont été introduites dans la littérature. [4] proposent des courbes planes de niveaux. Tandis que [1] ont recours à la distance géodésique pour extraire des courbes de niveaux. Dans [5] et [2] une paramétrisation polaire intrinsèque est définie sur la surface à partir d'un réseau de courbes connu sous la dénomination de système darcy.

Dans l'ensemble de ces travaux, les points descripteurs extraits ne sont pas ordonnés et le nombre de points à extraire reste indéterminé.

Dans le cadre de ce travail, nous proposons de mettre en œuvre un algorithme de recalage faisant intervenir un ensemble de points organisés et locaux basé sur la notion de géodésique dans le but d'améliorer la procédure au sens de la précision et de la complexité. L'isotropie de la paramétrisation obtenue permet de réduire les cas de non-convergence grâce à une mise en correspondance plus robuste. La résolution des points à retenir pour la mise en correspondance sera déterminée par le spectre de Fourier 2D dans l'espace fréquentiel.

Ainsi dans le présent travail, nous consacrerons une première partie à la description de l'approche proposée par la définition des points participants au recalage et de la méthode de détermination de la résolution optimale de ces descripteurs. Des expérimentations sur des surfaces analytiques puis sur des surfaces faciales feront l'objet de la deuxième partie.

2 Approche proposée

L'approche de recalage proposée se compose de deux principales étapes : une première phase consiste à extraire un ensemble de points descripteurs suffisants pour le processus de recalage et une seconde qui permet l'estimation des transformations rigides entre les surfaces en question.

2.1 Sélection des points candidats à la mise en correspondance

2.1.1 Extraction des points descripteurs

Le choix des points candidats à la mise en correspondance est d'une importance capitale puisque le processus de recalage peut converger vers un minimum local ou peut même diverger. La convergence du recalage est en fait dépendante de la phase de mise en correspondance.

Une solution est de sélectionner un ensemble de points caractéristiques de la surface 3D qui seront candidats à la procédure de recalage. La collecte de ces points est conditionnée par leurs propriétés de stabilité.

Un système de coordonnées locales sur la surface qui vérifie un certain nombre de propriétés telles que la complétude, l'invariance aux variations locales, l'étendue globale sur la surface et surtout la paramétrisation assurée par l'indexation des points est mis en place. En effet, grâce à l'intersection d'une collection de courbes radiales et d'un ensemble de courbes de niveaux géodésiques relatif à un point de référence, un jeu de points ordonnés, localisés et invariablement lié à la surface est extrait.

L'algorithme d'extraction ordonnée des points descripteurs a été détaillé dans [18].

L'originalité de cette méthode réside dans le fait que ces points outre qu'ils soient ordonnés, sont indexés par le niveau de courbe géodésique et la ligne radiale auxquelles ils appartiennent.

Par conséquent, la phase de mise en correspondance devient obsolète: Une paire de points homologues correspond aux points qui appartiennent à la courbe géodésique et la ligne radiale de même niveau.

Une amélioration considérable en termes de complexité est ainsi obtenue. Avec le nouveau système de coordonnées, la phase de mise en correspondance est de l'ordre de $O(n)$ avec n le nombre de points descripteurs. Pour l'algorithme ICP classique, la complexité vaut $O(N^2)$ avec N le nombre de points de la surface ($N \gg n$).

2.1.2 Détermination de la résolution optimale par spectre de Fourier 2D-3D

La représentation surfacique invariante définie peut être réalisée pour plusieurs résolutions. En fait, la variation du nombre de courbes géodésiques et lignes radiales permet d'obtenir différents nombres de points descripteurs. Le principe consiste alors à chercher le nombre minimal de points ordonnés et paramétrés à extraire de chacune des surfaces mises en jeu pour assurer un recalage optimal. Ces paires de points homologues devraient assurer une bonne estimation des transformations rigides entre les surfaces.

