

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

PAR
ZOUHOUR BEN AZOUZ

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ DE LA FORME DU CORPS HUMAIN À PARTIR
DE DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES TRIDIMENSIONNELLES

MONTRÉAL, LE 17 JUIN 2005

© droits réservés de Zouhour Ben Azouz

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Richard Lepage, directeur de recherche

Département de génie de la production automatisée à l'École de Technologie Supérieure

M. Marc Rioux, codirecteur

Groupe de technologie de l'information visuelle, Conseil national de recherche du
Canada

M. Robert Sabourin, président du jury

Département de génie de la production automatisée à l'École de Technologie Supérieure

M. Robert Bergevin, examinateur externe

Département de génie électrique et génie informatique à l'Université Laval

Mme Nicola Hagemeister, examinatrice

Département de génie de la production automatisée à l'École de Technologie Supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 25 AVRIL 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ DE LA FORME DU CORPS HUMAIN À PARTIR DE DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES TRIDIMENSIONNELLES

Zouhour Ben Azouz

RÉSUMÉ

Les informations concernant la forme du corps humain sont fondamentales pour divers secteurs, notamment la conception de vêtements, d'automobiles et d'espaces de travail. Ceci justifie le rôle de l'anthropométrie qui est définie comme étant l'étude de mesures effectuées sur le corps humain. Traditionnellement les données anthropométriques manquent d'information sur la forme du corps humain et sont fastidieuses à prendre. Les systèmes de numérisation de surface permettent de surmonter ces problèmes en générant des modèles 3D de corps humain à haute résolution en une dizaine de secondes. Ces systèmes ont révolutionné le domaine de l'anthropométrie et favorisé la tenue de projets de numérisation de corps humain tel que le projet CAESAR.

Pour rendre les modèles 3D de corps humain utiles pour les concepteurs dans divers secteurs, il est essentiel de convertir le grand nombre de points de surface numérisés en une quantification compacte de la forme humaine. Les travaux publiés dans ce contexte font appel à des points de repère anatomiques pour développer une telle description. Une localisation efficace des points de repère sur les modèles 3D nécessite leur marquage sur le corps humain préalablement à la numérisation. Ce procédé sera éventuellement éliminé des futurs projets de numérisation à cause de sa lenteur.

Dans cette thèse on propose une méthode pour analyser la variabilité de la forme du corps humain au sein d'une population ciblée sans utilisation de points de repère anatomiques.

Nous proposons d'abord un algorithme de fermeture des trous des modèles 3D. Ces trous sont principalement dus à l'occlusion de certaines parties du corps humain au cours de la numérisation. Ensuite nous avons développé une quantification compacte de la forme humaine par application de l'analyse en composantes principales (ACP) sur une représentation volumétrique des modèles 3D d'une population donnée. La représentation volumétrique fournit une correspondance entre les différents modèles sans recours aux points de repère. L'ACP permet d'extraire un nombre réduit de composantes principales qui forment une base orthonormale de l'espace de forme du corps humain. Chaque modèle 3D peut être décrit et reconstruit à partir des coefficients de sa projection sur cette base. Les composantes extraites représentent les principaux modes de variation de la forme humaine dans l'ensemble des modèles 3D étudiés. Enfin, nous proposons un outil pour visualiser ces modes afin de comprendre la variation de forme qu'ils induisent.

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ DE LA FORME DU CORPS HUMAIN À PARTIR DE DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES TRIDIMENSIONNELLES

Zouhour Ben Azouz

SOMMAIRE

Les informations concernant la forme du corps humain sont fondamentales pour divers secteurs, notamment la conception de vêtements, d'automobiles et d'espaces de travail. Ceci justifie le rôle de l'anthropométrie qui est définie comme étant l'étude de mesures effectuées sur le corps humain. Traditionnellement les données anthropométriques manquent d'information sur la forme du corps humain et sont fastidieuses à prendre. Les systèmes de numérisation de surface permettent de surmonter ces problèmes en générant des modèles 3D de corps humain à haute résolution en une dizaine de secondes. Ces systèmes ont révolutionné le domaine de l'anthropométrie et favorisé la tenue de projets de numérisation de corps humain tel que le projet CAESAR.

Pour rendre les modèles 3D de corps humain utiles pour les concepteurs dans divers secteurs, il est essentiel de convertir le grand nombre de points de surface numérisés en une quantification compacte de la forme humaine. Les travaux publiés dans ce contexte font appel à des points de repère anatomiques pour développer une telle description. Une localisation efficace des points de repère sur les modèles 3D nécessite leur marquage sur le corps humain préalablement à la numérisation. Ce procédé sera éventuellement éliminé des futurs projets de numérisation à cause de sa lenteur.

Dans cette thèse on propose une méthode pour analyser la variabilité de la forme du corps humain au sein d'une population ciblée sans utilisation de points de repère anatomiques.

Nous proposons d'abord un algorithme de fermeture des trous des modèles 3D. Ces trous sont principalement dus à l'occlusion de certaines parties du corps humain au cours de la numérisation. Ensuite nous avons développé une quantification compacte de la forme humaine par application de l'analyse en composantes principales (ACP) sur une représentation volumétrique des modèles 3D d'une population donnée. La représentation volumétrique fournit une correspondance entre les différents modèles sans recours aux points de repère. L'ACP permet d'extraire un nombre réduit de composantes principales qui forment une base orthonormale de l'espace de forme du corps humain. Chaque modèle 3D peut être décrit et reconstruit à partir des coefficients de sa projection sur cette base. Les composantes extraites représentent les principaux modes de variation de la forme humaine dans l'ensemble des modèles 3D étudié. Enfin, nous proposons un outil pour visualiser ces modes afin de comprendre la variation de forme qu'ils induisent.

ANALYSIS OF THE HUMAN SHAPE VARIABILITY USING THREE-DIMENSIONAL ANTHROPOMETRIC DATA

Zouhour Ben Azouz

ABSTRACT

Information about the human body shape is fundamentally important in many industries such as the design of apparel, automobiles and workstations. Traditional anthropometry characterizes the human body with a set of one-dimensional measurements, which provide poor information about the human shape. Moreover, their collection is a long and tedious process. These limitations are overcome by 3-D scanning technology that digitizes the surface of the human body with a high resolution in a few seconds. This technology is radically changing the field of anthropometry and has encouraged the inception of large scale 3-D anthropometric surveys such as the CAESAR project.

The generated 3-D human models are characterized by a large number of surface points. In order to make these models useful for designers, it is necessary to convert them to a compact quantification of the human shape. Approaches that deal with this issue make use of anatomical landmarks. They are efficiently identified on the 3-D models when markers are placed on the body before scanning. The marking process is long and most likely will be eliminated in future 3-D anthropometric surveys.

In this thesis, we propose a method for analysing human shape variability within a given population without using anatomical landmarks.

We first propose an algorithm for filling the holes in the 3-D models, which are mainly due to occlusion during scanning. We then developed a compact quantification of the human shape by applying the Principal Component Analysis (PCA) on a volumetric representation of the 3-D models. The volumetric representation provides a correspondence between different 3-D models without using landmarks. The PCA extracts a reduced number of components that form an orthonormal basis of the space of human shape within the studied population. The 3-D models are then described and reconstructed from the coefficients of their projection on this basis. The extracted components represent the main modes of shape variation within the studied set of 3-D models. Finally, we developed a tool to visualize the changes of the body shape along the main components. The visualization assists designers to understand the variability of the human shape within the targeted population.

REMERCIEMENTS

Mes vifs remerciements vont à mon directeur de thèse, M. Richard Lepage et à mon co-directeur M. Marc Rioux pour leur suivi, leur soutien et pour leurs vifs encouragements, ainsi que pour les conseils avisés qu'il m'ont prodigué tout au long de cette thèse.

Je remercie également M. Chang Shu de l'Institut de technologie de l'information (ITI) au Conseil national de recherche du Canada pour les précieux conseils qu'il m'a prodigué.

Aussi, je remercie M. Robert Sabourin pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury de thèse. Mes remerciements vont également à Mme Nicola Hagemeister et à M. Robert Bergevin pour avoir accepté de faire partie de mon jury et évaluer mon travail.

Je remercie sincèrement les membres de l'ITI où se sont déroulés mes travaux de recherche. Plus particulièrement, je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. Jacques Domez, directeur du groupe de technologie de l'information visuelle pour m'avoir bien accueilli dans son groupe de recherche et pour son encouragement.

Tous mes remerciements vont également à tous les membres du LIVIA avec qui j'ai passé des moments agréables.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon père et ma mère pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Je remercie du fond de mon coeur mon mari, mes soeurs, mes frères ainsi que tous mes amis.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ANTHROPOMÉTRIE	7
1.1 Limites de l'anthropométrie traditionnelle	7
1.2 Anthropométrie de surface en trois dimensions	11
1.2.1 Avantages de l'anthropométrie de surface en trois dimensions	11
1.2.2 Techniques de numérisation du corps humain	12
1.2.3 Contraintes de la numérisation du corps humain	14
1.2.4 Projet CAESAR	16
1.3 Conclusion	18
CHAPITRE 2 TRAITEMENT DES DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES 3D	19
2.1 Localisation de points de repère anatomiques et extraction automatique de mesures unidimensionnelles	19
2.1.1 Marquage préalable des points de repère anatomiques	20
2.1.2 Extraction des points de repère anatomiques sans marquage préalable	21
2.2 Descripteurs de formes tridimensionnels	29
2.3 Discussion et orientation de nos travaux de recherche	38
2.4 Objectifs et hypothèse	39
2.5 Méthodologie	41
2.6 Conclusion	42

CHAPITRE 3	DESCRIPTION COMPACTE ET GÉNÉRATIVE DES MODÈLES 3D DE CORPS HUMAIN	43
3.1	Modélisation des modèles humains par des hyperquadriques étendues	43
3.1.1	Hyperquadriques étendues	44
3.1.2	Application des hyperquadriques aux modèles de corps humain . . .	46
3.2	Description statistique de la forme du corps humain	47
3.2.1	Principe de l'analyse en composantes principales	49
3.2.2	Mise en correspondance des modèles 3D de corps humain	51
3.3	Conclusion	55
CHAPITRE 4	FERMETURE DES TROUS DANS LES MODÈLES 3D DE CORPS HUMAIN ET CALCUL DES CARTES DE DISTANCES SIGNÉES	56
4.1	Causes d'apparition de trous dans les modèles 3D	56
4.2	Revue de la littérature	57
4.2.1	Techniques générales	58
4.2.2	Techniques de fermeture des trous pour les modèles de corps humain	62
4.3	Algorithme que nous proposons pour la fermeture des trous des modèles de corps humain	64
4.3.1	Filtrage des modèles 3D de corps humain	65
4.3.2	Alignement	68
4.3.3	Segmentation	71
4.3.4	Traitement des modèles 3D par tranche	75
4.3.5	Représentation volumétrique basée sur les cartes de distances signées	81
4.3.6	Extraction d'iso-surface à partir de la représentation volumétrique .	86
4.3.7	Résultats et discussion	87
4.4	Conclusion	89
CHAPITRE 5	APPLICATION DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES AUX MODÈLES 3D REPRÉSENTÉS PAR DES CARTES DE DISTANCES SIGNÉES	91
5.1	Application de l'ACP sur une carte de distance signée	91
5.2	Vérification de la mise en correspondance assurée par la représentation volumétrique basée sur une carte de distances signées	92
5.3	Normalisation de la stature	95
5.4	Conclusion	97
CHAPITRE 6	VISUALISATION ET INTERPRÉTATION DES PRINCIPAUX MODES DE VARIATION DE LA FORME DU CORPS HUMAIN	98
6.1	Principe de la visualisation des modes de variation	99

6.2	Analyse de la variabilité des modèles non normalisés	100
6.2.1	Premier mode de variation	101
6.2.2	Deuxième mode de variation	101
6.2.3	Troisième mode de variation	103
6.2.4	Quatrième mode de variation	104
6.2.5	Cinquième mode de variation	104
6.3	Analyse de la variabilité des modèles normalisés	105
6.3.1	Premier mode de variation	106
6.3.2	Deuxième mode de variation	107
6.3.3	Troisième mode de variation	109
6.3.4	Quatrième mode de variation	110
6.3.5	Cinquième mode de variation	110
6.4	Analyse de la variabilité des modèles normalisés avec bras segmentés	110
6.5	Discussion des résultats	112
6.6	Conclusion	114
CONCLUSION		116
ANNEXE 1 FILTRE DE TAUBIN		120
BIBLIOGRAPHIE		127

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	Pourcentage de variabilité associé aux premiers modes de variation de la forme humaine.	101
Tableau II	Corrélation des deux premiers modes de variation, extraits à partir des modèles non-normalisés, avec la stature et le poids. . . .	102

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Mesures anthropométriques traditionnelles 7
Figure 2	Outils de mesures anthropométriques traditionnels 8
Figure 3	Le Plan de Frankfurt est un plan horizontal passant par une ligne qui lie le tragion droit (devant de l'oreille) au point le plus bas de l'orbite de l'oeil droit 9
Figure 4	Problème d'alignement selon le plan de Frankfurt. 10
Figure 5	Les modèles 3D de corps humain permettent de visualiser la relation spa- tiale entre la corps humain et l'article porté. 12
Figure 6	Numérisation de surface par triangulation optique [24] 13
Figure 7	Numérisation de surface en utilisant un plan de lumière 14
Figure 8	Système de numérisation Cyberware WB4. 15
Figure 9	Les trois postures du projet CAESAR [68] 17
Figure 10	Segmentation d'une tranche au niveau des jambes par détermination d'une courbe présentant un point de rebroussement 24
Figure 11	Estimation de la courbure pour la localisation des aisselles. 25
Figure 12	Segmentation du corps humain en torse, tête, jambes et bras en utilisant les points de branchement 25
Figure 13	Localisation des aisselles par identification de points de rebroussement . 26
Figure 14	Graphe de Reeb d'un corps humain en utilisant la fonction hauteur pour déterminer les courbes de niveaux 28
Figure 15	Segmentation du corps humain dans diverses postures en utilisant le graphe de Reeb 28

Figure 16	Cleopatra : Outil de recherche dans une base de données anthropométriques 3D	31
Figure 17	Diagramme de dispersion de pieds selon les deux premiers axes extraits par mise à l'échelle multidimensionnelle	33
Figure 18	Mesures unidimensionnelles du pied	34
Figure 19	Utilisation de la technique de libre déformation de forme pour générer un modèle de chaussure convenant à un individu à partir d'un modèle conçu pour une forme de pieds de référence	35
Figure 20	La relation entre les coordonnées dans l'espace des composantes principales et les mesures anthropométriques traditionnelles permet de générer des modèles virtuels de corps humain ayant certaines spécifications anthropométriques	37
Figure 21	Traitement des données anthropométriques 3D	39
Figure 22	Modélisation du torse par une hyperquadrique étendue de 16 paires de surfaces paraboliques.	48
Figure 23	Modélisation des jambes droite et gauche par des hyperquadriques étendues de 12 paires de surfaces paraboliques.	48
Figure 24	Modélisation du corps humain par un ensemble d'hyperquadriques étendues.	49
Figure 25	Mise en correspondance des modèles 3D de corps humain en utilisant une représentation volumétrique	54
Figure 26	Approximation de la moyenne de la forme d'un ensemble d'objets par la moyenne de leurs cartes de distances signées	54
Figure 27	Erreur de calcul des distances signées au voisinage des trous	55
Figure 28	Trous dans les modèles numérisés en 3D.	57
Figure 29	Configuration des quatre capteurs 3D des systèmes de numérisation utilisés dans le projet CAESAR	58

Figure 30	Variation de la densité des points numérisés en fonction des angles que font les rayons de lumière incidents ou réfléchis avec la surface numérisée	58
Figure 31	Application des fonctions à base radiale pour la fermeture des trous d'un modèle de corps humain.	60
Figure 32	Fermeture des trous en utilisant la diffusion de distance signée dans un exemple.	61
Figure 33	Résultat de fermeture des trous d'un modèle de corps humain en utilisant la diffusion de la distance signée.	62
Figure 34	Détails de réparation d'un modèle de corps humain en utilisant la déformation d'un modèle générique.	63
Figure 35	Différentes étapes de l'algorithme de fermeture des trous dans les modèles 3D de corps humain	65
Figure 36	Filtrage de la surface d'un modèle de corps humain par l'algorithme de Taubin.	69
Figure 37	Changement de système de coordonnées.	71
Figure 38	Alignement des modèles de la base de données CAESAR.	72
Figure 39	Réparation des modèles de corps humain par déformation d'un modèle générique.	73
Figure 40	Segmentation des mains et des pieds	74
Figure 41	Courbe de Bézier du second ordre	79
Figure 42	Réparation d'une tranche horizontale au-dessous des aisselles d'un modèle de corps humain.	80
Figure 43	Masques de transformées de distance.	84
Figure 44	Masques de la distance de Danielsson.	85
Figure 45	Les 15 configurations utilisées dans la génération d'iso-surface par l'algorithme du «Marching cube».	87
Figure 46	Fermeture des trous des modèles de la base de données CAESAR.	88

Figure 47	Effet du filtrage sur la fermeture des trous des modèles 3D	89
Figure 48	Variation du pourcentage de variance en fonction du nombre de personnes propres pour une représentation volumétrique basée sur un champ de distance signée.	92
Figure 49	Reconstruction de modèles de corps humain à partir des premiers 64 vecteurs propres extraits par application de l'ACP à la représentation volumétrique de 300 sujets males	93
Figure 50	Surfaces générées à partir des moyennes des cartes de distances signées	95
Figure 51	Comparaison des moyennes des points de repères avec les surfaces générées à partir des moyennes des cartes de distances signées	96
Figure 52	L'alignement entre les modèles 3D de corps humain est amélioré par la normalisation de la stature.	97
Figure 53	Génération des séquences de modèles virtuels pour la visualisation des différents modes de variation	100
Figure 54	Premier mode de variation pour les modèles non-normalisés	102
Figure 55	Deuxième mode de variation pour les modèles non-normalisés	103
Figure 56	Corrélation entre le deuxième mode de variation et le poids normalisé dans le cas où les modèles de corps humain ne sont pas normalisés.	103
Figure 57	Troisième composante principale pour les modèles non-normalisés	104
Figure 58	Quatrième mode de variation pour des modèles non-normalisés	105
Figure 59	Cinquième mode de variation pour les modèles non-normalisés	106
Figure 60	Premier mode de variation dans le cas de normalisation de la stature	107
Figure 61	Corrélation entre le premier mode de variation dans le cas de normalisation de la stature et le poids normalisé.	108
Figure 62	Deuxième mode de variation dans le cas de normalisation de la stature	108
Figure 63	Troisième mode de variation dans le cas de normalisation de la stature	109

Figure 64	Corrélation du troisième mode de variation avec le rapport entre le tour de taille et la circonférence des hanches.	110
Figure 65	Quatrième mode de variation dans le cas de stature normalisée	111
Figure 66	Cinquième mode de variation dans le cas de stature normalisée	112
Figure 67	Les cinq premières composantes principales des modèles avec bras segmentés correspondent aux mêmes modes de variation obtenus pour les modèles normalisés et non-segmentés à l'exception des variations liées aux bras	115
Figure 68	Graphe de la fonction de transfert $((1 - \lambda k)(1 - \mu k))^{N/2}$ pour $N > 2$	123
Figure 69	Effet de la troncature directe de la série de Fourier d'un filtre passe-bas idéal	125
Figure 70	Fonctions de transfert de filtres passe-bas.	126

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

ACP	Analyse en composantes principales.
CAESAR	«Civilian American and European Surface Anthropometry Resource».
CCD	«Charged Coupled Device».
PSD	«Position Sensitive Device».

