
1. Introduction

En archéologie ou en sciences *forensiques*¹, le crâne est souvent la seule source d'informations sur la physionomie inconnue de l'individu [7] [11]. Dans ces situations, il est intéressant de pouvoir reconstruire le visage à partir du crâne, à des fins historiques (reconstruction des visages en Egypte ancienne à partir de momies) ou judiciaires (identification de crâne et recherche de personnes).

L'histoire de la reconstruction faciale remonte au XVIIIème siècle. Les premières reconstructions furent développées par des anatomistes allemands His et Welker pour identifier des personnages historiques [7] [12]. Plus tard, l'anthropologue russe Gerasimov a développé une méthode tridimensionnelle (3D) manuelle à base de moulages en argile et l'a utilisée dans le cadre de l'anthropologie médico-légale [1] [7]. Ensuite, diverses techniques de reconstruction faciale ont été proposées dans la littérature. Une revue générale de ces différentes méthodes a été effectuée dans des ouvrages de référence [8] [11] et plus récemment dans [2] [12] [17].

En général, Il existe quatre catégories de techniques de reconstruction faciale: (i) la superposition faciale [2] [11] qui consiste à comparer, par un procédé photographique, le squelette crânio-facial avec le portrait ou la photographie de la personne disparue, (ii) la reconstruction faciale artistique bidimensionnelle (2D) qui est généralement un dessin d'artiste réalisé d'après des photographies frontales et latérales du crâne [2] [8] [11], (iii) la reconstruction faciale 3D manuelle et informatisée [1] [8] [10] [11] et (iv) les techniques de déformation volumiques [9] [12] [13]. Les techniques (i), (ii) et (iii) s'appuient principalement sur la connaissance des épaisseurs moyennes de tissus mous en un certain nombre de points de repères anthropologiques de la boîte crânienne, qui sont publiés dans la littérature [1] [2] [6], pour diverses populations et divers états pondéraux (maigre, normal et obèse). Une source pour de telles données sont les tables de Rhine et Campbell [14].

La méthode de reconstruction faciale 3D que nous présentons dans cet article s'inscrit dans la catégorie (iv). Elle est fondée sur une approche de déformation volumique d'un visage (ou plus exactement une peau) de référence pour l'élaboration d'un visage proche de celui de la personne inconnue. Cette déformation s'appuie sur une méthode de recalage non rigide guidé par des déformations de forme libre à base de B-splines.

Dans la section 2, nous décrivons le processus de la reconstruction faciale. Après avoir appliqué la méthode sur quelques cas et essayé de quantifier les résultats dans la section 3, nous proposons d'autres voies à explorer afin d'améliorer la qualité de la reconstruction dans la section 4.

¹ *Anglicisme désignant à la fois les sciences légales et la criminalistique.*

2. Méthode de reconstruction faciale proposée

L'objectif de notre travail est d'expérimenter et de valider une méthode de reconstruction faciale dont l'hypothèse de travail est similaire à celle de [12] et [13] et qui s'énonce comme suit : si deux crânes ont des formes similaires présentant les mêmes caractéristiques morphologiques (âge, sexe et origine ethnique) alors les visages correspondants ont des caractéristiques communes.

La méthode de reconstruction faciale fait intervenir des techniques récentes d'imagerie médicale. Elle est fondée sur une approche de déformation volumique globale de l'image 3D d'un crâne de référence vers celle d'un crâne qualifié d'«inconnu». Cette transformation s'appuie sur un recalage non rigide guidé par un modèle de Déformations de Forme Libre (FFD) à base de B-splines. Ensuite, la même transformation est appliquée pour déformer la peau de référence vers une nouvelle peau qui est considérée comme étant proche de la peau inconnue. Nous cherchons alors à retrouver la peau inconnue uniquement à partir d'un ensemble crâne et peau de référence et du crâne inconnu.

