

Conception et ajustement d'un modèle 3D articulé de la main

Hocine OUHADDI Patrick HORAIN

Institut National des Télécommunications
Département Signal et Image
9, rue Charles Fourier, 91011 Evry Cedex

hocine.ouhaddi@int-evry.fr patrick.horain@int-evry.fr

Résumé :

Cet article présente un modèle générique 3D articulé de la main et son ajustement morphologique à la main d'un opérateur observé par une caméra. Les applications envisagées sont l'interaction homme-machine et la reconnaissance de la langue des signes. Le modèle, composé de primitives géométriques simples, est enrichi de contraintes biomécaniques et anthropométriques. Il est ajusté sur la morphologie de la main ouverte observée dans une image. Cet ajustement est effectué en trois étapes : estimation de la couleur de la peau et seuillage ; séparation des doigts par morphologie mathématique ; ajustement du modèle à partir des moments d'inertie des différentes parties.

1. Introduction

Les gestes sont un moyen naturel de communication entre personnes dans la vie courante. Ils occupent une place essentielle pour les utilisateurs de la langue des signes. Ces dernières années plusieurs travaux concernant la communication homme-machine par le geste ou l'acquisition des gestes pour des applications de réalité virtuelle ont été publiés [1]. Des gants numériques munis de capteurs peuvent être utilisés pour acquérir les mouvements des doigts ainsi que les déplacements de la main. Toutefois, ces gants restent chers, et leurs câbles de liaison sont une entrave pour des mouvements naturels.

D'autres travaux ont utilisé des techniques de vision artificielle pour l'acquisition des gestes. Marqueurs et gants colorés ont été utilisés pour faciliter l'identification de la main et des doigts dans les images [2, 3]. Toutefois, une approche 2D dans l'image ne permet pas un traitement simple et général des auto-occultations. Pour résoudre ce problème deux approches sont possibles : une analyse par stéréovision des gestes [4, 5, 6, 7] ou leur reconnaissance par ajustement d'un modèle générique 3D qui peut être squelettique [8, 9], surfacique [10, 11] ou volumique [12, 13].

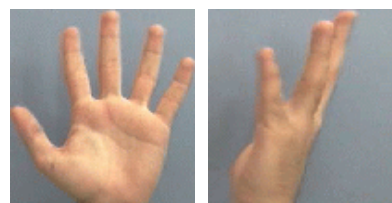


Figure 1 : Images de la main sans et avec auto-occultations.

Dans cet article, nous présentons un modèle de la main ainsi que son ajustement. Ce modèle est destiné à être utilisé pour le suivi de la main dans des séquences vidéo.

Dans la première partie nous présentons quelques rappels sur l'anatomie, l'anthropométrie et la biomécanique de la main. Le modèle générique 3D articulé que nous proposons est décrit dans la deuxième partie. Enfin, l'ajustement du modèle à la morphologie de l'utilisateur fait l'objet de la troisième partie.

2. La main

2.1 Anatomie de la main

Le squelette de la main comporte les os du poignet, les métacarpes et les os des doigts. L'articulation de chaque doigt sur son métacarpe est appelée *métacarpo-phalangienn*e (MCP). Les articulations entre phalanges sont appelées *interphalangiennes proximales* (IPP) et *interphalangiennes distales* (IPD), ou, pour le pouce, simplement *interphalangiennes* (IP). L'articulation située à la base du pouce est dite *carpo-métacarpienne* (CMC).

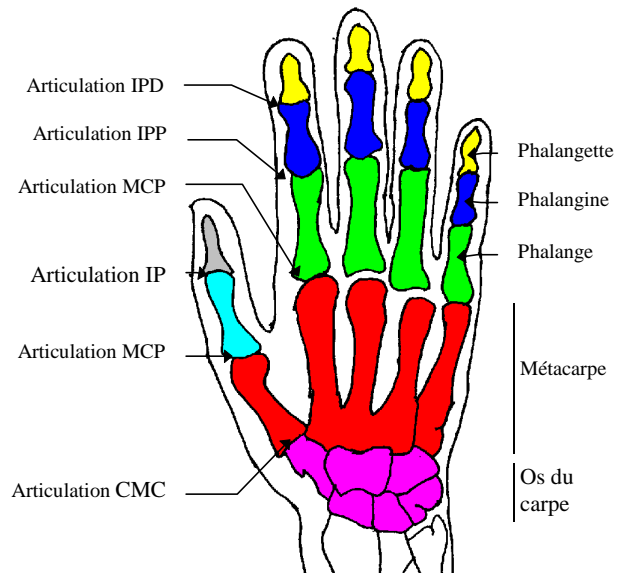


Figure 2 : Squelette de la main.