INTRODUCTION

La forme du corps humain est caractérisée par une géométrie complexe et variable d'une personne à une autre. Il n'y a pas deux individus qui ont la même forme. Cependant tous les êtres humains partagent une structure commune du corps indépendamment de leur âge et de leur race. Comment quantifier la forme du corps humain ? Qu'elle est une représentation adéquate de sa variation ? La recherche de réponses à ces questions a été explorée depuis l'époque des Grecs. Ces derniers ont cherché à classer les gens selon leur prédisposition à certaines maladies. Le médecin grec Hippocrate (380 av. J.-C.) distinguait deux types principaux de structures corporelles nommées habitus : la structure phthisique et la structure apoplectique. La première catégorie regroupe des personnes qui sont grandes, minces et colériques. La deuxième correspond à des personnes courtes, présentant un accroupissement et flegmatiques. Les individus de la première classe sont prédisposés à mourir de tuberculose, la seconde d'un ictus apoplectique.

Récemment Sheldon et al. [73] ont présenté une classification des formes humaines en somatotypes. Selon cette classification, chaque individu se situe entre trois formes extrêmes appelées l'endomorphe, la mésomorphe et l'ectomorphe. La première correspond à l'aspect trapu et arrondi du corps. La deuxième est caractérisée par un physique élancé et gracile. Le troisième type correspond à un corps musculaire et osseux. La classification des individus utilise une série de mesures extraites à partir de photographies de corps humain. Néanmoins la méthode implique un jugement de l'apparence des photographies, ce qui la rend subjective.

De nos jours, il existe divers domaines qui sont influencés par les hypothèses émises sur la forme du corps humain. A titre d'exemple, mentionnons l'industrie du vêtement, de l'automobile, de l'aéronautique, la conception d'espaces de travail d'une manière générale ainsi que le domaine médical. Ceci justifie le rôle de l'anthropométrie qui est définie comme étant l'étude de mesures effectuées sur le corps humain.

Traditionnellement, l'anthropométrie caractérise le corps humain par des mesures unidimensionnelles entre des points de repère anatomiques et des mesures de circonférence à des endroits spécifiques. Ces mesures sont directement prises sur le corps humain avec des outils manuels tel que le mètre à ruban. Les mesures traditionnelles représentent une quantification compacte de la forme du corps humain. Cependant, les essais de reconstruction du corps humain montrent que plusieurs formes humaines peuvent être déduites à partir des mêmes spécifications anthropométriques. Ceci mène à la conclusion que les mesures unidimensionnelles ne contiennent en fait que peu d'information sur la forme du corps humain. C'est pour cela que les produits fabriqués selon ces mesures ne conviennent généralement pas à un grand pourcentage de la population pour laquelle ils ont été conçus. Ce point représente une limitation majeure à laquelle est confrontée l'anthropométrie traditionnelle. En plus, le processus manuel de collecte de données est fastidieux et manque de précision.

Les dernières décennies ont connu un progrès notable dans les techniques de numérisation de surface. Ce progrès ainsi que les limitations auxquelles est confrontée l'anthropométrie traditionnelle ont mené à l'émergence de l'anthropométrie de surface en 3D. Cette discipline se base sur des modèles 3D obtenus par numérisation de la surface du corps humain. La rapidité de la numérisation ainsi que la haute résolution des modèles générés accorde à l'anthropométrie de surface en 3D le potentiel de résoudre les problèmes de l'anthropométrie traditionnelle. Ce potentiel a motivé la tenue de projets de numérisation de milliers de sujets. On cite dans ce cadre le projet CAESAR en Amérique du nord et en Europe.

Les modèles 3D générés par les systèmes de numérisation sont constitués d'une grande densité de points de surface, ce qui permet de reconstruire la forme du corps humain. Toutefois le grand nombre de points numérisés mène à la question : Comment ces données seront-elles utilisées pour concevoir des produits qui conviennent au mieux à une population ciblée ?

Cette problématique est un sujet de recherche récent. Les premiers travaux publiés dans ce cadre traitent les modèles 3D en tant que source pour localiser automatiquement des points de repère anatomiques et reproduire des mesures anthropométriques traditionnelles. Des résultats satisfaisants sont obtenus par des approches basées sur le marquage de points de repère sur le corps humain préalablement à la numérisation. Néanmoins ce processus, qui est long, amoindrit le gain de temps réalisé par la numérisation du corps humain. En plus le marquage implique un contact avec le sujet, ce qui peut être gênant pour certaines personnes. C'est pour cela que certains travaux de recherche ont essayé de localiser les points de repère sur les modèles 3D sans marquage préalable. Toutefois, les approches développées dans ce cadre nécessitent plus d'élaboration afin d'atteindre les performances obtenues par celles qui se basent sur le marquage.

La résolution du problème d'extraction des mesures anthropométriques traditionnelles à partir des modèles 3D est en soi une évolution dans le domaine de l'anthropométrie. En effet, la prise des mesures peut être répétée après le départ du sujet. Néanmoins cette façon de traiter les modèles 3D ne fait que les convertir en données traditionnelles et gaspille l'information sur la forme du corps humain qu'elles contiennent.

Un traitement adéquat des données anthropométriques 3D nécessite leur conversion en une description qui soit compacte tout en préservant l'information sur la forme du corps humain. Une telle description représentera une quantification appropriée de la forme. Les rares travaux qui s'inscrivent dans ce cadre se basent généralement sur une étude statistique des modèles 3D d'une population donnée. L'analyse statistique requiert une mise en correspondance des différents modèles. Ce problème n'est pas trivial puisque le nombre de points de surface numérisés varie d'un modèle à un autre. En plus il n'y a aucune correspondance anatomique entre les points de surface des différents modèles. La mise en correspondance fait appel aux positions de points de repère anatomiques du corps humain. Comme mentionné précédemment, la localisation efficace de ces points exige leur marquage préalablement à la numérisation. La lenteur et les coûts engendrés par le mar-

quage font que ce processus sera très probablement éliminé des futurs projets de collecte de données anthropométriques.

L'objectif de notre recherche est de définir une quantification de la forme du corps humain à partir de données anthropométriques 3D sans usage d'information sur la position de points de repère anatomiques. Cette quantification permettra d'analyser la variabilité de la forme du corps humain au sein d'une population donnée.

Contributions

Au cours de notre recherche les contributions suivantes ont été apportées :

- Un algorithme de fermeture des trous des modèles 3D de corps humain est proposé. En effet, les modèles de corps humain numérisés présentent un manque de données dû principalement à l'occlusion de certaines régions au cours de la numérisation. La fermeture de ces trous est essentielle pour la réduction de leur influence sur le traitement des données. L'algorithme développé se base sur des hypothèses émises sur la géométrie du corps humain ainsi que sur la posture des sujets durant la numérisation. Cet algorithme pourra être également étendu pour traiter les modèles 3D d'une façon générale.
- La possibilité de modéliser le corps humain avec des fonctions implicites connues sous le nom d'hyperquadriques étendues est explorée.
- L'utilisation d'une représentation volumétrique des modèles 3D et de l'analyse de composantes principales pour définir une quantification de la forme du corps humain. La représentation volumétrique permet une mise en correspondance des modèles 3D sans utiliser des points de repère anatomiques. Cette correspondance est une approximation de la correspondance anatomique entre les modèles. L'analyse en composantes principales permet d'extraire un ensemble de vecteurs propres représentant les principaux modes de variation de la forme humaine. Les modèles de corps humain sont alors décrits par leur projection sur ces composantes principales.

Cette description permet de reconstruire la forme originale du modèle avec un niveau de détail qui est suffisant pour permettre d'analyser la variabilité de la forme au sein d'un échantillon. Ainsi la description développée représente une quantification adéquate de la forme.

- La description compacte est utilisée pour analyser la variabilité de la forme du corps humain au sein d'une population donnée. Les principaux modes de variation extraits par l'analyse en composantes principales sont visualisés. Nous présentons également un essai d'interprétation de ces modes.

Plan de la thèse

Ce manuscrit est composé de six chapitres. Le premier détaille les limitations auxquelles est confrontée l'anthropométrie traditionnelle et présente les solutions potentielles apportées par l'anthropométrie de surface en trois dimensions. Les principales techniques de numérisation du corps humain sont également résumées. Une description du projet CAE-SAR dont les données sont la base de nos expériences, est aussi fournie.

Le deuxième chapitre résume les travaux de recherche qui se rapportent au traitement des données anthropométriques 3D. Deux catégories sont présentées dans ce cadre. La première a pour but de localiser automatiquement des points de repère anatomiques sur les modèles 3D ainsi que d'extraire des mesures anthropométriques traditionnelles. La deuxième catégorie a pour but de convertir les modèles 3D en une description compacte qui retient l'information sur la forme du corps humain. Ce chapitre présente également la méthodologie que nous proposons de suivre pour développer des outils qui aident les concepteurs à analyser la variabilité de la forme du corps humain à partir de données anthropométriques d'une population ciblée.

Au cours du troisième chapitre nous présentons les approches que nous avons exploré pour développer une description compacte et générative de la forme du corps humain. Nous avons retenu une description statistique de la forme du corps humain. Cette description

est obtenue par application de l'ACP sur une représentation volumétrique des modèles 3D qui est basée sur des cartes de distances signées. L'ACP permet d'extraire un ensemble de composantes qui représentent les principaux modes de variation du corps humain dans la population étudiée. Chaque modèle est alors décrit par sa projection sur ces composantes principales. Le calcul des cartes de distances signées précises nécessite la fermeture des trous des modèles 3D.

Au cours du quatrième chapitre nous abordons le problème de fermeture des trous des modèles 3D. Nous commençons par résumer les travaux effectués dans ce cadre. Dans ce résumé nous illustrons les limites de ces méthodes et montrons pourquoi elles ne sont pas adéquates pour notre problème. Nous présentons ensuite l'approche que nous proposons pour la fermeture des trous des modèles 3D de corps humain. Les résultats de réparation de modèles 3-D de la base de données CAESAR sont illustrés et interprétés. L'algorithme de fermeture des trous convertit également les modèles 3D en cartes de distances signées.

Le cinquième chapitre présente les résultats de l'application de l'analyse en composante principale aux cartes de distances signées d'un ensemble de modèles de corps humain.

La visualisation des principaux modes de variation de la forme d'un ensemble de modèles 3D est fournie au chapitre 6. Nous proposons également notre propre interprétation de ces modes.

Enfin, nous présentons les conclusions tirées de cette étude ainsi que les travaux futurs.

CHAPITRE 1

ANTHROPOMÉTRIE

Les informations sur la forme du corps humain influencent la conception dans plusieurs domaines. L'industrie de fabrication du vêtement, la conception de l'espace de travail, l'interface homme-machine font partie des domaines qui sont fortement influencés par les hypothèses émises sur la forme du corps humain pour une population donnée. Traditionnellement la collecte des données anthropométriques est un processus fastidieux, coûteux et imprécis. Dans ce chapitre, les limites de l'anthropométrie traditionnelle ainsi que les solutions potentielles apportées par l'utilisation de la numérisation de surface 3D dans le domaine de l'anthropométrie sont illustrées.

1.1 Limites de l'anthropométrie traditionnelle

Les données anthropométriques traditionnelles sont des mesures unidimensionnelles qui correspondent à des distances entre des points de repère anatomiques ou à des circonférences à des endroits spécifiques (figure 1). Ces mesures sont prises avec des outils simples et non coûteux tel que le mètre à ruban, le compas et l'anthropomètre (figure 2).

L'anthropométrie traditionnelle est utilisée depuis des siècles, il est alors prudent de prédire qu'elle ne sera pas désuète dans un futur prochain. Toutefois, ce domaine fait face à

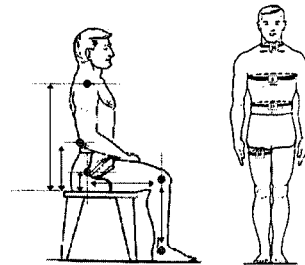


Figure 1 Mesures anthropométriques traditionnelles

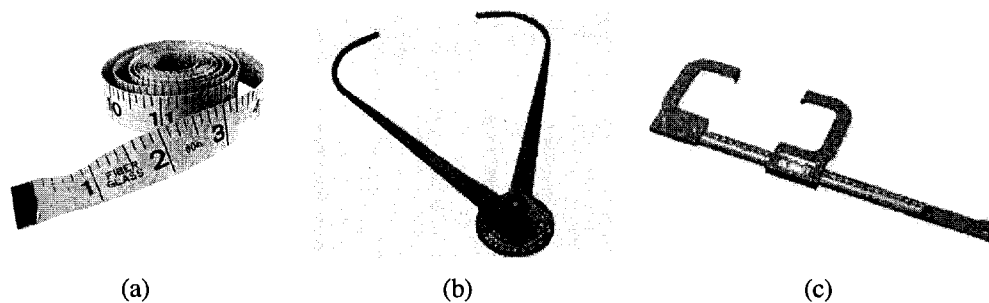


Figure 2 Outils de mesures anthropométriques traditionnels. (a) Mètre à ruban. (b) Compas. (c) Anthropomètre.

des limitations qui peuvent être surmontées par l'anthropométrie de surface 3D. Cette dernière devient même essentielle pour certaines applications où la fonctionnalité des articles conçus dépend de leur ajustement au corps humain. On cite dans ce cadre la conception des casques pour pilotes et les équipements de protection.

La première limitation vient du fait que plusieurs contours ambigus peuvent dériver des mesures traditionnelles. Ainsi les mêmes spécifications anthropométriques peuvent produire des articles qui sont différents du point de vue forme. En effet, à cause de la non-unicité de la reconstruction à partir des contours mesurés, la majorité des surfaces des modèles de corps humain sont en pratique déduites à partir d'interprétations artistiques [69]. Ceci est le cas pour les mannequins utilisés dans l'industrie du vêtement ; les applications ergonomiques tel que le modèle biomécanique et informatisé d'un humain ComBiMan [11] ; les modèles biodynamiques tel que le mannequin ADAM [49].

Le deuxième problème découle du fait que les mesures traditionnelles dépendent de l'orientation du segment à mesurer. À titre d'exemple, la mesure «oreille jusqu'au haut de la tête», définit le haut de la tête comme étant le point vertical le plus haut en ayant la tête orientée selon le plan de Frankfurt proposé par Ranke [63]. Ce dernier est un plan horizontal passant par une ligne liant le trignon droit (devant de l'oreille) au point le plus bas de l'orbite de l'oeil droit (figure 3). Il représente un plan standard pour l'orientation de la tête. La figure 4 illustre le problème d'alignement de deux sujets selon le plan de Frankfurt. À

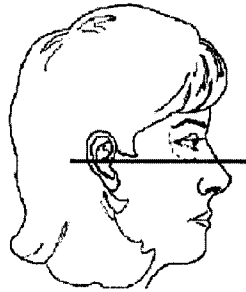


Figure 3 Le Plan de Frankfurt est un plan horizontal passant par une ligne qui lie le tragus droit (devant de l'oreille) au point le plus bas de l'orbite de l'oeil droit

droite de la figure, les sujets portent des casques. Le haut de la tête défini selon le plan de Frankfurt ne coïncide pas avec le haut de la tête des deux sujets après qu'ils ont endossé les casques. En effet, la disposition de la tête dans le casque dépend du contour du crâne. Ceci implique que l'utilisation des mesures traditionnelles dans la conception d'équipement pour la tête ou le visage induit une erreur inconnue et anticipée dans les points de référence. Puisque les concepteurs ont peu ou pas d'informations sur la surface, ils n'ont aucun moyen de détecter cette erreur. Ainsi plusieurs tailles sont créées à cause de l'erreur d'alignement et non à cause de la variabilité de la forme de la tête elle-même. Plusieurs de ces tailles ne conviennent à personne vu que l'erreur ajoutée génère des équipements ou des vêtements disproportionnés.

Un test effectué par Robinette [66] sur les casques HGU-53/P dans les forces aériennes américaines a révélé que deux tailles seulement (une pour les hommes et l'autre pour les femmes) conviennent au même pourcentage de la population que les six tailles originales. Par exemple, la taille six est disproportionnée, ce qui fait que même si elle est plus grande en volume que la taille cinq, elle ne convient pas à des têtes plus larges.

Une vue plus générale de ce problème est la dépendance des mesures traditionnelles au système de coordonnées utilisé au cours de l'acquisition des données.

1.2 Anthropométrie de surface en trois dimensions

L'anthropométrie de surface en trois dimensions est une alternative prometteuse pour répondre aux exigences de divers secteurs industriels où les données anthropométriques présentent une composante essentielle du processus de conception.

1.2.1 Avantages de l'anthropométrie de surface en trois dimensions

L'anthropométrie de surface en trois dimensions se base sur des modèles 3D obtenus par numérisation du corps humain. La résolution (de l'ordre de 5 mm) de ces modèles est suffisamment élevée pour décrire les détails de la surface du corps humain. Ceci permet de surmonter un problème majeur dans le domaine de l'anthropométrie, à savoir le manque d'information sur la forme.