2.1. Collecte des données et leur représentation 3D

Afin de tester et d'évaluer la méthode, nous nous sommes appuyés sur des données issues d'images par résonance magnétique tridimensionnelle (IRM-3D) de têtes d'individus (figure 1). Deux ensembles crâne/peau ont été segmentés [3][5]. Le premier ensemble représente la tête de référence comportant un modèle de peau de référence P_r et un modèle crânien de référence C_r . Le deuxième ensemble, constitué de la peau P_i et du crâne C_i , est considéré comme étant la tête de la personne dont la peau est à reconstruire. La peau P_i servira de test afin de valider la qualité de la reconstruction.

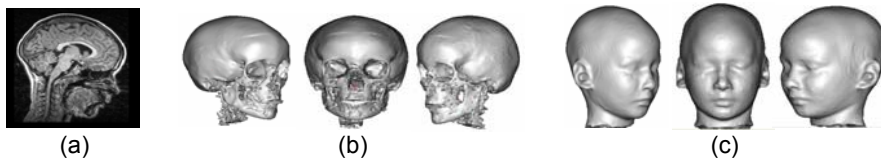


Figure 1. Résultats de la segmentation et visualisation 3D (avec le logiciel anatomist²).
(a) Coupe sagittale extraite de l'IRM-3D de la tête, (b) surface du crâne et (c) surface de la peau.

2.2. Recalage non rigide guidé par des FFD

La reconstruction faciale est obtenue en calculant dans un premier temps une transformation volumique T de l'image du crâne de référence C_r vers l'image du crâne

² <http://brainvisa.info/>

C_i (c'est-à-dire $C_i = T(C_r)$). Nous appliquons ensuite cette même transformation à l'image de la peau de référence P_r afin d'obtenir une approximation de la peau inconnue P^* (c'est-à-dire $T(P_r) = P^*$). La figure 2 décrit le principe de la méthode de reconstruction faciale. L'évaluation de la méthode sera effectuée en comparant P^* à P_i sur des données où à la fois C_i et P_i sont connus. Du point de vue du traitement d'images, le problème s'exprime essentiellement comme un problème de recalage entre deux images.

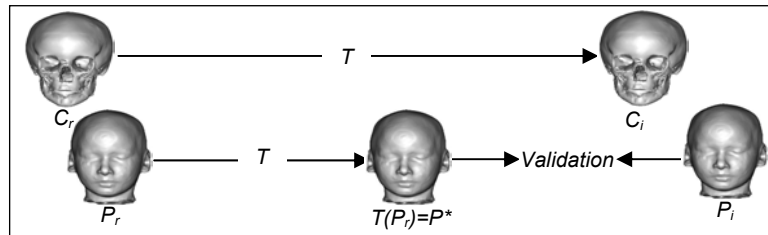


Figure 2. Processus de la reconstruction faciale.

Pour calculer la transformation T , nous employons un recalage non rigide guidé par un modèle de Déformations de Forme Libre (FFD) à base de B-splines (introduit dans [16]). Ce modèle a été utilisé avec succès dans différentes applications d'imagerie médicale [4] [15].

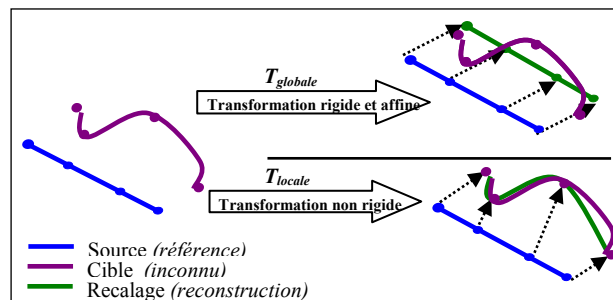


Figure 3. Illustration 1D des transformations globale et locale

L'algorithme de recalage est divisée en deux phases : une phase de transformation globale $T_{globale}$, supposée rigide, donnant une bonne approximation initiale pour la transformation T et une phase de transformation non rigide T_{locale} , permettant des déformations plus locales : $T(x, y, z) = T_{globale}(x, y, z) + T_{locale}(x, y, z)$ (1)

La figure 3 illustre en 1D le principe des deux phases du recalage.

Le but de la transformation globale est de fournir une initialisation au recalage non rigide aussi proche que possible du résultat souhaité. Cette transformation est composée d'une rotation, d'une translation et d'une transformation affine.