2.2 Anthropométrie de la main

L'anthropométrie est l'étude comparative des mesures du corps humain. Une des études les plus élaborées, à notre connaissance, est celle de Wagner [14] réalisée sur un échantillon de 127 hommes âgés de 17 à 63 ans et 111 femmes âgées de 16 à 64 ans, et repose sur 48 mesures morphologiques. A partir de ces mesures, un certain nombre de contraintes anthropométriques peuvent être déduites. Elles sont exprimées sous forme de relation entre mesures et d'intervalles de valeurs possibles. Par exemple, la longueur de la première phalange du majeur est égale à $0,266 \pm 0,003$ fois la longueur de la main.

2.3 Biomécanique de la main

La main est un objet articulé possédant 28 degrés de liberté. Six sont définis au niveau du poignet : 3 rotations et 3 translations. Vingt-deux sont associés aux différentes articulations des doigts. Deux degrés de liberté (abduction / adduction et flexion / extension) pour les articulations métacarpo-phalangiennes, 1 autre (flexion / extension) au niveau de chaque articulation interphalangienn e. D'après [15], l'articulation carpo-métacarpienn e du pouce possède 3 degrés de liberté : abduction / adduction, flexion / extension et une pseudo-rotation due à l'incongruïté entre les os du carpe et la base du métacarpe du pouce, et au relâchement des ligaments les reliant.

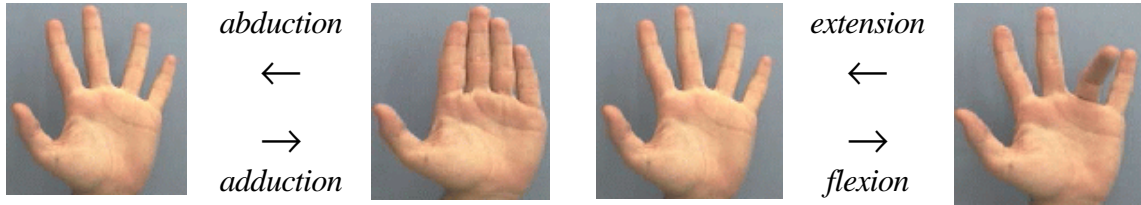


Figure 3 : Mouvements d'adduction et d'abduction.

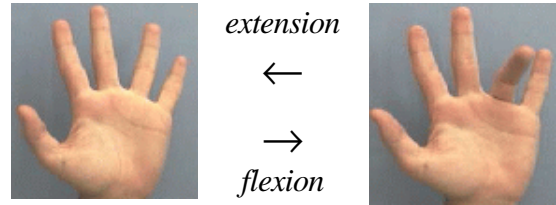


Figure 4 : Mouvements de flexion et d'extension.

Les mouvements des doigts de la main sont régis par des contraintes biomécaniques qui font que certaines postures ne sont pas réalisables[16, 8, 9, 10]. Ces contraintes sont statiques ou dynamiques. Les contraintes statiques traduisent les limites des angles d'abduction / adduction ou de flexion / extension possibles des différentes articulations. Par exemple, l'angle de flexion / extension des premières phalanges des quatre doigts est compris entre -110° et 15° .

Les contraintes dynamiques représentent les interdépendances existant entre les degrés de liberté des articulations des doigts. Ceux des quatre doigts autres que le pouce sont :

- la relation entre les flexions de la phalangette et de la phalange :

$$\theta_{f/e}^{IPD} = \frac{2}{3} \theta_{f/e}^{IPP} ;$$

- l'interdépendance entre la flexion / extension et l'abduction / adduction de chaque phalange. En effet, plus l'angle de flexion / extension est grand, plus l'abduction ou l'adduction des doigts est limitée. La valeur maximale de l'angle d'abduction / adduction de la phalange dans le cas où l'angle de flexion / extension n'est pas nul est donnée par :

$$|\theta_{a/a}^{MCP}| \leq \left(1 - \frac{1}{\theta_{f/e \max}^{MCP}} \right) \theta_{f/e}^{MCP} \times \theta_{a/a}^{MCP}$$

$\theta_{f/e \max}^{MCP}$ est la valeur maximale de l'angle de flexion / extension de la phalange.