Les systèmes de numérisation sont également très avantageux par rapport aux méthodes traditionnelles de mesures en terme de vitesse d'acquisition des données. En effet, le temps de numérisation est inférieur à une minute comparé aux 45 minutes dans le cas traditionnel. Par ailleurs, la numérisation n'implique pas de contact qui peut être gênant pour certains sujets.

L'utilisation de capteur 3D élimine les erreurs de mesure qui sont dues aux facteurs humains. Ceci renforce la précision et la reproductibilité des mesures anthropométriques tridimensionnelles.

Le problème d'alignement évoqué dans le cas de mesures traditionnelles est moins critique pour les données tridimensionnelles. En effet, même si elles dépendent de la posture dans le cas de numérisation du corps entier et de l'expression faciale dans le cas de numérisation du visage, ces données sont suffisamment complètes et nombreuses pour pouvoir être réorientées dans différents systèmes de coordonnées.

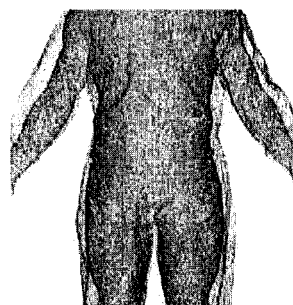


Figure 5 Les modèles 3D de corps humain permettent de visualiser la relation spatiale entre la corps humain et l'article porté. Dans le premier modèle, la personne porte des vêtements moulants et dans le deuxième un uniforme de vol [67].

L'anthropométrie de surface en trois dimensions permet la visualisation et la mesure de l'alignement du corps humain avec l'article porté. La figure 5 montre deux modèles tridimensionnels superposés d'une même personne. Dans le premier modèle, la personne porte des vêtements moulants et dans le deuxième un uniforme de vol [67]. La possibilité de visualiser ainsi que de mesurer la relation spatiale entre la personne et l'article porté permet au concepteur de mieux percevoir les ajustements à effectuer ainsi que de les quantifier afin de concevoir un produit qui convient mieux à la personne ciblée.

1.2.2 Techniques de numérisation du corps humain

Dans la dernière décennie, des progrès remarquables ont été effectués dans le cadre du développement de systèmes de numérisation complète du corps humain.

Il existe plusieurs techniques de numérisation de surface telles que celles basées sur la projection de lumière structurée, le temps de vol d'un faisceau laser et les techniques de vision numérique qui permettent de déterminer la profondeur à partir d'images stéréo, de l'ombrage et de la texture. La plupart des systèmes de numérisation du corps humain sont basés sur la lumière structurée. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories :

- *Numérisation point par point*

Cette technique utilise une diode électroluminescente (DEL) et un détecteur de posi-

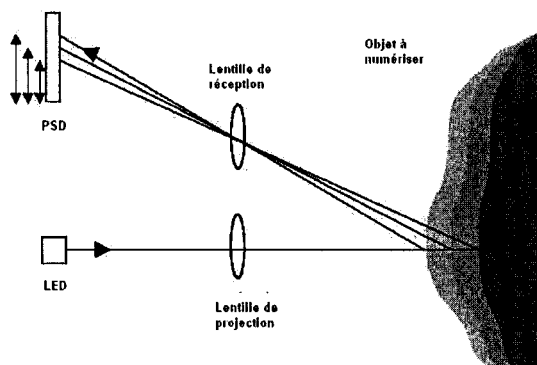


Figure 6 Numérisation de surface par triangulation optique [24]

tion (PSD). La lumière émise par la diode est focalisée par une lentille sur la surface à numériser. La lumière réfléchi est ensuite focalisée par une autre lentille sur le PSD. La profondeur du point de la surface est obtenue par triangulation à partir de la position du rayon réfléchi sur le détecteur (figure 6). Afin de numériser la surface en entier, la lumière est projetée horizontalement et verticalement. Cette technique est utilisée par le système de numérisation développé par Hamamatsu Photonics [31].

- *Numérisation basée sur la projection d'un plan de lumière*

Un plan de lumière est projeté sur le sujet à numériser, générant ainsi une courbe sur la surface. Cette courbe est captée par une caméra CCD située en dehors de l'axe de projection du plan de lumière. Les distorsions observées sur la courbe reflètent les variations de profondeur de la surface comme le montre la figure 7. Cette méthode permet de numériser simultanément plusieurs centaines de points de la surface. La source de lumière et la caméra CCD sont ensuite balayés verticalement ou horizontalement pour numériser la surface entière à partir d'un point de vue donné. Des systèmes de numérisation qui utilisent cette technique sont le scanner de l'université de Loughborough (LASS) [36], Vitronic VIRO-3D [75] et Cyberware WB4 [20].

- *Numérisation basée sur les franges de moiré*

Ces techniques se basent globalement sur la projection d'une grille de lumière sur le sujet à mesurer. Une caméra capte la déformation de la grille réfléchi par la

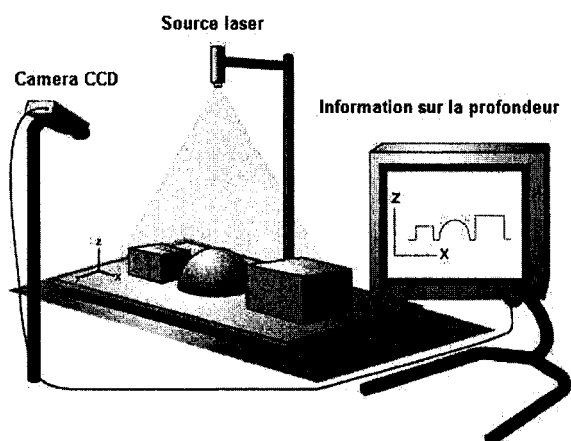


Figure 7 Numérisation de surface en utilisant un plan de lumière

surface du corps. La superposition de la grille réfléchi avec la grille originale génère des franges de Moiré. Ces dernières sont analysées pour extraire l'information de profondeur. Parmi les systèmes de numérisation du corps humain qui utilisent les franges de Moiré, on cite le capteur Triform de Wicks and Wilson Ltd [89] et le capteur de $[TC]^2$ [83].

Afin de couvrir la surface du corps humain en entier, les systèmes évoqués précédemment sont constitués de plusieurs unités de numérisation comme le montre la figure 8. Ces dernières permettent de numériser le corps humain à partir de différents points de vue. Les images télémétriques générées par ces unités sont par la suite alignées et fusionnées pour générer un modèle 3D du corps humain [84].

1.2.3 Contraintes de la numérisation du corps humain

La numérisation du corps humain est sujette à des contraintes supplémentaires par rapport à la numérisation de surface en général. Le corps humain est un organisme vivant en mouvement continu. Sa forme est influencée par la respiration, le balancement et le réflexe de contrôle de la stabilité de la posture [19]. Ainsi la réduction du temps d'acquisition est une

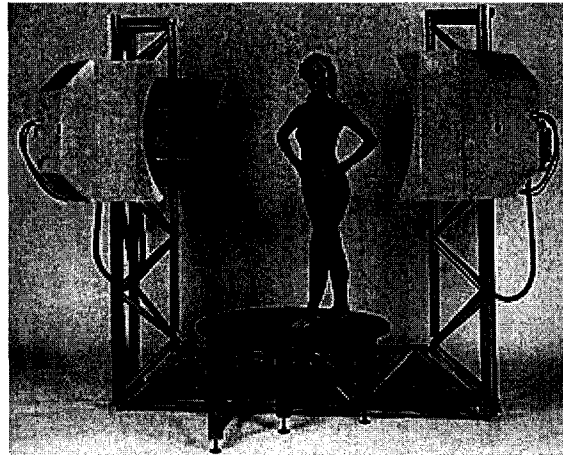


Figure 8 Système de numérisation Cyberware WB4 [20]

exigence pour les systèmes de numérisation du corps humain. Dans le cas de Cyberware WB4 et de Vitronic VITUS, ce temps est de dix à vingt secondes.

Une autre contrainte soulignée par Rioux [65] concerne les propriétés optiques de la peau. D'une part, cette dernière est transparente, surtout pour la portion rouge du spectre de la lumière visible, ce qui entraîne une sous-estimation de l'élevation de la peau. D'autre part, la réflectance de la peau dépend de la couleur de la personne à numériser. Le système pileux représente une autre source d'imprécision puisque ses propriétés optiques sont différentes de celle de la peau. En plus la distribution ainsi que la densité des poils sont difficiles à prédire.

Enfin, la complexité de la topologie du corps humain fait que certaines régions tel que les aisselles et l'entrejambe sont souvent invisibles au cours de la numérisation [14].

Les systèmes de numérisation du corps sont actuellement dispendieux et difficilement transportables, ce qui limite les possibilités d'effectuer de larges études anthropométriques tridimensionnelles. Pour cela, les mesures traditionnelles restent plus répandues malgré les erreurs qu'elles induisent dans la conception de divers produits.

1.2.4 Projet CAESAR

Le projet CAESAR (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource) est une étude d'anthropométrie de surface en trois dimensions de milliers de civils âgés de 18 à 65 dans trois pays : les États-Unis, les Pays Bas et l'Italie [68]. Ce projet est le premier de ce genre en Europe et en Amérique du nord.

1.2.4.1 Partenaires

Plusieurs évènements ont eu lieu pour encourager le lancement du projet CAESAR. Le premier est le développement de techniques de numérisation en trois dimensions du corps humain. Un autre événement est la formation en 1993 d'un groupe de travail AGARD (Advisory Group for Aerospace Research and Development) au sein de l'OTAN. Le groupe a fait une revue de la technologie d'anthropométrie de surface en trois dimensions et a établi en 1997 un plan de déploiement pour le projet CAESAR.

En même temps, deux organisations commerciales, la SAE (Society of Automotive Engineers) et le comité D-13 d'ASTM (American Society of Testing and Materials) élaboraient un plan pour mener une étude anthropométrique traditionnelle. La première organisation est constituée de représentants de l'industrie automobile et aéronautique. La deuxième est constituée de représentants de l'industrie de fabrication du vêtement. Le projet CAESAR était une réponse aux besoins de ces industries, et c'est pour cela que ces organisations se sont jointes aux autres partenaires de ce projet.

1.2.4.2 Données collectées

Au cours du projet CAESAR, environ 6000 personnes ont été numérisées en Europe et aux États Unis entre 1998 et 2001. Le système Cyberware WB4 a été utilisé aux États-Unis et en Italie tandis que le système Vitronic Vitus a été utilisé aux Pays-Bas.

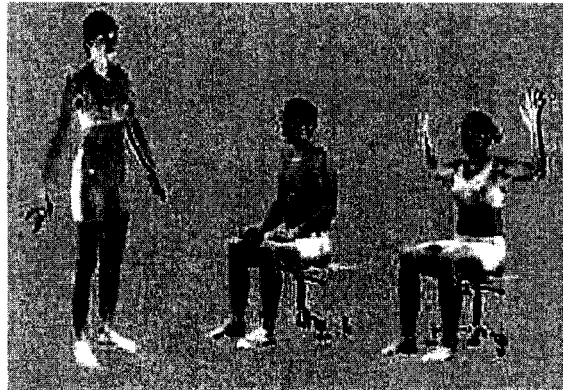


Figure 9 Les trois postures du projet CAESAR [68]

Chaque personne a été numérisée en trois postures comme l'illustre la figure 9. Le choix des postures a été effectué d'une part pour minimiser les surfaces cachées durant la numérisation [14]. D'autre part, ce choix permet d'extraire les mesures anthropométriques traditionnelles à partir des modèles 3D, assurant ainsi une transition entre l'anthropométrie traditionnelle et l'anthropométrie de surface en 3D.

Les images télémétriques fournies par chaque unité de numérisation sont alignées et fusionnées pour générer des modèles 3D qui sont représentés sous forme de surface triangulée. Dans le cas des sujets mesurés par le système Cyberware WB4, cette opération est effectuée par un logiciel intégré au système de numérisation. Le logiciel se base sur une technique proposée par Turk et al. dans [84]. En ce qui concerne les sujets mesurés par le système Vitronic Vitus, l'alignement et le fusionnement sont effectués à l'aide du logiciel Polyworks d'Innovmetric [33] qui est basé sur la méthode décrite dans [74].

Les systèmes de numérisation utilisés sont aussi dotés de caméras couleur, ce qui leur permet d'acquérir la texture du corps humain.

Puisque le projet CAESAR est le premier de son genre, il a été décidé de collecter des mesures traditionnelles afin d'assurer une transition douce entre l'anthropométrie classique et celle tridimensionnelle. En plus, 72 points de repère anatomiques ont été marqués

sur les corps des personnes avant la numérisation. La localisation de ces points permet l'extraction automatique et semi-automatique de mesures traditionnelles.

Les données anthropométriques tridimensionnelles collectées au cours du projet CAESAR représentent la source des données de base de notre recherche.

1.3 Conclusion

L'anthropométrie traditionnelle fait face à des limitations qui sont dues principalement à l'imprécision des données mesurées ainsi qu'au manque d'information concernant la forme du corps humain. Ces limitations affectent la conception de produits dans divers secteurs industriels tel que la conception de vêtement, véhicule de transport et environnement de travail. Les techniques de numérisation de la surface du corps humain en trois dimensions permettent de mesurer une grande densité de points sur le corps humain, fournissant ainsi une information complète sur sa forme. Toutefois, l'exploitation des données mesurées pour l'étude de la variabilité de la forme du corps humain est encore un défi. En plus, les systèmes de numérisation du corps sont coûteux. Ces deux contraintes expliquent l'usage encore très répandu des mesures traditionnelles malgré les erreurs qu'elles induisent dans la conception.

CHAPITRE 2

TRAITEMENT DES DONNÉES ANTHROPOMÉTRIQUES 3D

La numérisation de la surface du corps humain n'est pas en soi suffisante pour surmonter les limites de l'anthropométrie traditionnelle. En effet, les données 3D générées sont constituées d'un grand nombre de points de surface qui ne vérifient aucune correspondance anatomique entre les différents modèles de corps humain. Ainsi, l'utilité de ces données est dépendante du développement d'outils d'analyse et de traitement qui permettent d'extraire de l'information sur la forme du corps humain à partir de milliers de points numérisés. La revue de la littérature montre que les travaux réalisés dans ce cadre se classifient dans deux catégories principales. La première concerne la localisation de points de repère anatomiques ainsi que l'extraction de mesures anthropométriques traditionnelles à partir de modèles 3D de corps humain. La deuxième catégorie regroupe les méthodes qui ont pour but de définir des descripteurs tridimensionnels de la forme du corps humain. Enfin, nous présentons la méthodologie que nous proposons de suivre pour développer des outils qui aident les concepteurs à analyser la variabilité de la forme du corps humain à partir de données anthropométriques d'une population ciblée.

2.1 Localisation de points de repère anatomiques et extraction automatique de mesures unidimensionnelles

Même si les mesures anthropométriques traditionnelles manquent de précision et d'information sur la forme du corps, elles demeurent encore la référence dans la conception et la fabrication de divers produits. C'est la raison qui a motivé plusieurs chercheurs à essayer de localiser des points de repère anatomiques sur les modèles 3D de corps humain afin d'en déduire des mesures traditionnelles.

Les travaux qui traitent de cette problématique peuvent être répartis en deux groupes selon qu'ils se basent ou non sur un marquage préalable à la numérisation des points de repère anatomiques.

2.1.1 Marquage préalable des points de repère anatomiques

La solution la plus intuitive pour la localisation de points de repère anatomiques consiste à les marquer avant la numérisation [27] [46] [80]. La localisation se compose d'une phase de détection des marqueurs et d'une phase d'attribution d'étiquettes.

Dans la méthode proposée par Geison et al. [27], des marqueurs optiques sont placés sur les points de repère anatomiques de résidu de jambe d'un groupe d'amputés. Les marqueurs sont détectés par leur niveau de gris dans l'image d'éclairage lumineux générée par le système de numérisation. Une approche bayésienne, qui se fonde sur une connaissance préalable de la distribution spatiale des points repère, est proposée pour l'attribution des étiquettes. L'application de cette méthode pour le corps en entier [15] a conduit à la fausse localisation de 30% des points de repère. Pour minimiser cette erreur, une approche semi-automatique où les marqueurs sont détectés manuellement est proposée dans [15]. L'attribution des étiquettes est effectuée automatiquement avec des réseaux de quantification vectorielle. Cette méthode a permis de localiser correctement 99,8% des points de repère marqués au cours du projet CAESAR. L'erreur, négligeable, correspond aux marqueurs qui ne sont pas visibles sur les images couleur.

Une approche automatique qui donne des résultats satisfaisants pour la localisation de points de repère anatomiques sur le corps humain en entier est présentée dans [80]. La phase de détection consiste en un étiquetage booléen où chaque point est classifié comme appartenant à un marqueur ou non. Le problème est résolu avec un algorithme probabiliste de relaxation d'étiquette [42]. Ce dernier est un processus itératif qui ajuste la probabilité d'attribuer une étiquette à un point donné en fonction des probabilités d'étiquetage associées à ses voisins. Les probabilités initiales sont déduites à partir d'un histogramme

de niveaux de gris calculé sur un ensemble de marqueurs. Après convergence, les points sont classifiés selon l'étiquette correspondant à la probabilité la plus élevée. Les points appartenant à des marqueurs sont regroupés et chaque marqueur est représenté par son centroïde. La phase d'attribution d'étiquette pour les marqueurs repose sur un modèle de corps humain générique pour lequel les points de repère anatomiques ont été étiquetés manuellement. Un algorithme probabiliste de relaxation d'étiquettes est utilisé pour la mise en correspondance entre les marqueurs du modèle générique et ceux détectés dans la phase précédente. Les résultats rapportés montrent que le pourcentage des points correctement détectés est de 94,35% alors que celui des points correctement étiquetés est de 90,32%.

2.1.2 Extraction des points de repère anatomiques sans marquage préalable

Le marquage préalable des points de repère allonge considérablement la durée d'acquisition des données et dissipe ainsi le gain de temps réalisé au cours de la numérisation. En plus ce processus implique un contact qui peut être gênant pour certaines personnes. Le marquage est aussi sujet aux erreurs dues aux facteurs humains. En effet, la localisation des points de repère varie d'un opérateur à un autre. La fatigue peut également influencer le marquage effectué par un même opérateur. Afin de surmonter ces contraintes, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'automatisation de l'extraction de mesures traditionnelles ainsi que de la localisation de points de repère anatomiques à partir de modèles 3D de corps humain sans marquage préalable à la numérisation [60] [25] [85]. Cette tâche est complexe pour diverses raisons. D'une part, la forme du corps humain est caractérisée par une grande variabilité. D'autre part, les points de repère anatomiques sont subtils et souvent leur localisation se base sur l'ossature et demande la palpation de la surface du corps humain. Par ailleurs, certaines parties du corps humain telles que les régions entre les jambes et sous les bras ne sont pas visibles au cours de la numérisation.