Tandis que le recalage rigide et affine calcule seulement un mouvement global entre deux images, le recalage non rigide modélise un mouvement local en utilisant des FFD. Dans cette technique, les déformations de l'objet 3D sont calculées via l'optimisation d'une grille sous-jacente de points de contrôle associés à des B-splines.

Soit une grille Φ de $n_x \times n_y \times n_z$ points de contrôle $\phi_{i,j,k}$. La transformation s'exprime de la manière suivante :

$$T_{locale}(x, y, z) = \sum_{l=0}^3 \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 B_l(u) B_m(v) B_n(w) \phi_{i+l, j+m, k+n} \quad (2)$$

où les $\phi_{i,j,k}$ représentent les positions des points de contrôle et B_l représente la $l^{\text{ème}}$ fonction de base de la B-spline.

Le nombre de points de contrôle définira la localité des déformations permises par le modèle FFD. Cependant, avec une grille dense, les temps de convergence seront notablement accrus. Ainsi, un compromis doit être effectué concernant ces deux aspects. Nous avons choisi une grille de 10 points de contrôle par dimension.

Le recalage est obtenu par la méthode développée dans [4] en minimisant une fonction de coût qui fait intervenir à la fois un critère d'écart C_{sim} entre les images A et B et un critère de régularité C_{reg} de la transformation recherchée :

$$C = -C_{sim}(A, T(B)) + C_{reg}(T) \quad (3)$$

Nous avons utilisé le critère d'Erreur Quadratique Moyenne (EQM) comme mesure d'écart pour déterminer les paramètres optimaux de la déformation $\phi_{i,j,k}$. Cette métrique calcule la différence des intensités des N voxels A_i et B_i entre les images A et B correspondants :

$$C_{sim}(A, T(B)) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (A_i - T(B_i))^2} \quad (4)$$

Pour contraindre la régularité de la transformation recherchée, nous introduisons un terme de régularisation C_{reg} composé d'une force molle locale qui consiste à tirer chaque nœud vers le centroïde de ses nœuds avoisinants pour éviter l'intersection entre les nœuds.

La procédure d'optimisation est fondée sur une technique itérative de descente de gradient sur la totalité de la grille de points de contrôle. A chaque itération, nous calculons une estimation locale du gradient pour chaque point de contrôle par la méthode des différences finies : $\phi_{i,j,k} = \phi_{i,j,k} + \mu \nabla \phi_{i,j,k}$ (5)

où μ est la taille du pas d'optimisation et $\mu \nabla \phi_{i,j,k}$ est l'estimation du gradient.

Pour chaque point de contrôle, des déplacements d'un pas sont testés le long de chaque axe et la fonction de coût est évaluée. Si un de ces déplacements fournit une meilleure mesure de similarité (meilleurs résultats de recalage), le déplacement du point de contrôle est accepté.

La figure 4 montre les résultats des transformations $T_{globale}$ et T_{locale} de C_r vers C_i .

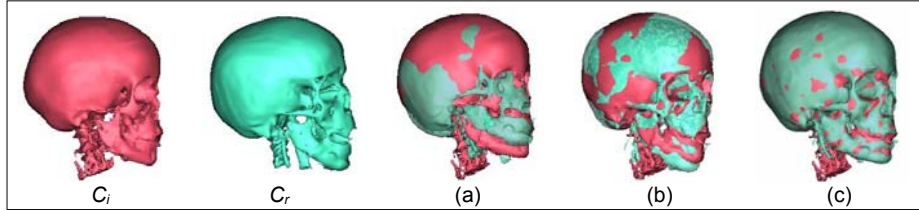


Figure 4. Résultats de déformation du crâne C_r (en vert) vers le crâne C_i (en rouge).
(a) avant le recalage, (b) après le recalage rigide et affine et (c) après le recalage non rigide.

3. Résultats et discussions

Nous avons testé notre méthode sur deux ensembles de données provenant de deux IRM-3D de deux têtes d'individus ayant à peu près les mêmes caractéristiques morphologiques. Les deux IRM ont une taille de 256×256 pixels dans le plan xy et 132 coupes, avec des dimensions de voxels d'environ $1.0 \times 1.0 \times 1.3 \text{ mm}^3$. Le temps de calcul de l'algorithme de recalage pour ces deux images peut atteindre environ 5 heures sur une machine avec un Pentium 4 à 1.7 GHz.