Le nombre de points optimal à retenir est obtenu à partir de l'information spectrale de la fonction coordonnée locale de l'espace tridimensionnel. La Transformée de Fourier 2D des composantes tridimensionnelles des coordonnées géodésiques est calculée (Bracewell, 1986).

$$TF_{2D} = \frac{1}{n} \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} p_{k,l} \omega_n^{-ik} \omega_m^{-jl}$$

Tel que ω_n et ω_m sont les racines complexes de l'unité et sont respectivement données par les expressions suivantes: $\omega_n = \exp\left(\frac{2i\pi}{n}\right)$ et $\omega_m = \exp\left(\frac{2i\pi}{m}\right)$

$P_{k,l} = (x_{k,l}, y_{k,l}, z_{k,l})$ sont les composantes tridimensionnelles des points paramétriques indexés par le niveau de courbe géodésique et ligne radiale auxquelles ils appartiennent.

Ensuite, l'application de la règle de Shannon permet d'extraire la résolution optimale à considérer garantissant une description globale de la surface.

Par ailleurs, des contraintes comme l'occlusion ou les déformations locales peuvent être prises en compte par certains critères dans l'objectif de déterminer cette résolution minimale.

2.2 Estimation des transformations affines entre surfaces 3D

Les paires de points homologues identifiés servent à estimer les transformations affines (rotation et translation) entre les surfaces en question. Cette étape est assurée par la distance de Hausdorff généralisée à l'espace des formes.

La distance de Hausdorff dans l'espace des formes d_H entre deux nuages de points S_1 et S_2 est évaluée selon l'expression introduite par [7]:

$$d_H(S_1, S_2) = \max(\rho(S_1, S_2), \rho(S_2, S_1))$$

$$\rho(S_1, S_2) = \inf_{(R,t) \in M(3)} \|S_1 - (RS_2 + t)\|_{L^2}$$

3 Expérimentations

Les expérimentations sont menées en deux étapes : une première étape consiste en l'application de la méthode d'extraction du système de coordonnées locales proposée sur les surfaces analytiques. Des expérimentations sur des visages 3D seront exposées dans une seconde étape pour discuter l'efficacité de l'algorithme de recalage.

3.1 Etude sur des surfaces analytiques

Dans cette partie, nous avons pour objectif d'étudier la robustesse de l'étape d'extraction du système de coordonnées locales. Pour cela, nous nous proposons d'agencer deux manières distinctes pour la mise en œuvre de ce système des coordonnées locales autour d'un point de référence sur des surfaces mathématiques.

Premièrement, des expérimentations ont été réalisées sur des surfaces paramétriques à partir desquelles les étapes de la construction de ce système de coordonnées peuvent être analytiquement calculées.

La seconde (détaillée dans [18]) est explicite et appliquée aux maillages représentant la surface d'un cône.

Dans ce sens, considérons la représentation paramétrique usuelle d'un cône de rayon r et de hauteur h :

$$\begin{cases} x(u, \theta) = \left(\frac{h-u}{h}\right)r \cos(\theta) \\ y(u, \theta) = \left(\frac{h-u}{h}\right)r \sin(\theta) \\ z(u, \theta) = u \end{cases} \quad \begin{array}{l} \theta \in [0, 2\pi] \\ u \in [0, h] \end{array}$$

Il est immédiat de démontrer qu'une courbe géodésique joignant deux points $P_1(u_1, \theta_1)$ et $P_2(u_2, \theta_2)$ s'écrit sous la forme:

$$\begin{cases} x(t) = r \frac{h-z}{h} \cos(t) \\ y(t) = r \frac{h-z}{h} \sin(t) \\ z(t) = h - \frac{C_1}{r \cos\left(\frac{C_2 - rt}{\sqrt{r^2 + h^2}}\right)} \end{cases}$$

Avec $t \in [\theta_1, \theta_2]$

La construction analytique du système de coordonnées est illustrée dans la figure 1 pour le point de référence choisi comme le sommet du cône.