Le travail décrit dans [60] représente le premier essai pour reproduire des mesures anthropométriques traditionnelles à partir de modèles 3D. Un outil qui permet à l'utilisa-

teur d'extraire d'une façon interactive des circonférences ainsi que des distances entre des points sur la surface du corps humain est proposé. La méthode se base sur des modèles de corps humain segmentés et présentés sous forme de tranches horizontales. Des mesures telles que le tour de poitrine et la longueur des bras sont fournies automatiquement. Néanmoins la localisation des points de repère qui permettent d'extraire ces mesures est très approximative. Par exemple, le tour de la poitrine correspond à la circonférence de la tranche qui est à un pouce au-dessous de la tranche supérieure du torse.

La localisation de points de repère anatomiques nécessite la segmentation du corps humain en torse, bras et jambe pour réduire l'espace de recherche des différents points de repère. La segmentation se fait par la localisation des points de branchement qui sont l'entrejambe et les aisselles. Le travail présenté dans [56] constitue le premier à avoir abordé cette problématique. La méthode segmente des modèles 3D qui se tiennent dans une posture «debout standard» où les bras sont droits et écartés du torse et les jambes sont espacées (figure 12). Les points de la surface du corps humain sont arrangés en tranches horizontales. Chaque point est associé à un segment du corps selon la topologie de la tranche à laquelle il appartient et sa localisation. Par exemple une tranche constituée de deux courbes fermées correspond aux jambes. Tandis que celles qui comprennent trois courbes fermées représentent des coupes au niveau du torse et des bras. Une tranche qui est formée de deux courbes qui se joignent représente la transition entre les jambes et le torse.

Dans certains cas, les segments du corps humain se touchent avant les points de branchement. Ceci complique la localisation de ces derniers. Un algorithme qui permet de séparer deux objets de forme cylindrique qui fusionnent tel que les jambes, le torse et les bras, est proposé dans [57]. L'algorithme se base sur la détermination du point de rebroussement. Ce dernier correspond à une pointe générée par l'intersection de deux arcs. L'identification d'un point de rebroussement permet de générer une bissectrice qui sépare deux segments même si leurs points se fusionnent. L'algorithme de détermination du point de redres-

sement utilise une enveloppe convexe autour des points d'une tranche (figure 10). Les distances euclidiennes entre les points de la tranche et un segment de l'enveloppe convexe sont calculées et ordonnées. Les points de la tranche sont rangés en fonction des positions de leurs projections sur la ligne de l'enveloppe. Les deux points les plus proches de ce segment représentent les extrémités de la courbe définissant le point de rebroussement. Les autres points de la courbe se projettent entre ces deux points. En utilisant la liste des distances ordonnées, le prochain point le plus proche du segment de l'enveloppe correspond au prochain point de la courbe définissant le point de rebroussement. Chaque fois qu'un nouveau point est identifié, l'intervalle de la ligne de l'enveloppe convexe dans lequel se projète le reste des points de la courbe se rétrécit. À la fin, cet intervalle se réduit à la distance entre deux points qui sont situés d'un côté et de l'autre du point de rebroussement. Une bissectrice entre ces deux points permet de segmenter les deux jambes comme l'illustre la figure 10. L'algorithme présenté tente de séparer les données même si elles correspondent au même segment du corps. Afin de détecter l'entrejambe, l'approche traite d'abord une tranche où la séparation entre les jambes est évidente. La bissectrice calculée pour cette tranche permet de segmenter les jambes dans les tranches inférieures. Une bissectrice est calculée pour chaque tranche supérieure. L'approche assume que l'entrejambe est atteint quand la bissectrice d'une tranche pivote à droite ou à gauche par rapport aux directions précédentes.

La segmentation des bras se base également sur la détermination de courbes présentant un point de rebroussement. Une tranche située à un quart de distance entre le cou et les mains est traitée en premier lieu. À cette hauteur, la séparation entre les bras et le torse est évidente. La bissectrice de cette tranche permet de segmenter les tranches inférieures vu que les mains s'écartent de plus en plus du torse dans la posture étudiée. Pour chaque tranche supérieure, deux bissectrices sont générées en utilisant les segments avant et arrière de l'enveloppe convexe. Si les deux bissectrices ne fournissent pas la même segmentation, une modification est apportée à l'algorithme. Les distances entre les points de la tranche

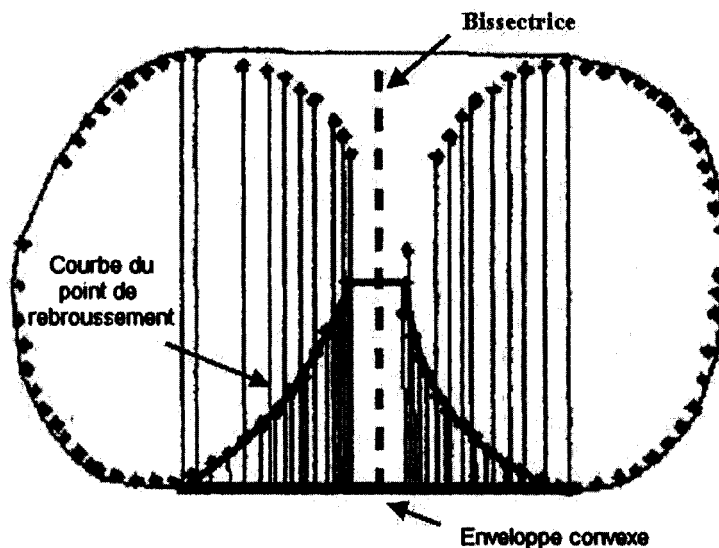


Figure 10 Segmentation d'une tranche au niveau des jambes par détermination d'une courbe présentant un point de rebroussement [57]

et les segments de l'enveloppe sont calculées selon une direction faisant un certain angle avec les segments plutôt qu'une direction qui leur soit perpendiculaire.

Afin de vérifier qu'une tranche correspond aux aisselles, quatre mesures L_1 , L_2 , L_3 et L_4 sont déterminés pour fournir une indication sur la courbure des données associés aux bras (figure 11). Ces mesures sont calculées à partir de quatre points clés. Les deux premiers sont identifiés comme étant les points en avant et en arrière du bras qui sont les plus proches de la bissectrice. À chacun de ces deux points est associé le point le plus distant selon la direction de la bissectrice. Des faibles distances entre les points clés indiquent une faible courbure des données qui ne représente en fait pas les bras. L'approche suppose qu'une tranche correspond aux aisselles dès que les mesures L_1 , L_2 , L_3 et L_4 deviennent inférieures à 4 mm.

La méthode proposée dans [85] utilise la logique floue pour la segmentation du corps humain. Après filtrage du bruit, les données sont réorientées de façon à ce que l'axe z cor-

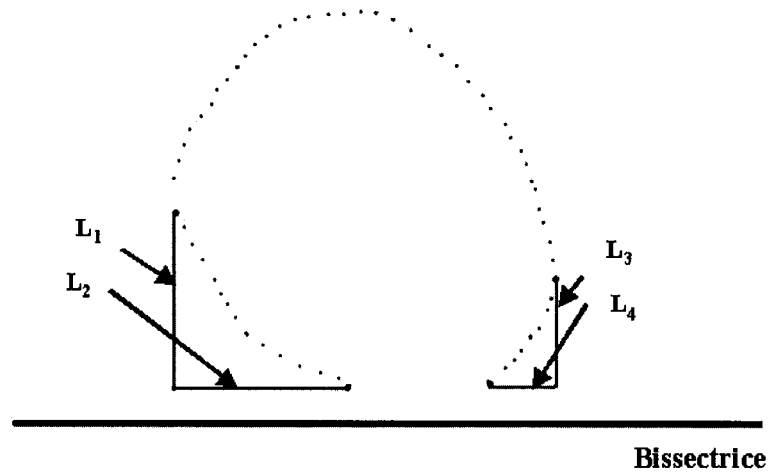


Figure 11 Estimation de la courbure pour la localisation des aisselles [57]

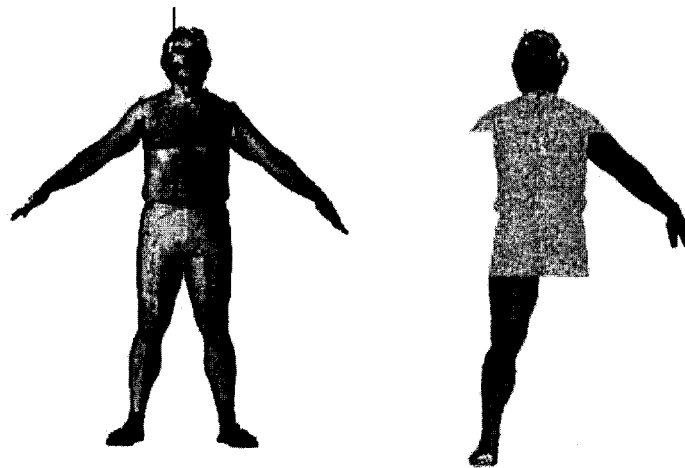


Figure 12 Segmentation du corps humain en torse, tête, jambes et bras en utilisant les points de branchement [57]

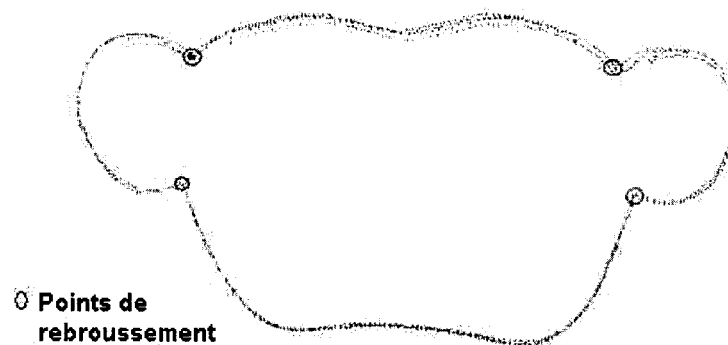


Figure 13 Localisation des aisselles par identification de points de rebroussement [85]

respond à la hauteur du modèle, l'axe x correspond à l'épaisseur et l'axe y correspond à la largeur. Les modèles sont représentés sous forme de tranches horizontales qui sont traitées une par une à la recherche de points de rebroussement. Ces derniers sont caractérisés par un angle faible que forme un point avec son voisin à droite et celui à gauche comme le montre la figure 13. Les aisselles correspondent à une tranche contenant des points de rebroussement. La classification des angles en faible, moyen ou grand se fait en utilisant des règles de logique floue. Pour l'identification de l'entrejambe, la méthode débute par une tranche située à la moitié de la hauteur du modèle. Les tranches qui lui sont inférieures sont traitées l'une après l'autre. L'entrejambe est détecté dès que la tranche devient séparable en deux courbes. L'approche propose également la détermination d'autres caractéristiques telles que le cou et la poitrine. La recherche du cou se fait autour du $7/8$ de la hauteur du modèle. La tranche ayant le plus faible minimum de la coordonnée y caractérise le cou. La poitrine est localisée par la tranche ayant un maximum de la coordonnée x autour du $3/4$ de la hauteur du modèle.

La méthode proposée dans [37] segmente également le corps humain en déterminant le nombre de courbes fermées dans une tranche. L'approche assume que la surface des modèles est fermée. Le nombre de courbes fermées dans une tranche est déterminé en fonction de la parité du nombre d'intersections d'un ensemble de rayons projetés à partir du centre de la tranche. Si ce nombre est pair, le centre de la tranche se situe à l'exté-

rieur d'une courbe fermée. Ceci implique que la tranche est formée de plus qu'une seule courbe. Après identification des points de branchement, une segmentation plus raffinée est effectuée. Les positions du cou, épaules, taille, coudes, poignets, genoux et chevilles sont déterminées à partir de la courbure de la fonction décrivant les circonférences des tranches des différents segments du corps humain.

Les techniques de segmentation présentées précédemment assument qu'au cours de la numérisation, les sujets se tiennent en posture debout standard. Une méthode qui est plus robuste face aux variations de la posture est proposée dans [90]. L'approche qui est particulièrement utile pour les application liées à l'animation, se base sur un graphe de Reeb discret [64]. Ce dernier permet de comprendre la structure topologique d'une forme. En effet, chaque point d'un graphe de Reeb représente une courbe de niveau d'une fonction réelle f qui est définie sur une variété compacte. Dans le cas du corps humain, si f représente la hauteur, les branches du graphe de Reeb correspondent aux différents segments comme le montre la figure 14. Les points critiques du graphe correspondent aux points de branchement du corps humain. La segmentation se réduit alors à la détermination des courbes de niveau. L'utilisation de la fonction hauteur pour la construction du graphe de Reeb assume que les sujets se tiennent en posture debout standard. Afin de traiter les cas de variation de la posture, la distance géodésique est utilisée comme fonction. La distance géodésique entre deux points d'une variété correspond à la longueur du chemin le plus court qui les sépare. La distance géodésique est invariante pour des transformations rigides. Les auteurs assument que la distance est aussi quasi invariante au changement de posture tant que les segments du corps humain restent séparés sauf au niveau des points de branchement. Les résultats de segmentation de modèles de corps humain générés graphiquement qui se tiennent en diverses postures sont illustrés à la figure 15.

Une approche plus élaborée pour la localisation de points de repère anatomiques à partir de modèles 3D de corps humain est présentée dans [25]. Après la reconstruction d'une surface à partir d'un nuage de points, les points de branchement sont identifiés pour seg-

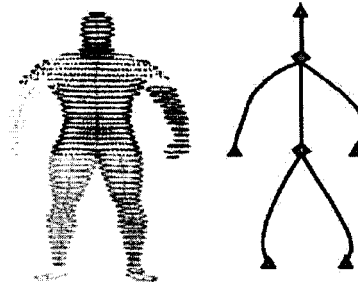


Figure 14 Graphe de Reeb d'un corps humain en utilisant la fonction hauteur pour déterminer les courbes de niveaux [90]

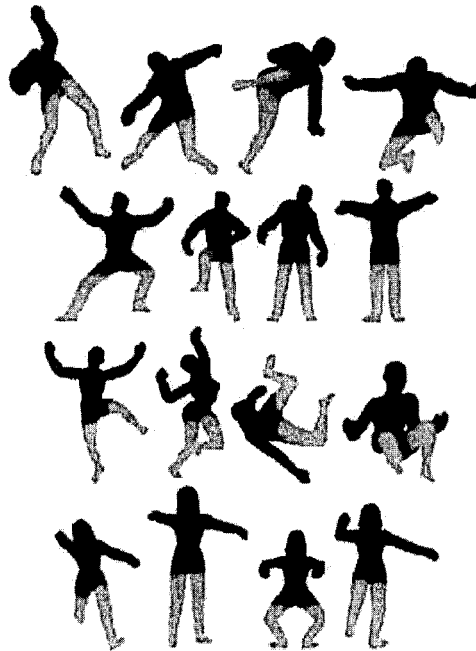


Figure 15 Segmentation du corps humain dans diverses postures en utilisant le graphe de Reeb [90]

menter le corps humain. Des attributs de forme telles que les courbures principales, les dérivées de surfaces et les circonférences des enveloppes convexes autour des différentes tranches horizontales du corps humain sont associés aux points des modèles 3D. Ces attributs sont combinés pour générer des détecteurs de points de repère. À titre d'exemple, le

détecteur de l'acromion gauche, qui est le point le plus extérieur de l'épaule, est formulé comme suit :

- contexte de haut niveau pour définir un point de départ et un volume qui restreint la recherche : entre la nuque et l'aisselle gauche.
- contexte intermédiaire pour définir un chemin qui guide la recherche : suivre le contour de l'épaule obtenu par concaténation des points ayant une coordonnée z maximale. Pour cette approche, l'axe z représente la largeur des modèles 3D.
- Descripteurs locaux de formes : localisation du premier point où le gradient devient supérieur à une valeur g_2 après passage d'un point où le gradient est inférieur à une valeur g_1 .

Les paramètres des détecteurs sont optimisés en utilisant des techniques d'apprentissage tel que les réseaux de neurones, les machines à vecteurs de support et les algorithmes génétiques. Des mesures anthropométriques traditionnelles sont par la suite déduites à partir des points de repère localisés. La comparaison de ces mesures avec ceux prises manuellement sur les sujets révèle une erreur moyenne de l'ordre de 12 mm.

Les approches de localisation de points de repère anatomiques sans marquage préalable sont loin de fournir des résultats comparables à ceux qui se basent sur l'utilisation de marqueurs. La résolution de ce problème pourra être facilitée si des nouveaux points de repère qui ne se basent pas sur l'ossature sont adoptés comme référence dans le domaine de l'anthropométrie. À court terme, ce changement est improbable.

2.2 Descripteurs de formes tridimensionnels

La résolution du problème de localisation automatique de points de repère ainsi que l'extraction de mesures traditionnelles constituent un progrès dans le domaine de l'anthropométrie. En effet, la prise de mesures peut être répétée après le départ des sujets. Par ailleurs, si aucun marquage préalable des points de repère n'est effectué, le temps d'acquisition se trouve considérablement réduit d'une trentaine de minutes à une vingtaine

de secondes. Néanmoins, un tel traitement ne fait que convertir les données tridimensionnelles en mesures traditionnelles et par la suite n'exploite pas l'information sur la forme du corps humain qu'elles contiennent.

Un usage adéquat de modèles 3D de corps humain exige le développement de méthodes qui transforment les centaines de milliers de points de surface numérisés en une représentation compacte qui renferme l'information sur la forme du corps humain. Une telle représentation est utile pour comparer la forme de différents individus et par la suite les regrouper pour définir des tailles qui s'ajustent au mieux à la clientèle visée. Conventionnellement, le regroupement se fait en utilisant des mesures unidimensionnelles.