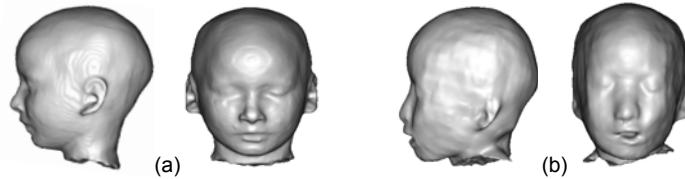


Figure 5. Résultats de la reconstruction faciale.
(a) surface de la peau réelle P_i et (b) surface de la peau reconstruite P^*

La validation des résultats de la reconstruction faciale est un problème complexe en raison de l'importante subjectivité qui peut intervenir dans la phase d'identification et de reconnaissance. L'inspection visuelle est la méthode la plus évidente d'évaluation de la reconstruction faciale, mais elle reste qualitative et insuffisante. La figure 5 montre la comparaison visuelle entre la surface de la peau reconstruite P^* par l'algorithme (à droite) et la surface de la peau réelle P_i (à gauche). Nous observons une bonne correspondance de la partie supérieure de la peau, cependant quelques différences sont mises en évidence vers le menton, principalement dues aux problèmes du degré d'ouverture de la mandibule et les caractéristiques biomécaniques des tissus faciaux.

Une évaluation plus quantitative est fournie par les histogrammes de différences des distances entre les peaux P_i et P^* et entre le crâne inconnu C_i et le crâne déformé après les transformations globale et locale. La figure 6 montre clairement les améliorations du recalage, puisque les histogrammes (a) et (b) sont de plus en plus concentrés vers les faibles valeurs.

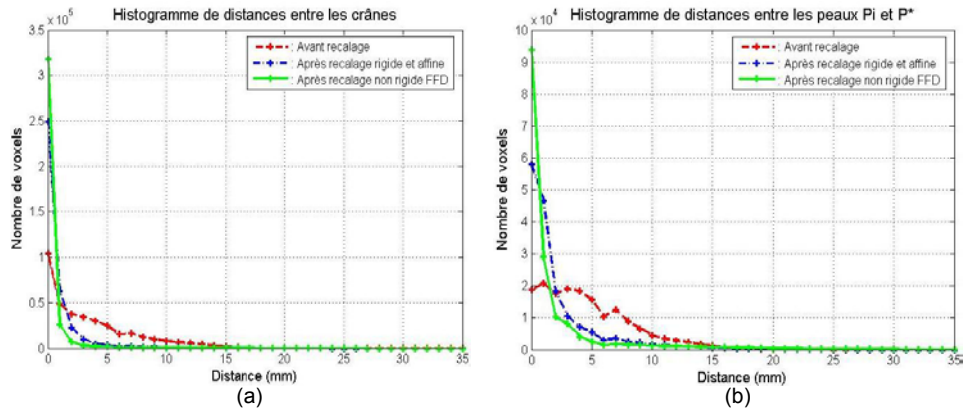


Figure 6. Histogrammes de distances. (a) entre C_i et le crâne transformé et (b) entre P_i et P^*

4. Conclusion et perspectives

La méthode utilisée dans ce travail a l'intérêt d'être simple et les résultats obtenus fournissent globalement une bonne approximation de la forme du visage recherché.

La différence entre la peau que nous calculons et la peau réelle s'explique par le fait que nous ne prenons pas en compte, lors de la transformation, le problème du degré d'ouverture de la mandibule, des épaisseurs des tissus mous en certains points caractéristiques et les caractéristiques biomécaniques des tissus faciaux.

Une perspective intéressante consiste à développer un modèle déformable permettant de raffiner la surface de la peau reconstruite sous certaines contraintes. Ces contraintes sont d'une part un critère de distance (épaisseurs des tissus en un certain nombre de points de repère anthropologiques préalablement fixés) et un critère de régularité par rapport à une forme de peau de référence.