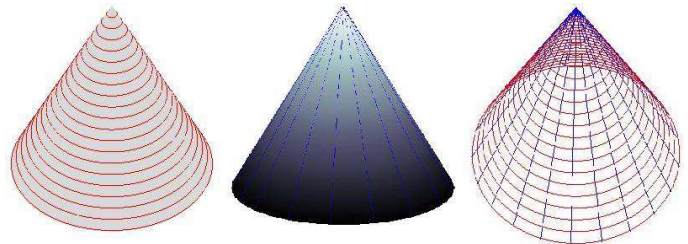


Figure1 : Extraction du système de coordonnées locales analytiquement (respectivement les courbes de niveaux, les lignes radiales et le système des deux réseaux de courbes)

La figure 2 présente le système de coordonnées extrait à partir d'un maillage du cône pour différentes résolutions.

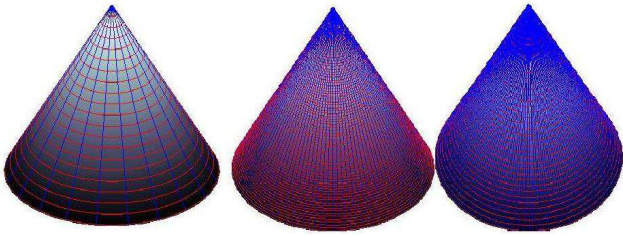


Figure 2: Différentes résolutions des points descripteurs (construction selon la méthode proposée)

La superposition des systèmes de coordonnées locales par les deux différentes méthodes sur la surface du cône montre une légère erreur de l'ordre de 10^{-4} . Ceci corrobore l'exactitude et la précision des points descripteurs.

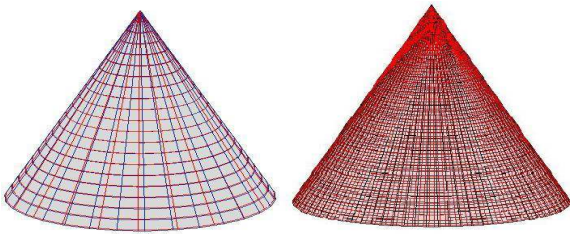


Figure 3: Superposition des deux systèmes de coordonnées locales construits analytiquement (bleu) et par l'approche proposée (rouge)

3.2 Application sur des surfaces faciales

Afin d'illustrer dans la pratique l'intérêt de l'algorithme de recalage proposé, l'analyse tridimensionnelle des surfaces faciales dans un objectif biométrique fait l'objet de ce paragraphe. La faible complexité et la meilleure précision sont des propriétés très souhaitables dans ce type d'application et il est bien connu que le recalage représente une des tâches les plus importantes des systèmes de reconnaissance faciale vu la largeur des bases de données correspondantes et le pouvoir discriminant exigé pour distinguer les formes différentes de visages. Ainsi la base de données Bosphorus [6] a été considérée. Elle est composée de plus de 105 sujets (hommes et femmes), chaque sujet possède cinq états d'expressions faciales correspondant à l'état de tristesse, de joie, de surprise, de peur et du dégoût avec l'exception de l'expression neutre.

Pour la réalisation de nos expérimentations, une base de test a été construite avec des visages pris aléatoirement de la base.

Le bout du nez est choisi comme point de référence. La représentation faciale intrinsèque est réalisée sur des surfaces représentant des visages humains. Les étapes de cette construction sont illustrées successivement dans les figures (4.a) par la génération des courbes de niveaux géodésiques puis dans (4.b) par l'extraction des lignes radiales et enfin dans (4.c) par les deux réseaux de courbes.

Ces réseaux de courbes génèrent des points descripteurs. Il s'agit de l'ensemble des intersections des lignes radiales avec des courbes de niveaux représentées par la figure (4.d).

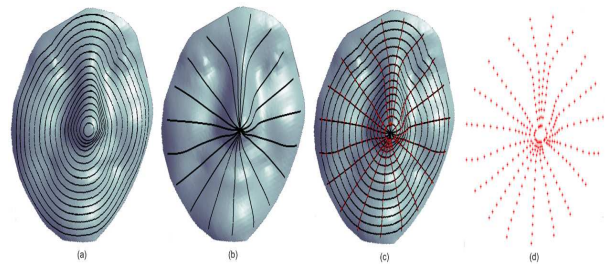


Figure4. Construction du réseau des courbes de niveaux géodésiques et des lignes radiales

Cette représentation faciale peut être définie pour différentes valeurs des nombres de courbes de niveaux et des lignes radiales. Différentes résolutions plus ou moins fines des points descripteurs sont par conséquent obtenues. Ce fait est illustré par la figure 5.