Une description compacte des modèles 3D de corps humain sans conversion en mesures traditionnelles est proposé dans [59]. Cette description est le fondement d'un outil de gestion de base de données anthropométriques tridimensionnelles (Cleopatra). L'outil permet à l'utilisateur de sélectionner un modèle d'entrée et de visualiser les personnes de la base de données qui lui sont similaires comme le montre la figure 16. La similarité entre les différents individus est analysée de deux façons. La première traite les modèles du corps humain en tant que surface triangulée. Un système de coordonnées est déterminé à partir des axes principaux du tenseur d'inertie du modèle 3D. Les angles séparant la normale de chaque triangle aux deux premiers axes sont calculés. Trois types d'histogrammes sont dressés à partir de ces angles. Le premier type d'histogramme décrit la distribution des angles entre la normale et les deux axes. Le deuxième type d'histogramme traite les angles entre la normale et les axes principaux séparément. Le troisième type d'histogramme est bidimensionnel et tient compte de la relation entre les angles définis par rapport à chacun des axes. Les trois types d'histogrammes sont aussi calculés en remplaçant la normale d'un triangle par la corde reliant son centre de masse au centre de masse du modèle 3D.

La deuxième façon d'analyser la similarité entre les individus est de décrire le corps humain en tant que volume. Les modèles 3D sont échantillonnés en volumes élémentaires

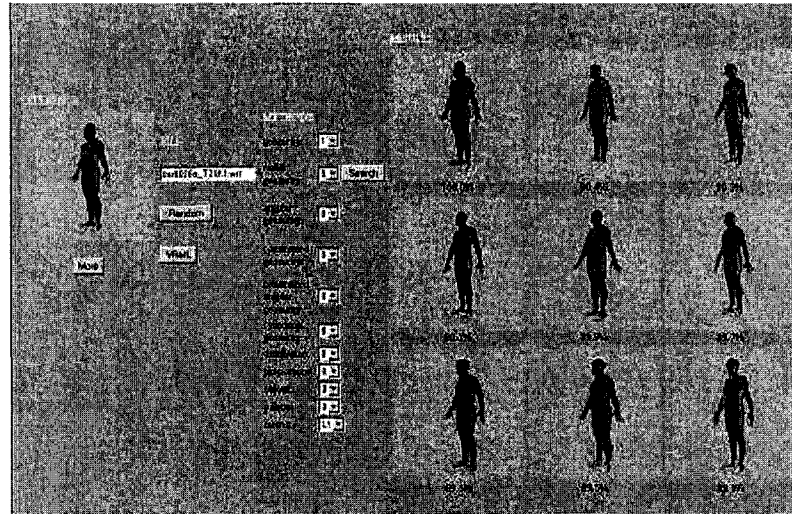


Figure 16 Cleopatra : Outil de recherche dans une base de données anthropométriques 3D [59]

(voxels). Une analyse à multi-résolution est effectuée en appliquant une transformée d'ondelettes [54] sur les voxels. Un histogramme représentant la distribution des modèles 3D de corps humain à différentes résolutions est dressé. Ainsi la forme du corps humain peut être caractérisée par un ensemble d'histogrammes qui occupent un espace mémoire de 200 à 400 octets. Cette description compacte permet de calculer la similarité entre les formes des corps humains dans l'outil de gestion Cleopatra. L'exemple de requête illustré sur la figure 16 montre que cette description permet de discerner des similarités de formes entre différents individus. Toutefois la forme originale du corps humain ne peut être reconstruite à partir de ces descripteurs de formes.

Mochimaru et al. [51] sont parmi les premiers à avoir utilisé des données anthropométriques 3D pour la conception de produits qui assurent une meilleure satisfaction de la clientèle. Leurs travaux ont particulièrement traité la modélisation de pieds pour la fabrication de chaussures [52]. L'approche proposée se base sur un marquage préalable des points de repère anatomique pour produire une représentation homologue des pieds. Cette représentation est constituée d'un ensemble dense de points de surface qui vérifient une relation de correspondance entre les différents sujets. Le pied est traité en tant que cylindre

et découpé en sections qui sont définies par les points de repère anatomiques. Des points de surface homologues sont par la suite générés par échantillonnage des sections.

L'analyse de la variabilité de la forme du pied est basée sur la théorie de la libre déformation de forme introduite dans [71]. Ce concept se base sur la déformation d'un objet par le déplacement d'un ensemble de points de contrôle placés sur un volume qui l'enveloppe. Les points de contrôle sont uniformément distribués selon les trois axes de coordonnées du volume. La dissimilarité entre deux formes de pieds est définie par la somme des déplacements des points de contrôle effectués pour transformer une des formes à l'autre. Après normalisation des longueurs des pieds, la dissimilarité de forme est calculée pour chaque paire de pieds d'un ensemble de 56 sujets. Une mise à l'échelle multidimensionnelle («Multidimensional scaling») est appliquée à la matrice de dissimilarité. Cette technique exploratoire permet de visualiser dans un espace à faible dimension la proximité entre des objets [91]. Le diagramme de dispersion des sujets étudiés selon les deux premiers axes d'un espace quadridimensionnel est illustré dans la figure 17. Le premier axe est éminemment corrélé avec la hauteur du cou-de-pied ainsi qu'avec la hauteur du sphyrion. Ce dernier correspond au plus bas point de la malléole interne (figure 18). Le deuxième axe reflète la proportion entre la partie antérieure et celle postérieure du pied. En effet il est remarquablement corrélé à la longueur de la jonction pied-jambe ainsi qu'à la longueur des orteils. Cette mesure est définie par la distance séparant le point milieu entre le premier et le cinquième métatarsien du bout du plus long orteil (figure 18).

Le calcul de la dissimilarité entre les pieds en utilisant la libre déformation de forme est un processus qui est long et pas tellement utile. En effet, la dissimilarité peut être définie plus simplement par la somme des distances entre les points homologues. D'ailleurs, c'est l'approche que les auteurs ont adopté dans des travaux plus récents [50]. Néanmoins l'usage de la libre déformation de forme pour produire des chaussures de pointures différentes à partir d'une chaussure de référence est une idée intéressante. Mochimaru et al. proposent de déterminer la forme d'un modèle de chaussure pour une pointure plus large et ayant la

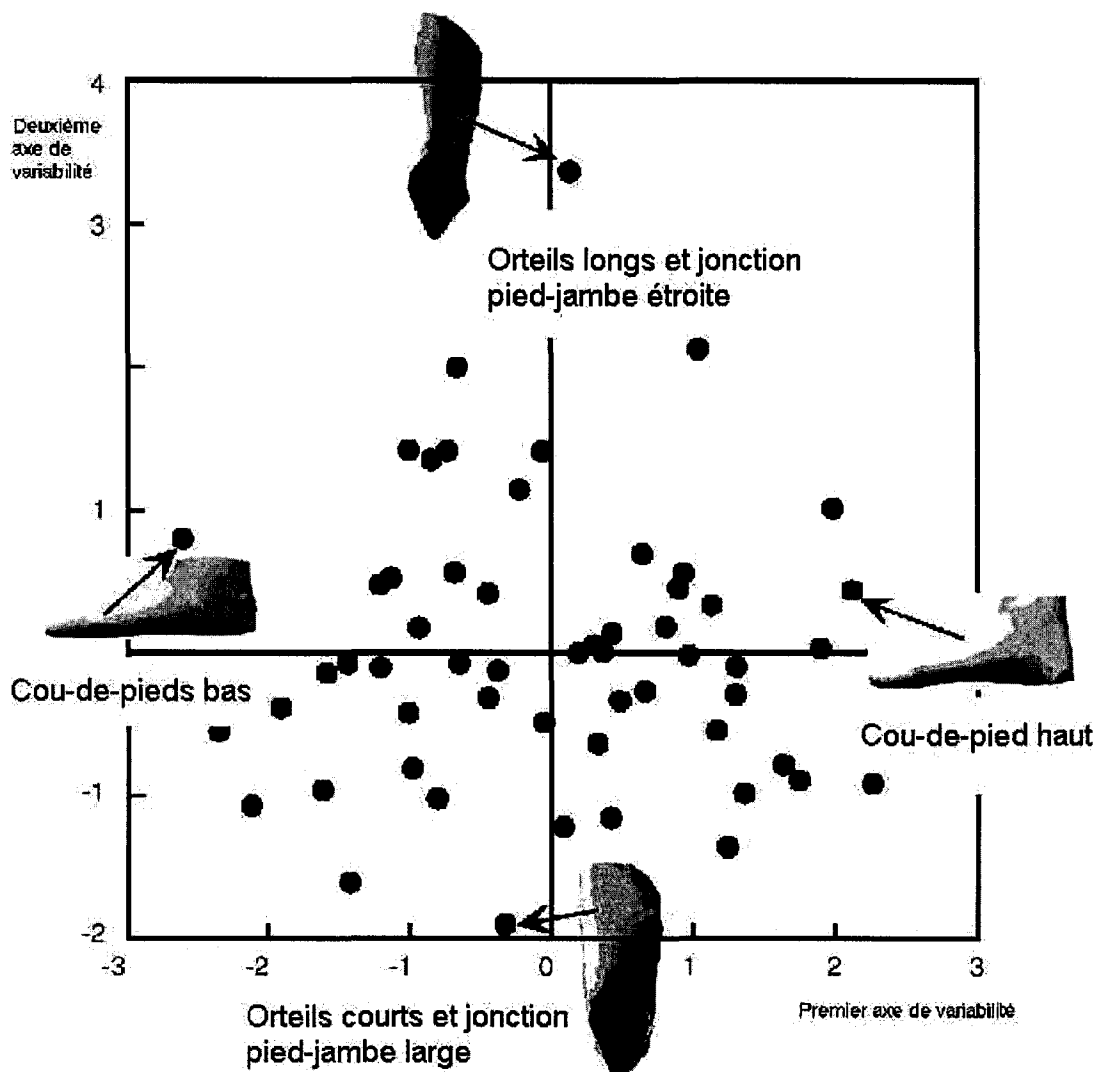


Figure 17 Diagramme de dispersion de pieds selon les deux premiers axes extraits par mise à l'échelle multidimensionnelle [52]

même longueur qu'une chaussure de référence. Deux modèles de pieds correspondant à chacune des pointures sont sélectionnés. Les distorsions des points de contrôle permettant de ramener le modèle de référence au modèle cible sont calculées. Ces distorsions sont par la suite appliquées à la chaussure de référence pour générer la chaussure de pointure requise comme le montre la figure 19. La libre déformation de forme permet de créer des chaussures qui sont plus larges au niveau de l'avant pied qu'au niveau du talon. Ceci re-

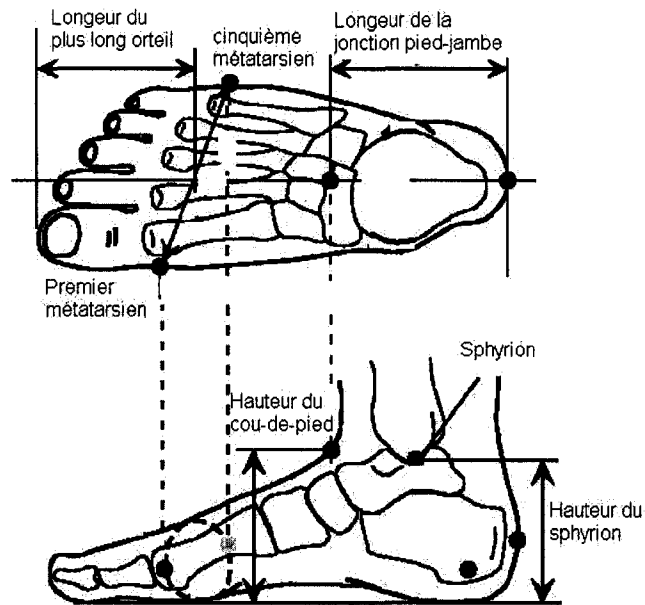


Figure 18 Mesures unidimensionnelles du pied

présente un avantage par rapport aux méthodes conventionnelles où l'augmentation de la largeur d'une chaussure est uniforme tout le long de sa longueur.

La même approche a été utilisée pour la conception de cadres de lunettes [43]. Un modèle 3D homologue de la région du visage qui s'étend d'au-dessus des sourcils jusqu'au-dessous du nez est généré. Une mise à l'échelle multidimensionnelle est appliquée sur les données de 38 sujets pour extraire les premiers axes de variation de la région en question. Les individus sont classifiés en quatre groupes selon leurs projections sur ces axes. La moyenne de chaque groupe est identifiée pour représenter la taille associée à ce groupe. Les résultats d'essayage montrent que les nouveaux cadres exercent moins de pression sur le nez et qu'ils glissent moins que les cadres conçus à partir de mesures anthropométriques traditionnelles.

La détermination d'une représentation homologue est le fondement de l'analyse décrite précédemment. La technique proposée pour générer un modèle homologue pour le pied

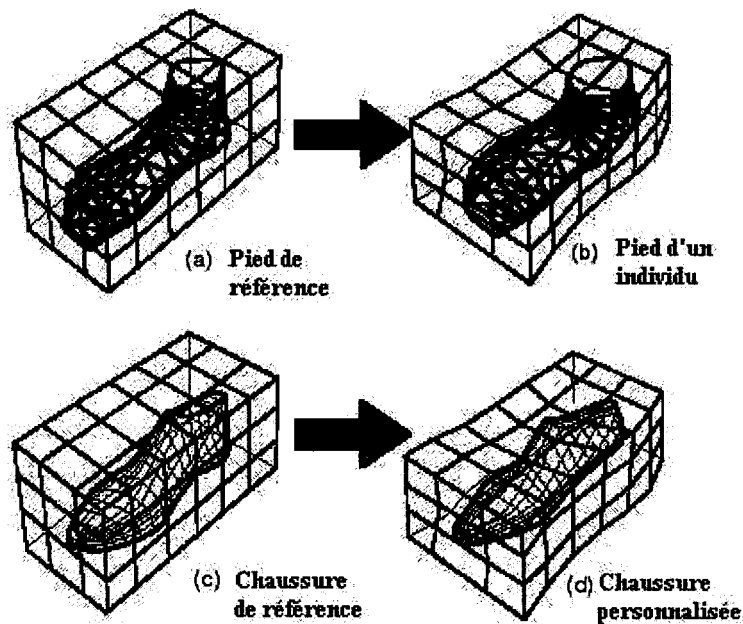


Figure 19 Utilisation de la technique de libre déformation de forme pour générer un modèle de chaussure convenant à un individu à partir d'un modèle conçu pour une forme de pieds de référence [51]

ou le visage se limite à des objets convexes et ne peut être généralisée au corps humain en entier.

La représentation homologue est également utilisée dans d'autres méthodes pour la modélisation de la variation de la forme. L'analyse de composantes principales est généralement appliquée à ces représentations pour extraire les modes principaux de variation de la forme de l'objet étudié. Blanz et al. [12] ont suivi ce principe pour générer des visages virtuels réalistes à partir d'un ensemble de visages numérisés en 3D. Afin d'assurer une correspondance entre les différents modèles, une méthode modifiée du flux optique est appliquée simultanément à la couleur et à la représentation cylindrique des visages.

Un modèle homologue du visage est également défini dans [32]. Un ensemble de points de repère identifiés manuellement sur le visage est utilisé pour définir une correspondance entre les différents modèles.

Tahan et al. [79] utilisent le même principe pour analyser la variation de la forme du torse. L'analyse de composantes principales est appliquée sur un ensemble de torses caractérisés par une représentation canonique. Dans cette représentation tous les torses sont décomposés en un même nombre de tranches horizontales uniformément espacées. Chaque tranche est échantillonnée selon un angle fixe au niveau de la circonférence. Les principaux modes de variation de la forme du torse de 46 femmes sont extraits.

Récemment des méthodes pour déterminer une représentation qui vérifie une correspondance entre les différents modèles du corps humain en entier ont été proposées. Allen et al. [1] se basent sur un modèle artistique du corps humain pour générer une telle représentation. La surface triangulée de ce modèle générique est déformée pour s'ajuster au modèles numérisés. Ainsi, ces derniers seront représentés par les sommets de la surface triangulée obtenus après déformation.

La déformation du modèle générique est guidée par la minimisation de la fonction de coût $E = \alpha E_d + \beta E_s + \gamma E_m$. Le terme E_d représente la distance entre la surface déformée et la surface originale. Le terme E_s correspond à la continuité de la déformation qui force des points voisins à subir des déformations similaires. Le troisième terme est la distance entre les points de repère anatomiques du modèle cible et ceux du modèle générique. La minimisation de cette erreur renforce la correspondance entre les points de surfaces des différents modèles. L'analyse des composantes principales est appliquée à la représentation homologue pour extraire un nombre réduit de composantes qui expliquent une grande proportion de la variabilité de la forme dans l'ensemble de sujets étudiés. Les composantes extraites forment une base orthonormale de l'espace de la forme du corps humain. Chaque modèle est caractérisé par sa projection dans cette espace. La régression linéaire est utilisée pour établir une liaison entre les mesures traditionnelles et les coordonnées de projection des modèles 3D dans l'espace des composantes principales [3]. La figure 20 montre des modèles 3D de corps humain générés à partir d'un modèle moyen par changement des co-

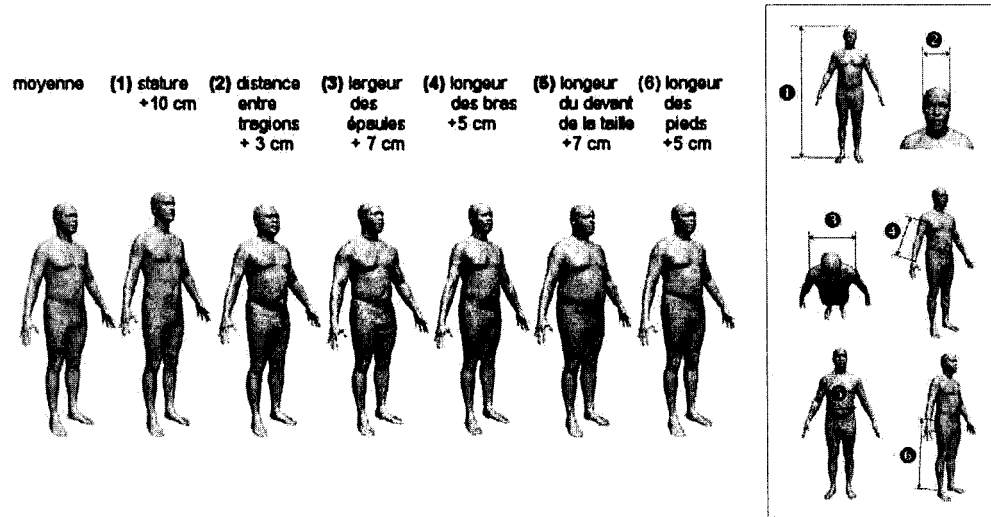


Figure 20 La relation entre les coordonnées dans l'espace des composantes principales et les mesures anthropométriques traditionnelles permet de générer des modèles virtuels de corps humain ayant certaines spécifications anthropométriques [1]

efficents de projection dans la base des vecteurs propres. Ces modèles vérifient différentes spécifications anthropométriques.