- la relation entre les flexions / extensions des phalanges de doigts voisins ; par exemple, la flexion de la phalange de l'index ou de l'annulaire entraîne la flexion de la phalange du majeur.

$$\theta_{f/e}^{MCP \text{ Majeur}} \geq \sup \left(\theta_{f/e}^{MCP \text{ Index}} - 25, \theta_{f/e}^{MCP \text{ Annulaire}} - 45, \theta_{f/e \min}^{MCP \text{ Majeur}} \right)$$

$\theta_{f/e \min}^{MCP \text{ Majeur}}$ est la valeur minimale de l'angle de flexion / extension de la phalange du majeur.

A cause de sa morphologie particulière, les mouvements du pouce sont soumis à un ensemble de contraintes différentes. Ainsi, la flexion du pouce au niveau de l'articulation carpo-métacarpienne est comprise entre -80° et 25° . A celle-ci s'ajoutent deux contraintes dynamiques reliant les flexions / extensions et les

abductions / adductions des deux premières articulations du

$$\text{pouce : } \theta_{f/e}^{\text{MCP}} = 2 \left(\theta_{f/e}^{\text{CMC}} - \frac{\pi}{6} \right); \quad \theta_{a/a}^{\text{MCP}} = \frac{7}{5} \theta_{a/a}^{\text{CMC}}.$$

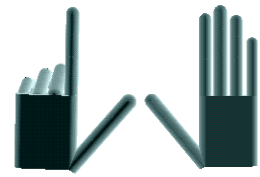


Figure 5 : Le modèle utilisé.

3. Modèle de la main

3.1 Structure du modèle

Notre modèle de la main est **volumique**. Dans un but de simplicité, il est constitué de primitives géométriques 3D simples : des cylindres, des sphères et un parallélépipède. La cohérence des mesures morphologiques est assurée par l'intégration des contraintes anthropométriques. Vingt et une contraintes portant sur les longueurs des doigts et des phalanges ainsi que les dimensions de la paume ont été retenues.

Nous avons ignoré la pseudo-rotation de l'articulation CMC dans notre modèle qui possède 27 degrés de liberté. Leur estimation est facilitée par l'intégration des contraintes biomécaniques dans le modèle. Ainsi, l'utilisation de la première contrainte des quatre doigts et les deux contraintes du pouce permet de passer de 27 à 21 degrés de liberté. Les autres contraintes biomécaniques déterminent l'intervalle de validité des autres degrés de liberté. Ceci peut être utilisé pour tester la validité des résultats obtenus dans la procédure d'estimation des degrés de liberté.