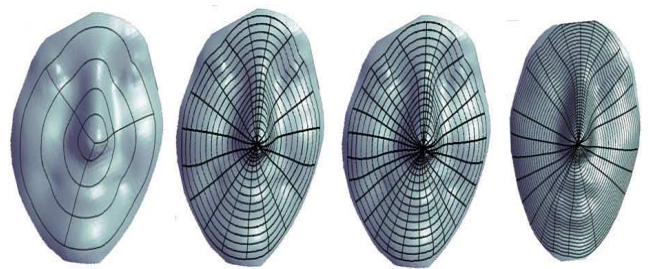


Figure5. Différentes résolutions des points descripteurs

Ces points descripteurs seront candidats dans le processus de recalage. En effet, ces points qui participeront dans l'estimation des transformations rigides entre les surfaces faciales sont des paires de points homologues nécessairement correspondants.

La convergence de la procédure de recalage vers un minimum local est ainsi évitée. Une phase de mise en correspondance plus robuste et qui requière moins de complexité algorithmique est en effet mise en place.

Le nombre de points extraits à partir de la surface dépend du nombre de courbes de niveaux géodésiques et des lignes radiales définies. La résolution des points à considérer pour assurer un recalage optimal a été évaluée par la règle de Shannon dans l'espace fréquentiel. L'étude du spectre de la transformée de Fourier 2D des composantes tridimensionnelles paramétrées permet l'extraction de la résolution minimale reflétant l'information globale des surfaces 3D et assurant par conséquent un recalage plus précis.

La résolution optimale des coordonnées paramétriques obtenue à partir du spectre de la fonction coordonnée locale est corroborée par l'étude de l'évolution de la distance de Hausdorff en fonction de la résolution.

Pour ce faire, on considère une base de test composée de deux classes : une première classe contient des visages de la même personne avec différentes expressions faciales et une seconde contient des visages de différents individus.

On calcule la distance de Hausdorff entre le modèle référence et le modèle test résultant du recalage pour différentes résolutions des points descripteurs en vue de déterminer le nombre suffisant de points invariants garantissant un meilleur recalage. Plus la distance de Hausdorff est petite, meilleur est le recalage.

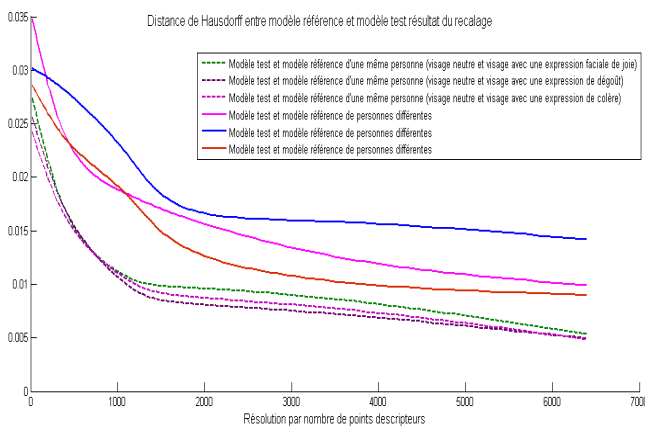


Figure 7 : Distance de Hausdorff en fonction de la résolution des points descripteurs

La figure 7 montre que plus la résolution est importante, meilleur est le recalage puisque les valeurs des distances de Hausdorff décroissent de manière régulière vers une valeur constante.

D'autre part, nous remarquons aussi qu'à partir d'une certaine résolution la valeur de distance devient presque

constante. Plus précisément, la distance de Hausdorff entre deux surfaces faciales d'une même personne tend vers une valeur deux fois moins importante que la distance de Hausdorff pour des surfaces de visages de différents individus. En effet, celle-ci converge de manière monotone vers un seuil constant au fur et à mesure que la résolution est augmentée. Ce seuil est la résolution à retenir pour le recalage.