Thalman et al. [72] ont développé dans le contexte d'animation graphique, une méthode similaire pour générer des corps humains réalistes vérifiant certaines spécifications anthropométriques. La méthode se base sur un modèle générique pour le squelette et un modèle générique de la surface du corps humain. Dans une première étape, le modèle générique de squelette est déformé pour fournir une approximation de modèles 3D obtenus par numérisation de sujets réels. Cette déformation, qui est rigide, se base sur les positions d'un ensemble de points repère anatomiques qui sont pour la plupart placés manuellement sur les modèles 3D. Le modèle générique de la surface subit ultérieurement des déformations élastiques pour mieux s'ajuster à la forme des modèles 3D numérisés. Ces derniers sont

ainsi caractérisés par les matrices de transformations subies par les joints du modèle générique du squelette ainsi que par le déplacement subi par chaque sommet du modèle générique de surface. Cette représentation assure une correspondance entre les différents modèles. L'analyse en composantes principales est utilisée pour décrire chaque modèle par sa projection dans un espace de dimension réduite. Les fonctions à base radiale («Radial Basis Functions») sont utilisées pour établir une relation entre des mesures anthropométriques traditionnelles et les coordonnées dans l'espace des composantes principales. Cette relation permet de générer de nouveaux modèles 3D vérifiant certaines spécifications anthropométriques.

2.3 Discussion et orientation de nos travaux de recherche

L'anthropométrie tridimensionnelle est un domaine naissant. La revue de la littérature montre que les méthodes développées dans ce cadre sont exploratoires et qu'il n'y a pas encore une façon standard ni de traiter les données ni de valider les résultats obtenus. Ceci rend la problématique abordée très complexe.

Les travaux les plus pertinents qui s'appliquent sur le corps humain en entier ([1] et [72]) se basent sur des points de repères anatomiques qui sont marqués préalablement à la numérisation. Comme expliqué précédemment, le processus de marquage allonge considérablement le temps d'acquisition des données. Par la suite, il engendre une augmentation des coûts des projets de numérisation. C'est pour cela que l'opération de marquage préalable ne sera probablement pas effectuée dans les futurs projets anthropométriques. L'exploration des travaux qui ont traité la localisation de points de repère anatomiques sans marquage préalable montre que cette problématique est loin d'être résolue. Pour cela, le développement de méthodes qui permettent d'exploiter les données anthropométriques 3D sans utilisation des points de repère anatomiques favorisera et facilitera la collecte de données anthropométriques tridimensionnelles.

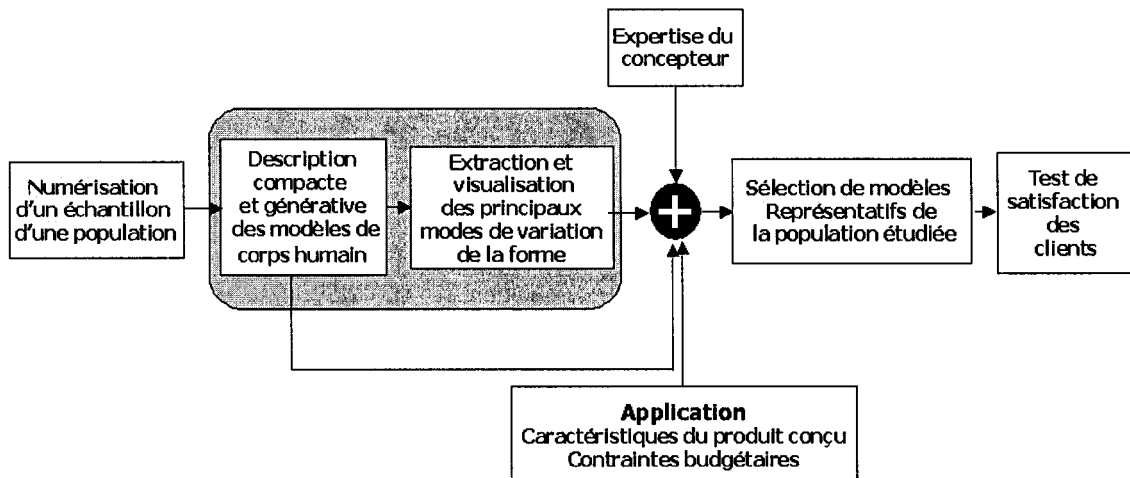


Figure 21 Traitement des données anthropométriques 3D

2.4 Objectifs et hypothèse

Notre objectif global est de développer des outils qui permettent d'aider les concepteurs dans la compréhension de la variabilité de la forme à partir de données anthropométriques 3D.

L'hypothèse de notre travail est que la variabilité de la forme du corps humain peut être analysée sans recours aux points de repère anatomiques.

La solution souhaitable pour aider les concepteurs à concevoir des produits qui conviennent mieux à une population ciblée est un système qui, pour une application donnée, prend en entrée une base de données anthropométriques 3D et fournit en sortie un ensemble de modèles de corps humain qui sont représentatifs de la population ciblée. Afin d'orienter notre travail de recherche, nous présentons notre vision de la structure d'un tel système (Figure 21).

Le développement d'un système complètement automatique est difficile à imaginer dans un futur prochain. C'est pour cela que la structure du système qu'on propose inclut l'expertise du concepteur plutôt que d'essayer de la remplacer par un module automatique.

En fait, il est difficile de quantifier son expertise et il nous paraît plus convenable de lui fournir des outils qui permettent de l'aider dans sa tâche.

Le système inclut un module de conversion des données anthropométriques 3D en une représentation qui soit en même temps compacte et générative de la forme originale. En effet, les modèles de corps humain numérisés sont constitués de centaine de milliers de points de surface, ce qui rend leur utilisation directement pour la comparaison des formes difficile. Pour cette raison, ce module est une composante essentielle pour le système.

La description compacte et générative servira à l'extraction et à la visualisation des principaux modes de variation de la forme humaine. La visualisation de ces modes de variation fournit au concepteur une information palpable concernant la variation de la forme.

La sortie de la chaîne est un ensemble de modèles qui représentent au mieux une population ciblée. Le nombre de ces modèles dépend de la population ainsi que de l'article conçu. En effet l'ajustement d'un article sur un sujet n'est pas aussi critique pour un vêtement large que pour un équipement de travail. Aussi la diversification des tailles est coûteuse, donc le nombre de tailles est influencé par l'aspect financier. Le concepteur est capable de tenir compte de ces aspects et de les combiner avec la visualisation de la variabilité de la forme pour fixer le nombre de modèles représentatifs nécessaire. Ce nombre est par la suite utilisé pour appliquer un regroupement des modèles 3D en se basant sur la description compacte et générative de ces modèles. La validation du processus au complet se mesure par la détermination du taux de satisfaction des clients. Ce taux pourra être déterminé par le nombre d'articles qui n'ont pas été vendus parce qu'ils ne conviennent à personne. La réduction du taux de rejet par rapport à celui obtenue en utilisant les données anthropométriques traditionnelles représente une confirmation des avantages des données anthropométriques 3D et une validation de la méthode de traitement.

Notre travail de recherche n'est pas lié à une application particulière, pour cela nos objectifs spécifiques se rapportent aux modules de développement d'une représentation com-

pacte et générative ainsi qu'à l'extraction et la visualisation des principaux modes de variation de la forme du corps humain.

2.5 Méthodologie

La méthodologie suivie pour aboutir à nos objectifs se résume dans les étapes suivantes :

- Pré-traitement des données :

Cette phase vise à fermer les trous des modèles 3D qui sont dus, entre autres, à l'occlusion de certaines régions durant la numérisation.

Au cours de nos expériences nous traitons uniquement les modèles 3D en posture debout de référence. On propose également d'éliminer les données correspondant aux mains. En effet, les modèles 3D souffrent d'un manque sévère de données au niveau de ces régions. Par la suite, ils ne sont pas suffisants pour analyser la variabilité de la forme des mains. Les expériences réalisés au cours de ce travail se basent sur un ensemble de 300 modèles correspondant à des sujets mâles. Le choix de ces modèles est arbitraire.

- Description compacte et générative des modèles de corps humain : nous avons essayé dans ce cadre deux approches différentes :

- Modélisation du corps humain par des hyperquadriques étendues.

- Description statistique de la forme du corps humain par analyse en composantes principales.

C'est cette dernière approche que nous retenons pour le développement d'une représentation compacte et générative de la forme du corps humain.

- Reconstruction des modèles originaux à partir de la représentation compacte

- Visualisation des principaux modes de variation de la forme au sein de l'ensemble étudié :

- Reconstruction de modèles virtuels par variation des paramètres de la description compacte.

2.6 Conclusion

Ce chapitre résume les techniques de traitement de données anthropométriques tridimensionnelles. Ces techniques se classifient dans deux catégories principales. La première traite de la localisation de points de repère anatomiques et d'extraction de mesures traditionnelles. Les méthodes les plus efficaces dans ce cadre se basent sur le marquage des points de repère préalablement à la numérisation. Cependant l'opération de marquage allonge considérablement le temps d'acquisition des données. Les essais effectués pour localiser les points de repère sans marquage préalable nécessitent d'être améliorés davantage. La deuxième catégorie de méthodes cherche à développer des descripteurs de forme à partir des données 3D plutôt que de les convertir simplement en données anthropométriques traditionnelles. La plupart des approches mentionnées visent à développer une représentation qui vérifie une correspondance entre les différents modèles 3D. Un outil statistique est par la suite appliqué à cette représentation pour analyser la variabilité de la forme du corps humain. Le développement d'une représentation qui établit une correspondance entre les différents modèles exige la connaissance de la localisation de points de repère anatomiques. Ce chapitre se termine par la présentation de notre vision d'une chaîne de traitement de données anthropométriques 3D qui vise à aider les concepteurs à analyser la variabilité de la forme du corps humain au sein d'une population ciblée. Cette chaîne inclut un module de développement d'une description compacte et générative du corps humain ainsi qu'un module d'extraction et de visualisation des principaux modes de variation de la forme du corps humain. Notre travail de recherche se concentre sur le développement de ces modules sans recours aux positions des points de repère anatomiques.

CHAPITRE 3

DESCRIPTION COMPACTE ET GÉNÉRATIVE DES MODÈLES 3D DE CORPS HUMAIN

La numérisation du corps humain en entier fournit une bonne description de sa forme contrairement aux mesures anthropométriques traditionnelles. Toutefois les modèles 3D générés sont constitués de centaines de milliers de polygones, ce qui complique leur utilisation pour l'étude de la variabilité de la forme des individus d'une population donnée. Afin que ces données soient bénéfiques, le développement d'outils permettant de convertir le grand nombre de points numérisés en une représentation exploitable par le concepteur est indispensable. Cette représentation doit rencontrer deux critères. D'une part, elle doit être compacte. D'autre part, elle doit être générative. Ce qui implique qu'elle préserve assez d'information sur la surface du corps humain pour permettre de reconstruire sa forme originale. Ce chapitre présente les différentes approches qu'on a exploré pour développer une représentation compacte et générative de la forme du corps humain.

3.1 Modélisation des modèles humains par des hyperquadriques étendues

Une méthode possible pour caractériser la forme du corps humain par un nombre réduit de coefficients consiste à le modéliser par une fonction implicite. Les paramètres de cette dernière ont le potentiel de fournir une description compacte de la forme du corps humain.

La description des formes géométriques par des fonctions implicites tridimensionnelles est avantageuse pour plusieurs tâches dans les domaines de la vision numérique, de la modélisation et de la reconnaissance d'objets. Plusieurs fonctions implicites ont été proposées pour la représentation des formes. On cite dans ce cadre les fonctions algébriques, les superquadriques et les hyperquadriques. Ces fonctions sont évaluées selon la complexité des formes géométriques qu'elles peuvent représenter. Dans le cas des fonctions algébriques [81] [78] [40], des polynômes d'ordre élevé sont requis pour représenter des objets réels.

Les superquadriques, qui ont été introduites dans le domaine de la vision numérique par Pentland [61], représentent une famille de formes paramétriques qui sont une extension des ellipsoïdes. Les superquadriques permettent la modélisation d'objets qui sont intrinsèquement symétriques. Plusieurs modifications et extensions ont été proposées dans la littérature pour modéliser une plus grande variété d'objets [34]. Les hyperquadriques, qui ont été introduites par Hanson [30] dans le domaine de l'infographie, ont un plus grand pouvoir représentatif que les superquadriques [29] [18] [44]. Ces fonctions représentent des formes volumétriques qui sont délimitées par des polyèdres convexes arbitraires. Toutefois elles ne permettent pas la modélisation de formes ayant des concavités. Ohuchi et al. [58] ont alors proposé les hyperquadriques étendues pour modéliser des concavités que les simples hyperquadriques ne peuvent reconstruire.

Dans cette section, on propose d'explorer la possibilité de modéliser la surface du corps humain par des hyperquadriques étendues [6][7].

3.1.1 Hyperquadriques étendues

Les hyperquadriques étendues sont une généralisation des hyperquadriques. Ces dernières, comme l'indiquent les équations 3.1 et 3.2, consistent à délimiter les surfaces d'objets par N paires de plans parallèles. La généralisation est effectuée en remplaçant les plans par des surfaces paraboliques (équation 3.3 et 3.4), permettant ainsi aux hyperquadriques étendues de modéliser des objets avec des concavités.

$$H(x, y, z) = \sum_{i=1}^N |H_i(x, y, z)|^{\gamma_i} = 1. \quad (3.1)$$

$$H_i(x, y, z) = A_i x + B_i y + C_i z + D_i \quad (3.2)$$

$$H^e(x, y, z) = \sum_{i=1}^N |H_i(x, y, z)|^{\gamma_i} = 1 \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}
H_i^e(x, y, z) &= a_i(m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z)^2 \\
&\quad + b_i(m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z)^2 \\
&\quad + c_i(m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z) + d_i
\end{aligned} \tag{3.4}$$

$$M = [m_{ij}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_{2i} & \sin \theta_{2i} & 0 \\ -\cos \theta_{1i} \sin \theta_{2i} & \cos \theta_{1i} \cos \theta_{2i} & \sin \theta_{1i} \\ -\sin \theta_{1i} \sin \theta_{2i} & \sin \theta_{1i} \cos \theta_{2i} & \cos \theta_{1i} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

θ_{1i} et θ_{2i} sont deux angles de rotation dans la direction de latitude et longitude respectivement. Chaque surface parabolique est caractérisée par 7 paramètres qui sont γ_i , a_i , b_i , c_i , d_i , θ_{1i} et θ_{2i} . Ainsi le nombre total des paramètres d'une hyperquadrique étendue est de $7N$.

Afin de déterminer les paramètres optimaux qui permettent de reconstruire au mieux la forme d'un objet donné, l'algorithme de Levenberg-Marquardt [62] est utilisé pour minimiser la fonction coût définie par l'équation 3.6.

$$E(\Phi) = \sum_{j=1}^{N_d} [d(p_j, H^e(\Phi))]^2 \tag{3.6}$$

N_d est le nombre de points dans le modèle à reconstruire, H^e représente l'hyperquadrique étendue définie par le vecteur de paramètres Φ et $d(p_j, H^e(\Phi))$ représente la distance géométrique séparant un point p_j de la forme décrite par l'hyperquadrique étendue. Cette distance est la distance euclidienne entre p_j et le point le plus proche de la surface comme l'indique l'équation 3.7.

$$d(p, H^e) = \min_{H^e(q)=1} D(p, q) \quad \text{avec} \quad D(p, q) = \|p - q\|. \tag{3.7}$$

Pour résoudre le problème de minimisation sous contrainte de l'équation 3.7, la méthode du multiplicateur de Lagrange est utilisée. La fonction de Lagrange est définie par :

$$L(q, \lambda) = D(p, q)^2 + \lambda(H(q) - 1). \quad (3.8)$$

Le problème d'optimisation sous contrainte de l'équation 3.7 est réduit à la résolution de l'équation : $\nabla L(q^*, \lambda^*) = 0$ par l'algorithme de Newton modifié [62].

L'algorithme de Levenberg est initialisé par un ensemble de paramètres correspondant à un ellipsoïde autour de la forme à modéliser. Afin d'éviter la convergence vers un minimum local, plusieurs itérations de l'algorithme d'optimisation sont effectuées. Les paramètres initiaux de chaque itération correspondent à une perturbation aléatoire de la solution optimale obtenue au cours de l'itération précédente.

3.1.2 Application des hyperquadriques aux modèles de corps humain

La géométrie du corps humain est trop complexe pour être modélisée par une seule hyperquadrique étendue. On procède donc à la modélisation de différents segments du corps humain séparément. Les modèles 3D du corps humain en entier seront alors décrits par l'ensemble des paramètres des hyperquadriques associées à chaque segment du corps.

Un modèle 3D de corps humain qui a été segmenté manuellement à l'aide du logiciel Polyworks d'Innovmetric [33] est utilisé dans les expériences suivantes. La figure 22 représente la reconstruction du torse à partir d'une hyperquadrique étendue constituée de 16 paires de surfaces paraboliques. La reconstruction des jambes droite et gauche à partir d'hyperquadriques de 12 paires de surfaces paraboliques est illustrée à la figure 23. Les résultats montrent que les hyperquadriques étendues, définies par 280 ($=7 * (16 + 12 + 12)$) paramètres, permettent de reconstruire la forme globale des segments du corps humain modélisé (figure 24). Ceci représente une compression importante par rapport aux nombres de polygones (≈ 300000) du modèle original.

La modélisation par des hyperquadriques étendues représente alors une description plus compacte qu'une surface polyédrique. Toutefois cette description ne permet pas de reconstruire les détails de la forme du corps humain. Un nombre plus élevé de surfaces paraboliques est requis pour modéliser plus de détails de la forme, ce qui rend la représentation moins compacte. De plus, la recherche des paramètres optimaux d'hyperquadriques qui s'ajustent aux nuages de points du corps humain est un processus coûteux. En effet, pour les tests effectués, une décimation est appliquée aux modèles 3D du corps humain pour réduire le nombre de triangles. Dans le cas du torse, par exemple, ce nombre est réduit de 176943 à 5918 triangles. En dépit de cette simplification le temps de calcul sur un ordinateur ayant un processeur de 2 GHz et une mémoire vive de 1Go est de l'ordre de 24 heures. Bien qu'une optimisation du code soit encore possible, la réduction du temps de calcul ne sera pas considérable.