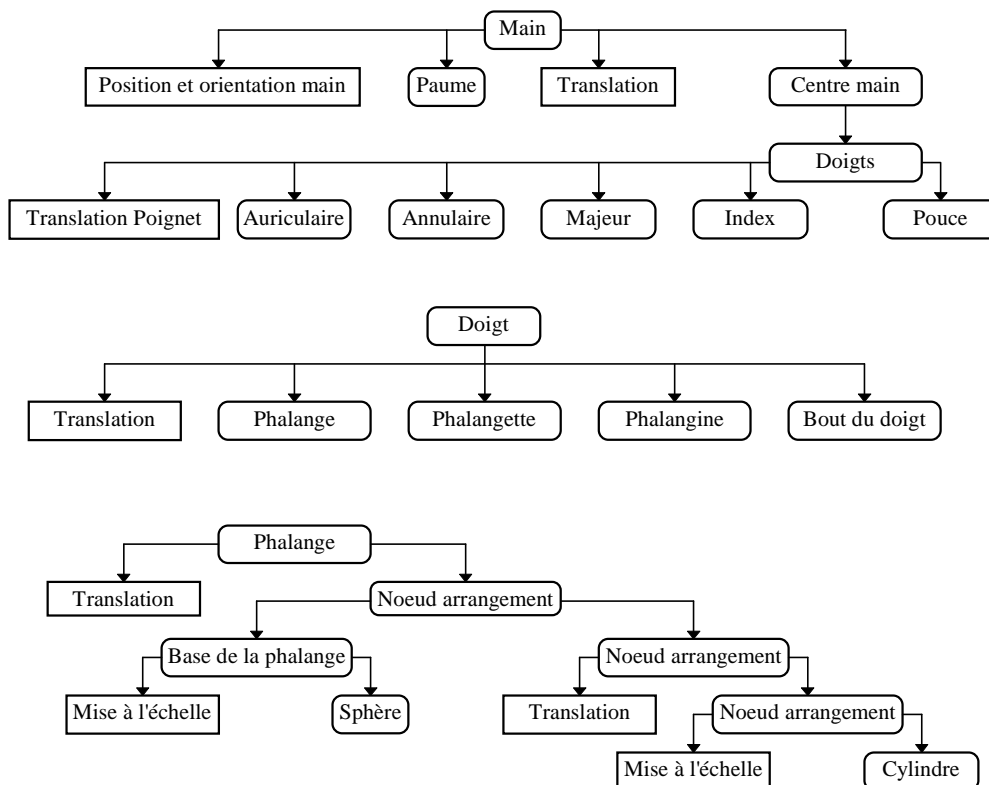


Figure 6 : Quelques parties de l'arbre du modèle.

Le modèle est représenté par un arbre comprenant plusieurs types de nœuds :

- des nœuds de morphologie qui déterminent les mesures et les positions des primitives géométriques, et sont soumis aux contraintes anthropométriques ;
- des nœuds d'articulation qui précisent les valeurs des rotations associées aux articulations, et qui obéissent aux contraintes biomécaniques ;
- des nœuds d'arrangement utilisés pour structurer l'arbre.

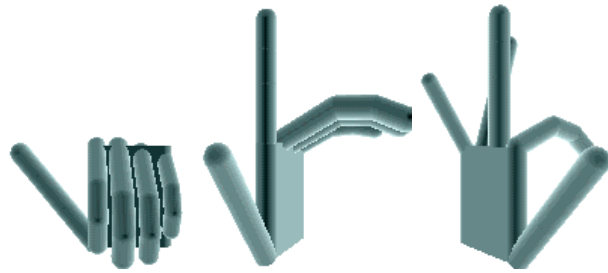


Figure 7 : Synthèse de signes de l'alphabet de la langue des signes (A, D et F respectivement).

Cette structure arborescente décrit séparément la nature articulée du modèle, la morphologie et la biomécanique de la main. L'intérêt de cette dissociation est de permettre de changer les primitives du modèle sans modifier sa structure générale. Par exemple, elle pourra être mise à profit pour remplacer les cylindres représentant les doigts par des maillages. Elle permet aussi de réaliser l'ajustement du modèle et l'animation du modèle sous forme d'actions limitées aux seuls nœuds morphologiques et de degrés de liberté.

3.2 Animation du modèle

Après ajustement, le modèle articulé est destiné à être utilisé pour le suivi de la main dans des séquences vidéo (développement en cours). Les méthodes d'animation procédurale et déclarative [17] peuvent utiliser la dynamique inverse [16], l'analyse par éléments finis ou l'interpolation de plans [18].

Pour valider le modèle, nous avons choisi une technique *explicite* consistant à spécifier entièrement les paramètres à chaque plan de la séquence, tout comme l'application de suivi devra les fournir. Des séquences d'animation ont été créées en spécifiant les valeurs des paramètres des articulations de façon à reproduire les gestes représentant quelques lettres de l'alphabet de la langue des signes.

Le modèle de la main ainsi que les animations ont été développés en VRML sur station *Silicon Graphics* au moyen du logiciel *Open Inventor*.

4. Ajustement du modèle

Le modèle générique 3D ne correspond pas en général à la morphologie particulière de la main d'un opérateur. L'ajustement préalable des paramètres de morphologie du modèle est nécessaire pour la robustesse de procédure de suivi de la main dans des séquences.

Certains travaux décrivent des méthodes supervisées d'ajustement et utilisant plusieurs

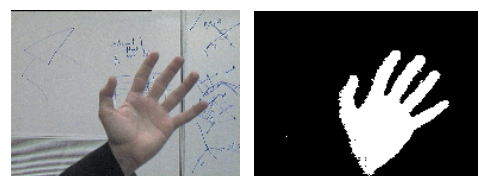


Figure 8 : Segmentation de la main par seuillage sur la couleur.

vues de la main [10, 12]. Notre approche, non supervisée, utilise une seule image de la main ouverte (doigts écartés).