5. Références bibliographiques

- [1] ARCHER K.M.: *Craniofacial Reconstruction Using Hierarchical B-spline Interpolation*. Master's thesis of Applied Science. The University of British Columbia, August 25, 1997.
- [2] AULSEBROOK W.A., ISCAN M.Y., SLABBERT J.H., BECKER P.: *Superimposition and reconstruction in forensic facial identification: A survey*. Forensic Science International. Volume 75, Issues 2-3, pages 101-120, October 1995.
- [3] BURGNET J., GADI N., BLOCH I.: *Realistic models of children heads from 3D-MRI segmentation and tetrahedral mesh construction*. Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, pages: 631-638, 2004.

- [4] CAMARA O., COLLIOT O., DELSO G., BLOCH I. : *Apport de contraintes anatomiques au recalage non linéaires d'images TDM et TEP dans les régions thoraciques et abdominales*. In RFIA'04, Toulouse, Volume: 2, pages: 797-806, 28-30 Janvier 2004.
- [5] DOKLADAL P., BLOCH I., COUPRIE M., RUIJTERS D., URTASUN R., GARNERO L.: *Topologically Controlled Segmentation of 3D Magnetic Resonance Images of the Head by using Morphological Operators*. Pattern Recognition, vol. 36(10), pp: 2463-2478, Oct 2003.
- [6] FARKAS L.G.: *Anthropometry of the head and face*. FARKAS Leslie G. Editor. Raven Press, New York, 1994.
- [7] GRÜNER O.: *Identification of Skulls: A Historical Review and Practical Applications*. Forensic Analysis of the Skull, Iscan, Mehmet Yasar and Helmer, Richard P., Editors, Wiley-Liss, Inc., New York, Chapter 3, pp. 29-45, 1993.
- [8] ISCAN M.Y.: *Craniofacial Image Analysis and Reconstruction*. Forensic Analysis of the Skull. Iscan M.Y. and Helmer R.P., Editors, Wiley-Liss, Inc., Chapter 1, pp.1-10, 1993
- [9] JONES M.W.: *Facial Reconstruction Using Volumetric Data*. 6th International Workshop on Vision Modeling and Visualization (VMV'01), Stuttgart, Germany, pp. 135-150, Nov 2001.
- [10] KÄHLER K., HABER J., SEIDEL H.P.: *Reanimating the Dead: Reconstruction of Expressive Faces from Skull Data*. ACM Transaction On graphics (SIGGRAPH Conference Proceedings), ACM, Vol. 22, Issue 3, pp. 554–561, July 2003
- [11] KROGRAM W.M., ISCAN M.Y. “*The Human Skeleton in Forensic Medicine*”. Charles C. Thomas, Publisher, Springfield, Illinois, 1986
- [12] NELSON L.A., MICHAEL S.D.: *The application of volume deformation to three-dimensional facial reconstruction: A comparison with previous techniques*. SIGGRAPH'87, volume 21(3), pages: 163-169, July 1987.
- [13] QUATREHOMME G., COTIN S., SUBSOL G., DELINGETTE H., GARIDEL Y., GREVIN G., FIDRICH M., BAILLET P., OLLIER A.: *A Fully Three-Dimensional Method for Facial Reconstruction Based on Deformable Models*. Journal of Forensic Sciences, 42(4): 649-652, 1997.
- [14] RHINE J.S., CAMPBELL H.R.: *Thickness of Facial Tissues in American Blacks*. Journal of Forensic Sciences, JFSCA, 25(4): 847-858, October 1980.
- [15] RUECKERT D., SONADA I., HAYES C., HILL D.L.G., LEACH M.O., HAWKES D.J.: *Nonrigid Registration Using Free-Form Deformations: Application to Breast MR Images*. IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 18, N° 8, pages: 712-721, August 1999.
- [16] SEDERBERG T., PARRY S.: *Free from deformation of solid geometric models*. SIGGRAPH'86, Vol. 20, pages: 151-160, Dallas, USA, August 1986.
- [17] TYRRELL A.J., EVISON M.P., CHAMBERLAIN A.T., GREEN M.A.: *Forensic Three-dimensional Facial Reconstruction: Historical review and Contemporary developments*. Journal of Forensic Science, 42(4): 653-661, 1997.
-