Deux autres limitations s'ajoutent pour nous mener à la conclusion que la modélisation du corps humain par des hyperquadriques n'est pas une solution adéquate pour notre problème. D'une part, cette modélisation exige la segmentation automatique du corps humain qui est une tâche complexe comme on l'a mentionné au chapitre 2. D'autre part, l'utilisation des paramètres des hyperquadriques pour comparer les différents modèles de corps humain n'est pas triviale. En effet, il n'y a pas une correspondance directe entre les paramètres d'hyperquadriques étendues qui modélisent différents corps humain.

3.2 Description statistique de la forme du corps humain

La problématique abordée dans ce travail de recherche traite des objets qui font partie d'une même classe. Il est alors plus prometteur de décrire chaque modèle en tant qu'un membre d'une classe plutôt que de le caractériser séparément par une fonction analytique. Un exemple similaire à ce problème est la reconnaissance de visage. Dans ce cadre Kirby et al. [41] ont introduit une technique qui consiste à appliquer une analyse en composantes principales (ACP) sur une base de données constituée d'images de visages afin

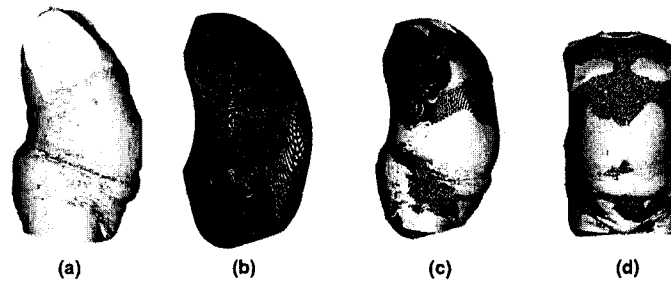


Figure 22 Modélisation du torse par une hyperquadrique étendue de 16 paires de surfaces paraboliques. (a) modèle original, (b) reconstruction à partir d'une hyperquadrique étendue, (c) et (d) différentes vues de la superposition des modèles originaux et reconstruits.

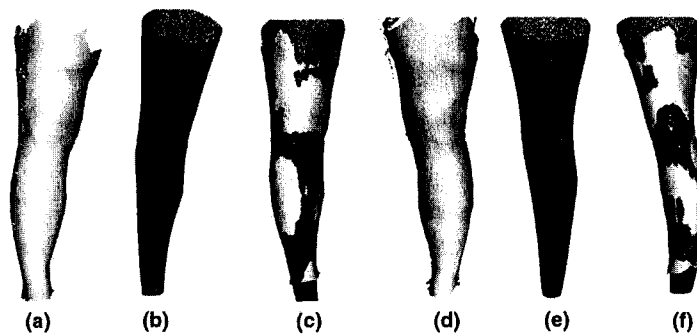


Figure 23 Modélisation des jambes droite et gauche par des hyperquadriques étendues de 12 paires de surfaces paraboliques. (a) et (d) modèles originaux, (b) et (e) reconstruction à partir d'hyperquadriques étendues, (c) et (f) superposition des modèles originaux et reconstruits.

d'en extraire un ensemble de visages fantômes connus sous le nom de «visages propres» (Eigenfaces). Ces visages forment une base orthonormale de l'espace des visages étudié. Ainsi chaque image de visage est représentée par un ensemble de coefficients correspondant à sa projection dans la base des «visages propres». On se propose d'utiliser le même principe pour caractériser les modèles 3D du corps humain.

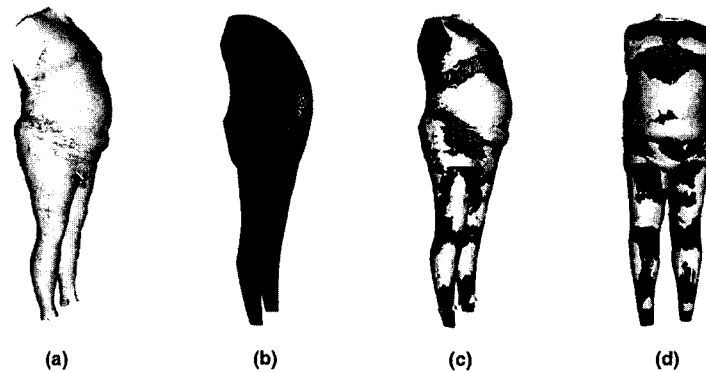


Figure 24 Modélisation du corps humain par un ensemble d'hyperquadriques étendues. (a) modèle original, (b) reconstruction à partir d'hyperquadriques étendues, (c) et (d) différentes vues de la superposition des modèles originaux et reconstruits.

3.2.1 Principe de l'analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales, connue aussi sous le nom de l'expansion de Karhunen-Loève [26], est une technique statistique qui permet de réduire le nombre de variables décrivant un ensemble de données. D'un point de vue géométrique, l'ACP consiste à effectuer une certaine rotation dans l'espace des variables afin d'extraire un nombre réduit de composantes non-corrélées qui couvrent le maximum de la variabilité induite par l'ensemble de données.

L'apport de l'ACP dans ce travail est d'extraire un nombre réduit de composantes qui couvrent au mieux la variabilité de la forme du corps au sein d'une population ciblée.

Supposons que les modèles 3D de corps humain sont représentés par des vecteurs colonnes $\vec{\Psi}_i$ de dimension élevée (n). Supposons aussi qu'il y a une correspondance élément par élément entre ces vecteurs. L'analyse en composantes principales commence par déterminer le modèle de corps humain moyen ($\bar{\Psi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{\Psi}_i$) sur un ensemble de N individus numérisés. Ensuite, les vecteurs $\vec{\Phi}_i$ générés par centralisation des vecteurs $\vec{\Psi}_i$ ($\vec{\Phi}_i = \vec{\Psi}_i - \bar{\Psi}$) sont arrangés dans une matrice $A = [\vec{\Phi}_1 \vec{\Phi}_2 \dots \vec{\Phi}_N]$. Les vecteurs propres

de la matrice de covariance $C = AA^T$, de dimension $n \times n$, forment une base orthonormale qui couvre l'espace de formes humaines contenues dans l'échantillon étudié [45]. La variance induite par chaque vecteur propre \vec{u}_j est égale à sa valeur propre λ_j . Les vecteurs propres sont ordonnés selon l'ordre décroissant de leurs valeurs propres.

Chaque vecteur $\vec{\Phi}_i$ peut être approximé d'une façon optimale, au sens de l'erreur des moindres carrés, comme une combinaison linéaire des vecteurs propres ayant les plus grandes valeurs propres :

$$\vec{\Phi}_i \approx \sum_{j=1}^M c_{ij} \vec{u}_j \quad 0 \leq M \leq n \quad c_{ij} = \vec{\Phi}_i \cdot \vec{u}_j \quad (3.9)$$

Les coefficients de pondération c_{ij} représentent la projection des modèles 3D de corps humain dans la base orthonormale formée par les vecteurs propres.

Le fait que la dimension de la représentation des modèles de corps humain (n) soit très élevée rend le calcul des valeurs et vecteurs propres de la matrice C très coûteux. On peut plutôt déterminer les vecteurs propres \vec{u}'_i et les valeurs propres λ'_i de la matrice C' de dimension $N \times N$ définie comme suit [45] :

$$C' = A^T A \quad (3.10)$$

Cette alternative représente une solution pratique du point de vue calcul. En effet, puisque le nombre de modèles de corps humain (N) est généralement très inférieur à n , il y aura uniquement N valeurs propres non nulles. Ceci implique qu'il y a uniquement N vecteurs propres significatifs. En plus les premiers N valeurs et vecteurs propres de C peuvent être déduit de ceux de C' comme suit :

$$\lambda_i = \lambda'_i \quad \text{et} \quad \vec{u}_i = \vec{u}'_i / \sqrt{\lambda_i} \quad \forall i \in [0, N - 1]$$

La qualité de l'approximation des vecteurs originaux selon l'équation 3.9 est évaluée en fonction de la fraction de la variance contenue dans les M vecteurs propres utilisés dans la reconstruction (équation 3.11).

$$q_M = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (3.11)$$

Chaque modèle de l'ensemble de corps humains étudié peut être ainsi décrit et reconstruit à partir d'un nombre réduit de coefficients correspondant à sa projection dans la base orthonormale formée par les principaux vecteurs propres. Ainsi ces coefficients de projection ont le potentiel de représenter une description compacte et générative des modèles 3D de corps humain.

3.2.2 Mise en correspondance des modèles 3D de corps humain

Dans la section précédente nous avons supposé que les modèles 3D de corps humain sont représentés par des vecteurs ayant la même dimension et qu'il y a une correspondance élément par élément entre ces vecteurs. Cette représentation constitue la clé de l'application de l'ACP. La revue de la littérature montre que les travaux qui ont appliqué l'ACP sur les données anthropométriques 3D ont adopté une représentation surfacique du corps humain. Cette dernière correspond aux coordonnées 3D d'un ensemble dense de points de surface [1] [72]. Comme mentionné au chapitre 2, la mise en correspondance entre les points de surface des différents modèles de corps humain est établie en utilisant une connaissance préalable des positions d'un ensemble de points de repère anatomiques. Dans le cadre de notre travail, nous visons à analyser la variabilité du corps humain sans utilisation d'une telle information. Pour cela, on propose de définir une correspondance par conversion de la représentation surfacique des modèles 3D en une représentation volumétrique. Cette opération, connue sous le nom de voxélisation, convertit généralement des objets géométriques de leur représentation continue en un ensemble de volumes élémentaires appelés

voxels. Ces derniers sont des cubes dont les dimensions définissent le taux d'échantillonnage du processus de voxélisation.

3.2.2.1 Représentations volumétriques

Les premiers algorithmes de voxélisation génèrent une représentation binaire qui associe 1 aux voxels contenant au moins un point de la surface et 0 aux voxels non occupés [38] [39]. Les iso-surfaces extraites des représentations binaires souffrent de recouvrement surtout pour des faibles fréquences d'échantillonnage. Les méthodes de voxélisation qui sont plus récentes visent à éliminer les déformations des surfaces reconstruites. Ces algorithmes se classifient en deux catégories. La première se base sur un filtrage passe-bas [86]. La deuxième catégorie concerne les techniques basées sur des cartes de distances signées [35]. Ces techniques associent à chaque voxel la distance qui sépare son centre du point le plus proche de la surface. Un signe est également attribué aux distances pour distinguer les voxels qui sont à l'intérieur des modèles 3D de ceux qui sont à l'extérieur. La surface des modèles peut être reconstruite à partir de cette représentation volumétrique comme étant une iso-surface correspondant aux distances nulles.

Dans nos premiers essais pour décrire statistiquement la forme du corps humain nous avons utilisé une représentation volumétrique binaire [5] [4]. Cette approche a été par la suite abandonnée puisque l'ACP s'applique généralement sur des données continues, ce qui est une condition non vérifiée par la représentation volumétrique binaire. Afin de satisfaire la condition de continuité nous proposons plutôt d'utiliser une représentation volumétrique qui est basée sur une carte de distances signées [8].

3.2.2.2 Mise en correspondance des modèles 3D par des cartes de distances signées

Afin d'assurer une correspondance entre les individus d'une population donnée, on propose de subdiviser un parallélépipède qui enveloppe tous les modèles 3D en un ensemble de voxels. Pour chaque modèle des distances signées sont attribués à tous les voxels du

parallélépipède. La mise en correspondance entre les différents modèles est assurée en comparant les cartes de distances qui leur sont associées voxel par voxel (figure 25). Cette mise en correspondance des modèles de corps humain représente en fait une approximation d'une correspondance anatomique. Pour illustrer ce fait prenons un exemple d'une vue de coupe de deux objets qui sont représentés par leurs cartes de distances signées (figure 26). L'idée est de montrer que dans le cas où des objets ont des formes similaires et qu'ils sont alignés, leur forme moyenne peut être obtenue approximativement à partir de la moyenne de leurs cartes de distances signées. Dans l'exemple simple de la figure 26 l'ellipse au centre représente la moyenne des deux autres ellipses. Cette courbe peut être également obtenue, en tant qu'iso-surface correspondant aux distances nulles, à partir de la moyenne des cartes de distances signées des deux autres ellipses. Par exemple le centre du voxel v_1 est distant de la grande ellipse de $1,5\text{voxel}$ et il est distant de la petite ellipse de $-1,5\text{voxel}$. La moyenne de ces deux valeurs est zéro ce qui veut dire que ce point doit être localisé sur la moyenne réelle des deux ellipses, ce qui est effectivement le cas. Le centre du voxel v_2 est distant de l'ellipse moyenne de $0,5\text{voxel}$. Cette valeur correspond bien à la moyenne des distances qui séparent ce centre de voxel respectivement de la petite et de la grande ellipse.

Il est certain que la forme du corps humain est plus complexe que les formes de l'exemple abordée dans la figure 26. Toutefois les humains partagent une géométrie et une topologie communes. Ainsi s'ils sont alignés, leur forme moyenne peut être déterminée approximativement à partir de la moyenne des cartes de distances signées.

3.2.2.3 Nécessité de fermer les trous dans les modèles 3D

Les modèles de la base de données CAESAR présentent des trous au niveau de leur surface. Les causes d'apparition de ces trous seront expliquées dans le chapitre suivant. Le remplissage des trous est nécessaire pour le processus de fabrication d'objets à partir de modèles 3D. Puisqu'on assume que les modèles de corps humain seront utilisés pour fa-

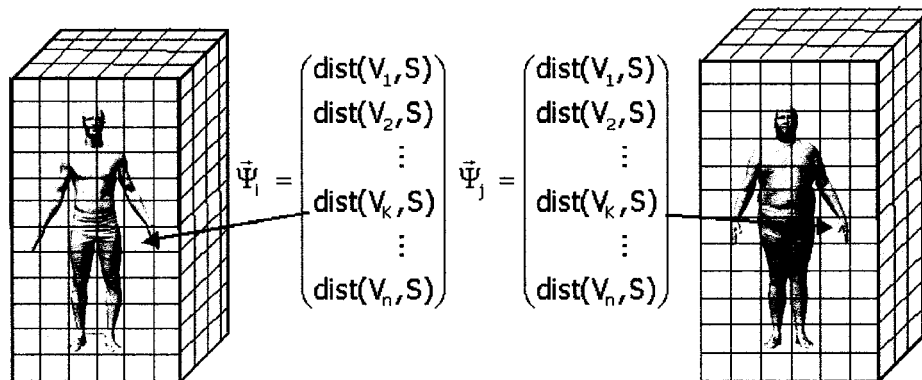


Figure 25 Mise en correspondance des modèles 3D de corps humain en utilisant une représentation volumétrique

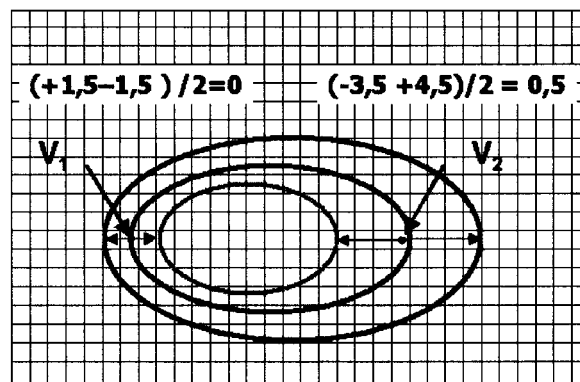


Figure 26 Approximation de la moyenne de la forme d'un ensemble d'objets par la moyenne de leurs cartes de distances signées

briquer des mannequins, il devient utile d'effectuer la phase de remplissage de trous. En plus, le traitement des modèles 3D sans fermeture des trous introduit un bruit dans le calcul des cartes de distances signées. L'exemple de la figure 27 illustre ce fait. Les courbes rouges représentent les régions manquantes. Si les trous ne sont pas remplis, le point le plus proche au centre du voxel marqué sera le point P2. Cependant réellement le point le plus proche au centre du voxel est P1. En plus la classification des voxels comme étant à l'intérieur ou à l'extérieur des modèles de corps humain sera bruitée par les trous. Ceci explique la nécessité de la fermeture des trous avant le calcul des cartes des distances signées.

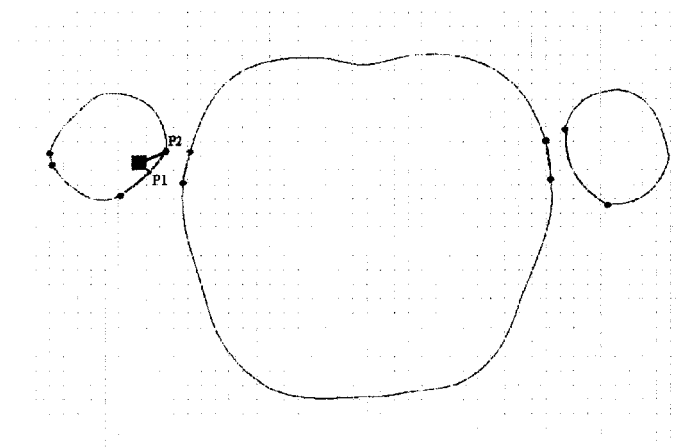


Figure 27 Erreur de calcul des distances au voisinage des trous. Les courbes rouges représentent les données manquantes sur une tranche d'un modèle de corps humain. Le point le plus proche de la surface au voxel marquée est P1. Sans remplissage des trous, le point le plus proche au voxel est le point P2. Le remplissage des trous effectue une approximation de la surface manquante et par la suite réduit l'erreur dans le calcul des distances.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploré les possibilités de développer une représentation compacte et générative de la forme du corps humain. Les résultats ont montré que la modélisation du corps humain par des fonctions implicites analytiques telles que les hyperquadriques étendues est coûteuse de point de vue temps de calcul. De plus un grand nombre de paramètres est requis pour la reconstruction des détails de la forme du corps humain ce qui réduit la compacité de la représentation. Nous proposons plutôt une description statistique de la forme du corps humain par application de l'ACP aux modèles de la base de donnée CAESAR. L'ACP requiert une mise en correspondance des différents modèles. On propose d'assurer cette mise en correspondance en représentant les modèles de corps humain par des cartes de distances signées. Le calcul de ces dernières nécessite le remplissage des trous dans les modèles 3D.