Conclusion

Dans cet article, nous avons introduit un nouvel algorithme de recalage de surfaces 3D avec une étape de mise en correspondance plus robuste. L'ensemble des points participants au processus de recalage définissent une paramétrisation de surface et construisent un descripteur local relativement à un point de référence et invariablement lié à la surface. Un tel descripteur est constitué d'un ensemble discret de points ordonnés pouvant être enrichi indéfiniment.

La résolution minimale des points descripteurs suffisante à assurer un recalage optimal est calculée par le théorème de Shannon sur le spectre de Fourier 2D des coordonnées tridimensionnelles.

Les performances de l'approche de recalage proposée ont été évaluées par un calcul de la distance de Hausdorff généralisée à l'espace des formes pour différentes résolutions.

Nos futurs travaux s'orienteront vers la classification faciale en utilisant ce recalage à plusieurs endroits importants au niveau de la surface 3D (coordonnées locales autour de différents points d'intérêt morphologiquement ayant un sens).

Références

- [1] Cohen L.D., Kimmel R. Global minimum for active contour model: A minimal path approach. *International Journal of Computer Vision*, 24(1): 57-78, August 1997.
- [2] Mpiperis I., Malassiotis S., Strintzis M. G 3D Face Recognition with the Geodesic Polar Representation. *IEEE Trans on Information Forensics and Security*, 2(3):537-547, September 2007.
- [3] Spivak M. A comprehensive introduction to differential geometry. 3 pages 359-367, 1970.
- [4] Samir C., Srivastava A., Daoudi M. Three-dimensional face recognition using shapes of facial curves. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28:1858-1863, 2006.
- [5] Berretti S., Del Bimbo A., Pala P. 3D Face Recognition Using Iso geodesic Stripes. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(12):2162-2177, 2010

- [6] Savran A., Alyz A., Dibeklioglu H., Eliktutan O., Gkberk B., Sankur B., Akarun L., *Bosphorus Database for 3D Face Analysis The First COST 2101 Workshop on Biometrics and Identity Management (BIOID2008)*, Roskilde University, Denmark, May 2008.
- [7] Ghorbel F. Towards a unitary formulation for invariant image description: application to image coding. *Annales des telecommunications*, 53(5, 6):242-260, 1998.
- [8] Rusinkiewicz S., Levoy M. Efficient Variant of the ICP Algorithm. Dans *3DIM 2001*, pages 145-152, 2000.
- [9] Masuda T., Yokoya N. A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(3):295-307, May 1995.
- [10] Besl P.J., Mckay N.D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE PAMI*, 14(2):239-256, 1992.
- [11] Chen Y. and G.Medioni Object Modelling by Multiple Range Images. *Image and Vision Computing*, 10(3), 1992.
- [12] R. Bracewell. *The Fourier transform and its applications*. McGraw-Hill Inc., 2nd edition, New York (USA), 1986.
- [13] R. M. Haralick, H. Joo, C. Lee, X. Zhuang, V. G. Vaidya, M. B. Kim Pose estimation from corresponding point data Systems, Man and Cybernetics. *IEEE Transactions on In Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 19(6):1426-1446, 1989.
- [14] Zhang L., Kim Y. J., Manocha D. A Fast and Pratical Algorithm for Generalized Depth Computation. Dans *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, 2007.
- [15] Daoudi M., Ghorbel F., Mokadem AAvaro., O. , Sanson Shape distances for contour tracking and motion estimation. *Pattern Recognition*, 32():1297-1306, 1998.
- [16] F. Ghorbel, A complete invariant description for gray level images by the harmonic analysis approach, *Pattern Recognition Letters*, 15():1043-1051, 1994.
- [17] Michael Sass Hansen, Rasmus Larsen, Ben Glocker and Nassir Navab Adaptive Parametrization of Multivariate B-splines for Image Registration, Dans *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*,
- [18] W.Gadacha and F.Ghorbel Recalage ordonne de surfaces 3D à l'aide de niveaux de coordonnées géodésiques, Dans *Traitement et Analyse de l'Information Méthodes et Applications (TAIMA)*, pages 163-170, 2011.