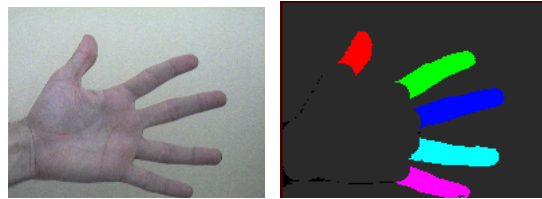


Figure 10 : Détection des doigts.

4.1 Segmentation de l'image

Pour extraire de l'image la silhouette de la main, nous avons utilisé l'information de couleur. Un apprentissage de la distribution des couleurs de la peau est effectué à partir de l'histogramme des teintes et des saturations (peu sensible aux conditions d'éclairage de la scène). Une région de cet espace est définie par des seuils. La silhouette de la main est considérée comme étant la plus grande composante connexe correspondant aux couleurs sélectionnées. Les trous de la silhouette dus aux bruits sont remplis.

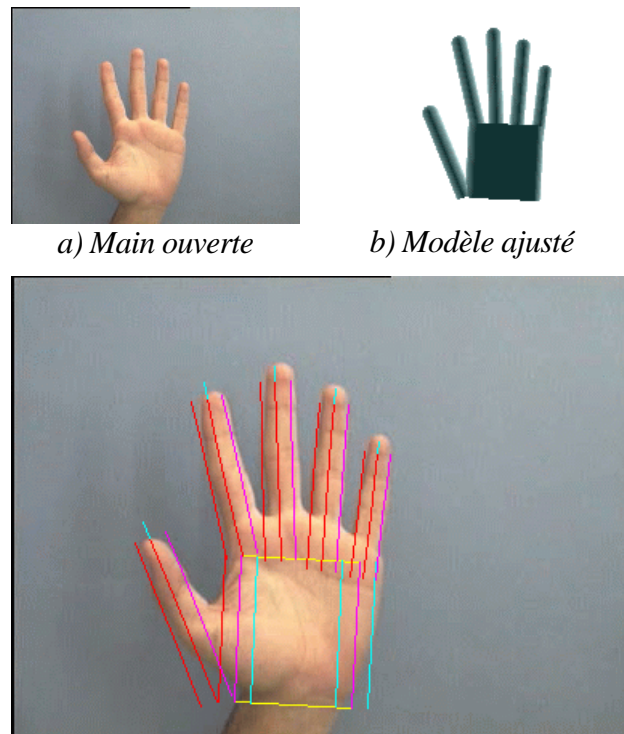
L'estimation des paramètres morphologiques du modèle requiert l'identification des doigts et de la paume dans l'image. Les doigts sont extraits par un opérateur de morphologie mathématique : un chapeau haut-de-forme [19] dont l'élément structurant est un disque de diamètre légèrement supérieur à la largeur des doigts. Les régions représentant les doigts sont les 5 plus grandes composantes connexes obtenues. Elles sont mises en correspondance avec les doigts par un balayage perpendiculairement à l'axe d'inertie de la silhouette.

Le poignet est localisé approximativement comme étant le centre de gravité des points d'intersection de l'axe d'inertie de la main et ceux des 4 grands doigts [9]. La paume est obtenue par soustraction des régions correspondant aux doigts et à l'avant-bras.

4.2 Ajustement morphologique

L'étape de segmentation fournit la silhouette des différentes parties de la main. Les paramètres de la morphologie des doigts (rayon et longueur) et de la paume (longueur et largeur) sont calculés à partir des dimensions des régions correspondantes à un facteur d'échelle près. L'épaisseur de la paume est supposée égale au diamètre du pouce [10]. Les contraintes anthropométriques sont utilisées pour valider les mesures et déterminer les longueurs des phalanges du modèle.

Les différents angles des articulations de la main sont ensuite estimés en supposant l'axe optique de la caméra perpendiculaire au plan de la main. Ceci permet d'identifier l'orientation globale du modèle dans



c) Superposition du modèle ajusté et de l'image.

Figure 9 : Ajustement des dimensions et des degrés de liberté du modèle de main.

le plan image à l'orientation de l'axe d'inertie de la silhouette de la main. Les taux d'adduction des articulations MCP et CMC sont estimés à partir des orientations des axes d'inerties des doigts. Les angles de flexion / extension sont supposés nuls. La figure 9 présente le modèle après ajustement morphologique et estimation de ses degrés de liberté.

5. Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans cet article la conception d'un modèle 3D articulé de la main respectant un certain nombre de contraintes anthropométriques et biomécaniques. Il s'ajuste sur la morphologie de la main de l'opérateur sans recourir à des approches supervisées ni à l'utilisation de plusieurs vues.

Les primitives géométriques simples du modèle présenté peuvent être remplacées par des maillages. Ceci permettra d'avoir un modèle plus réaliste qui épouse mieux la forme de la main. L'architecture modulaire du modèle permet de changer de type de primitive sans modifier les modules d'anthropométrie et de biomécanique.

Par ailleurs, nous utilisons actuellement l'ajustement de notre modèle articulé de la main pour initialiser le suivi de la main. Notre objectif est de faire reproduire par notre modèle 3D articulé les mouvements de la main dans une séquence vidéo.

6. Bibliographie

- [1] A. Braffort, *Reconnaissance et compréhension de gestes, application à la langue des signes*, thèse de l'Université Paris XI, spécialité informatique, 1996.
- [2] Y. Iwai, Y. Yagi and M. Yachida, "Gesture Recognition using Colored Gloves", *Proc. of ICPR'96*, pp. 662-666.
- [3] H. Hienz, K. Grobel and G. Offner, "Real-Time Hand-Arm Motion Analysing using a Single Video Camera", *Proc. of Gesture Workshop'96*, Univ. of York, pp. 323-327.
- [4] K. Ishibuchi, H. Takemura and F. Kishino, "Real Time Hand Shape Recognition for Man-Machine Interfaces", *Proc. IEEE. Int. Conf. On Neural Networks*, 1992, pp. 1407-1412.
- [5] M. Fukumoto, K. Mase and Y. Suenaga, "Finger-Pointer : Pointing Interfaces by Image Processing", *Computer and Graphics* **18** : 5, 1994, pp. 633-642.
- [6] Y. Kuno, M. Sakamoto, K. Sakata and Y. Shirai, "Vision Based Human Interface with User-Centered Frame", *Proc. of IROS'94*, pp. 2923-2929.
- [7] A. Utsu, T. Miyasato, F. Kishino and R. Nakatsu, "Hand Gesture Recognition System using Multiple Cameras", *Proc ICPR'96*, vol. I, pp. 667-671.
- [8] B. Dorner, *Chasing the color glove : Visual hand tracking*, Master Thesis, Simon Fraser University, 1994.

- [9] J. Lee and T. L. Kunii, "Model-Based Analysis of Hand Posture", *IEEE Computer Graphics and Applications*, September 1995, pp. 77-86.
- [10] J. J. Kush and T. S. Huang, "Vision Based Hand Modeling and Tracking for Virtual Teleconferencing and Telecollaboration", *Proc. 5th ICCV*, 1995, pp. 666-671.
- [11] T. Heap and D. Hogg, "3D Deformable Hand Models", *Proc. of Gesture Workshop'96*, Univ. of York, UK, pp. 131-139 ; ou : <http://www.scs.leeds.ac.uk/ajh>.
- [12] J. M. Regh and T. Kanade, "Visual Tracking of High DOF Articulated Structures : an Application to Human Hand Tracking", *Proc. 3rd ECCV*, 1994, vol. 2, pp. 37-46.
- [13] J. Davis and M. Shah, "Determining 3-D Hand Motion", *Proc. 28th Asimolar Conf. Signals, Systems, and Computers*, 1994 ; ou : <http://www.media.mit.edu/~jddavis>.
- [14] C. Wagner, "The pianist's hand : anthropometry and biomechanics", *Ergonomics* **31** : 1, 1988, pp.97-131.
- [15] B. Buchholz and T. J. Armstrong, "A Kinematic model of the human hand to evaluate its prehensile capabilities", *J. Biomechanics* **25** : 2, 1992, pp. 149-162.
- [16] H. Rijpkema and M. Girard, "Computer Animation of Knowledge-Based Human Grasping", *Computer Graphics* **25** : 4, 1991, pp. 339-348.
- [17] C. G. Teo, *A Hybrid Procedural Knowledge-Based Approach to the Animation of Human Hand Grasping*, Master Thesis, Simon Fraser University, 1994.
- [18] J. Gourret, N. Magnenat-Thalmann & D. Thalmann, "Simulation of Object and Human Skin in a Grasping Task", *Comp. Graphics* **23** : 3 (*Siggraph'89 Proc.*), 1989, pp. 21-30.
- [19] J. Serra and, *Image Analysis and Mathematical morphology*, Academic Press, 1982.