CHAPITRE 4

FERMETURE DES TROUS DANS LES MODÈLES 3D DE CORPS HUMAIN ET CALCUL DES CARTES DE DISTANCES SIGNÉES

Les systèmes de numérisation du corps humain sont conçus de façon à ce qu'ils couvrent le maximum de la surface du corps humain. Ceci n'empêche pas que les modèles 3D générés souffrent généralement d'un manque de données au niveau de certaines régions telles que sous les bras et entre les jambes. Le manque d'information sur la surface introduit un bruit dans le calcul des cartes de distances signées qu'on propose d'utiliser pour représenter les modèles de corps humain. Une phase préliminaire de réparation des modèles 3D de corps humain est alors nécessaire. Au cours de ce chapitre, les causes d'apparition de trous dans les surfaces numérisés sont abordées. La revue des techniques de fermeture des trous dans les modèles 3D est ensuite présentée. Enfin, une description de l'approche que nous proposons pour fermer les trous des modèles de corps humain est fournie. L'algorithme de remplissage de trous proposé intègre également la conversion des modèles 3D en cartes de distances.

4.1 Causes d'apparition de trous dans les modèles 3D

Les systèmes de numérisation 3D ont l'avantage d'acquérir des surfaces d'objets avec une grande résolution. Toutefois, les modèles générés présentent des trous au niveau de certaines régions. En effet, pour reproduire un maillage fermé de la surface, il faut que les rayons de lumière émis par le système de numérisation atteignent toutes les parties de l'objet et que les rayons réfléchis soient observés par ses caméras CCD. Les trous correspondent aux parties de surface qui ne vérifient pas cette condition. Ceci peut être dû à l'occlusion. Pour les modèles de corps humain, ce phénomène est particulièrement observé au niveau des aisselles et entre les jambes (figures 28(a) et 28(b)). Ces parties restent invisibles malgré qu'au cours du projet CAESAR, la configuration du système de numéri-

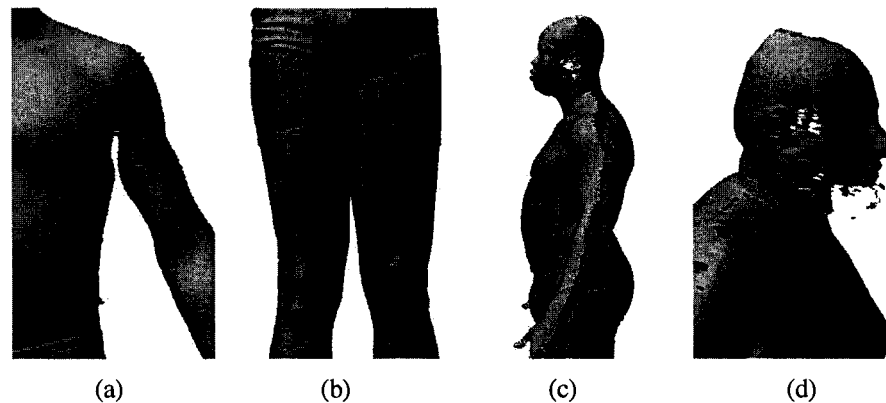


Figure 28 Trous dans les modèles numérisés en 3D. (a) et (b) Trous dus à l'occlusion. (c) Trous dus aux lumières rasantes. (d) Trous dus à la faible réflectivité de la surface à numériser.

sation (figure 29), la posture et l'orientation des sujets à numériser ont été optimisées pour couvrir le maximum de la surface du corps humain [14].

Par ailleurs, dans le cas où les rayons incidents ou réfléchis rasent la surface, les points numérisés sont moins denses comme le montre la figure 30. Ce cas est perçu tout le long des bras, des pieds et au-dessus de la tête (figure 28(c)).

Certains trous s'expliquent par la faible réflectivité de la surface à numériser. Par exemple les cheveux, les poils et les taches de pigmentation absorbent la lumière émise par le système de numérisation, ce qui engendre des trous. Ce fait est illustré à la figure 28(d) où les données correspondant à la barbe sont manquantes.

4.2 Revue de la littérature

La fermeture des trous dans les modèles 3D est une problématique qui a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs dans le domaine graphique. Les méthodes les plus simples de fermeture de maille de surface consistent à générer une triangulation entre les bords des surfaces. Ces méthodes ne sont pas valables dans le cas où la géométrie et la topologie

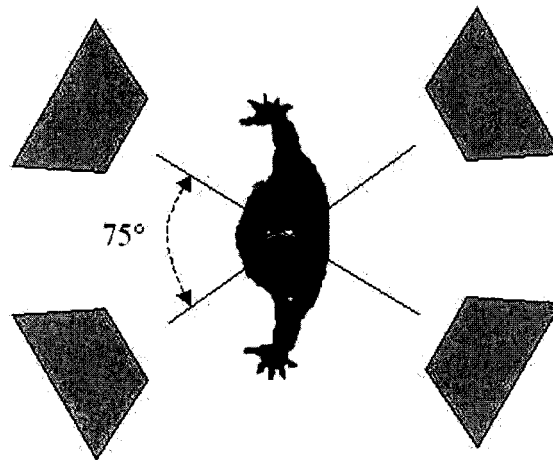


Figure 29 Configuration des quatre capteurs 3D des systèmes de numérisation utilisés dans le projet CAESAR

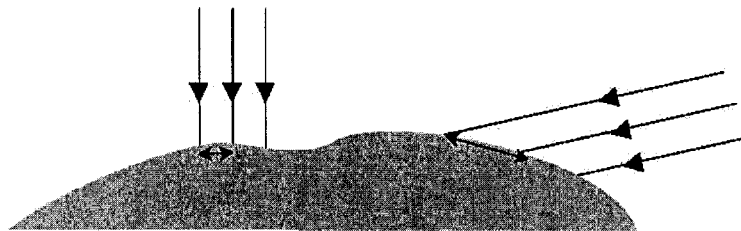


Figure 30 Variation de la densité des points numérisés en fonction des angles que font les rayons de lumière incidents ou réfléchis avec la surface numérisée

des trous sont complexes. Dans le paragraphe qui suit, on s'intéresse aux méthodes qui permettent une fermeture lisse des trous à géométrie complexe.

4.2.1 Techniques générales

Le remplissage des trous des modèles 3D est une problématique complexe. Il n'existe pas d'algorithme qui fonctionne pour tous les cas. Parmi les techniques de fermeture des trous qui donne une approximation qui est visuellement réaliste des régions manquantes pour divers modèles d'objets tridimensionnels, on cite la méthode proposée par Carr et al. [17]. L'idée consiste à utiliser les fonctions à bases radiales pour reconstruire et représenter des

objets 3D. Ces fonctions permettent d'interpoler une surface à partir d'un nuage de points épars, assurant ainsi le remplissage des trous.

Les objets 3D sont modélisés par une fonction implicite f de façon à ce que les points de la surface vérifient $f(x, y, z) = 0$. La fonction implicite choisie est la distance signée entre un point $X = (x, y, z)$ et la surface de l'objet. Afin d'éviter la solution triviale où la fonction f est nulle partout, un ensemble de points en dehors de la surface sont pris en compte. Ces points sont générés d'un côté et de l'autre de la surface tout au long des normales. Le problème de reconstruction de la surface se réduit à trouver une fonction f vérifiant :

$$f(X_i) = \begin{cases} 0 & i = 1, \dots, n & \text{(points de la surface)} \\ d_i & i = n + 1, \dots, N & \text{(points en dehors de la surface)} \end{cases}$$

La fonction $f(X)$ est estimée par un interpolateur $s(X)$ vérifiant :

$$s(X_i) = f_i \quad i=1, \dots, N.$$

Pour assurer la continuité de la surface reconstruite une fonction à base radiale est choisie comme interpolateur :

$$s(X) = p(X) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(X - X_i)$$

Où p est un polynôme de faible degré et ϕ est une fonction radiale.

La reconstruction de la surface se résume à la détermination des coefficients λ_i ainsi que les coefficients du polynôme p par résolution d'un système d'équations linéaires.

Bien que cette méthode permet de remplir la réparation de divers objets 3D, son application aux modèles de corps humain [76] génère des artefacts comme le montre la figure 31. En effet, la méthode est incapable de gérer des grands trous et tend à connecter des



Figure 31 Application des fonctions à base radiale pour la fermeture des trous d'un modèle de corps humain [77]

segments du corps humain au-delà des points de branchement tels qu'entre les jambes et au niveau des aisselles.

Une autre technique qui est reconnue pour la fermeture des trous dans les modèles 3D en général est proposée dans [22]. La méthode se base sur la conversion de la surface des modèles 3D en une représentation volumétrique constituée d'une grille régulière de voxels.

L'algorithme débute par le calcul d'une fonction de distance signée d_s à partir du modèle 3D dont le niveau 0 correspond à la surface. Initialement, la fonction est définie uniquement à proximité de la surface observée. Un coefficient de précision w_s est associé à chaque valeur de distance. Ce coefficient est égal à 1 pour la plupart des régions mais décroît à proximité des trous. Un processus de diffusion est par la suite appliqué pour propager la fonction de distance dans tout le volume. À la fin du processus, les iso-surfaces correspondant aux distances nulles se connectent en fermant ainsi les trous du modèle 3D.

Chaque itération du processus de diffusion est composée de deux étapes. La première consiste à brouiller la distance signée par un filtre passe bas h . La deuxième calcule la nouvelle distance signée d_i comme une somme pondérée de la distance originale d_s et la

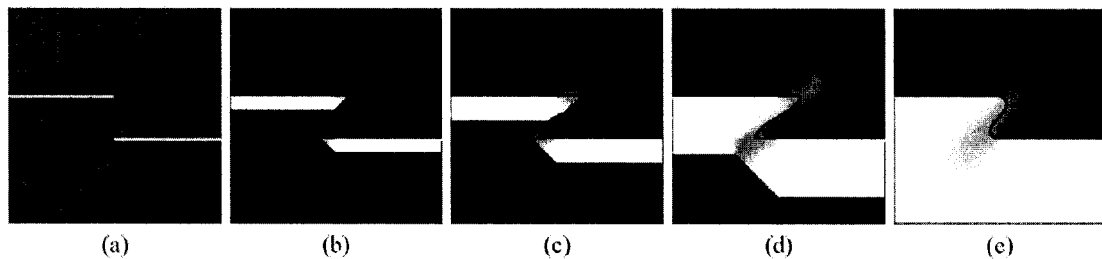


Figure 32 Fermeture des trous en utilisant la diffusion de distance signée dans un exemple 2D [22]

distance brouillée \hat{d}_i . Après chaque itération un champ v_i est calculé pour indiquer la précision à chaque valeur de d_i . L'initialisation du processus est donnée par :

$$(\hat{d}_0, v_0) == \begin{cases} (d_s, 1) & \text{Si } w_s > 1 \\ (d_s, 0) & \text{Sinon} \end{cases}$$

Chaque itération est formulée comme suit :

$$(\hat{d}_i, v_i) = h * (d_{i-1}, v_{i-1}) \quad d_i = wd_s + (1 - w)\hat{d}_i.$$

La figure 32 illustre la réparation d'un trou en utilisant la diffusion de la fonction de distance signée pour des données bidimensionnelles.

L'application de cette approche aux modèles de la base de données CAESAR génère des modèles présentant des artéfacts au niveau des pieds 33. En effet, la méthode essaie de remplir les trous d'une façon continue, ce qui n'est pas adéquat pour ces parties du corps humain. Par ailleurs, elle tend à connecter des segments du corps humain au-delà des points de branchement tels qu'entre les jambes et au niveau des aisselles.

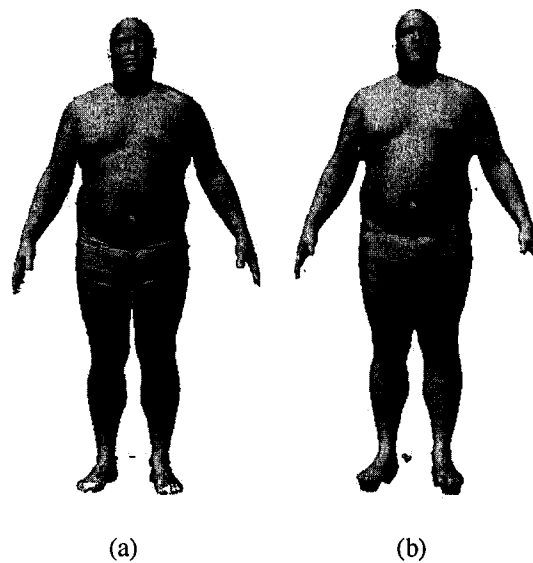


Figure 33 Résultat de fermeture des trous d'un modèle de corps humain en utilisant la diffusion de la distance signée. (a) modèle original. (b) modèle après fermeture des trous : L'algorithme connecte les jambes ainsi que les bras avec le torse. Des artefacts sont générés au niveau des pieds puisque la méthode essaie de remplir les trous d'une façon continue.

4.2.2 Techniques de fermeture des trous pour les modèles de corps humain

La section précédente montre les limites de l'application des techniques générales pour la fermeture des trous des modèles de corps humain. Le développement d'approches qui tiennent compte des connaissances préalables sur la géométrie du corps humain est une alternative prometteuse pour résoudre ce problème. L'approche présentée dans [77] s'inscrit dans ce cadre. Le maillage de la surface est utilisé pour identifier les trous. Ces derniers correspondent aux arêtes qui n'ont qu'un seul polygone incident. Les trous sont ensuite classifiés selon le segment du corps humain auquel ils appartiennent. Une utilisation potentielle de la classification consiste à déformer des modèles génériques des parties manquantes pour les ajuster aux trous. L'application de cette méthode exige la formation d'une base de données de modèles génériques qui tient compte de la variabilité de la forme du corps humain. Cette condition limite l'usage de cette approche vu qu'une telle base de

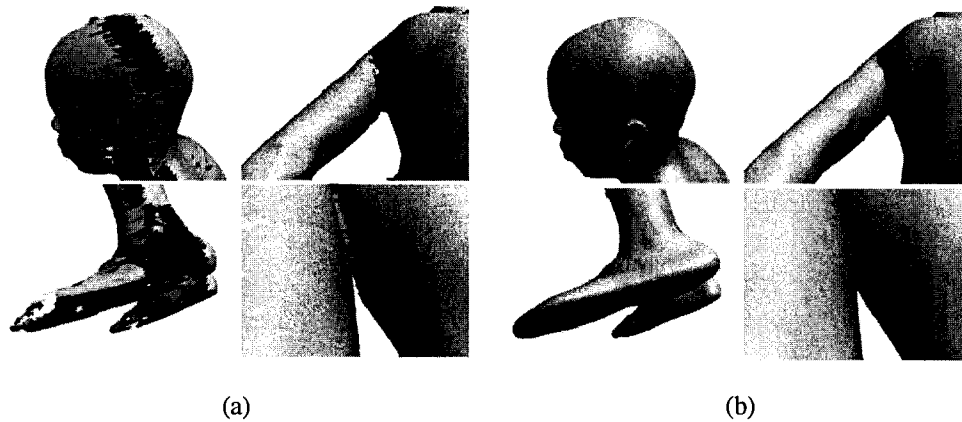


Figure 34 Détails de réparation d'un modèle de corps humain en utilisant la déformation d'un modèle générique [1]. (a) modèle original. (b) modèle après réparation.

données est difficile à générer. Par ailleurs, l'ajustement des modèles génériques de parties du corps humain aux données numérisées n'est pas une tâche évidente.

La méthode proposée dans [1] pour l'exploration de l'espace de la forme humaine inclue une approche qui permet de remplir les trous d'une façon continue et génère une approximation qui est visuellement réaliste des parties du corps humain qui n'ont pas été numérisées. L'idée se base sur un modèle générique du corps humain qui est construit artistiquement et caractérisé par une surface complète sans trous. La déformation de ce modèle générique pour l'ajuster aux modèles numérisés génère des modèles ayant des surfaces complètes. La figure 34 illustre les résultats de la réparation des modèles de la base de données CAESAR en utilisant cette approche.

Comme mentionné à la section 2.2, la déformation du modèle générique est guidée par une connaissance des positions d'un ensemble de points de repère anatomiques. Au cours de ce projet, on vise à analyser la variabilité de la forme du corps humain sans faire appel à une telle information. C'est pour cela qu'on ne peut pas adopter cette méthode et que nous proposons de développer une autre approche pour remplir les trous des modèles 3D.

4.3 Algorithme que nous proposons pour la fermeture des trous des modèles de corps humain

Afin de réparer les modèles de la base de données CAESAR, nous proposons de convertir le problème de remplissage de trous en 3D, en un problème de fermeture de contours en 2D [9]. La méthode se résume globalement à effectuer un découpage des modèles 3D de corps humain en tranches horizontales. Dans un espace 2D, les trous se manifestent par des courbes non-fermées. Le remplissage des trous se réduit alors à l'approximation des données manquantes pour générer des courbes fermées au niveau de chaque tranche. Afin de générer une surface complète, les courbes obtenues sont converties en une représentation volumétrique qui est basée sur une carte de distances signées. Les modèles fermés de corps humain sont par la suite reconstruits en tant qu'iso-surface (correspondant aux distances nulles) à partir de la représentation volumétrique. Ainsi l'algorithme de remplissage de trous proposé a l'avantage de générer à la fois des surfaces complète de corps humain ainsi que leurs représentations volumétriques qui seront utilisées pour le développement d'une description compacte de la forme.

Les différentes étapes de l'algorithme de remplissage des trous sont résumées dans le diagramme illustré à la figure 35. L'approximation des données manquantes au niveau de chaque tranche se base sur les coordonnées des points au voisinage des trous. Afin de minimiser les effets du bruit qui affecte ces données, l'algorithme de réparation débute par une phase de filtrage des modèles 3D.

Le calcul des cartes de distances signées qui seront utilisé pour la mise en correspondance des différents modèles de corps humain est intégré dans l'algorithme de remplissage de trous. Pour cela, ce dernier inclut une phase d'alignement de ces modèles.

L'approche proposée traite les tranches différemment selon qu'elles correspondent aux pieds, aux mains, au haut de la tête ou au reste du corps humain. Par conséquent, une étape de segmentation est effectuée avant le découpage de la surface en tranches horizontales.

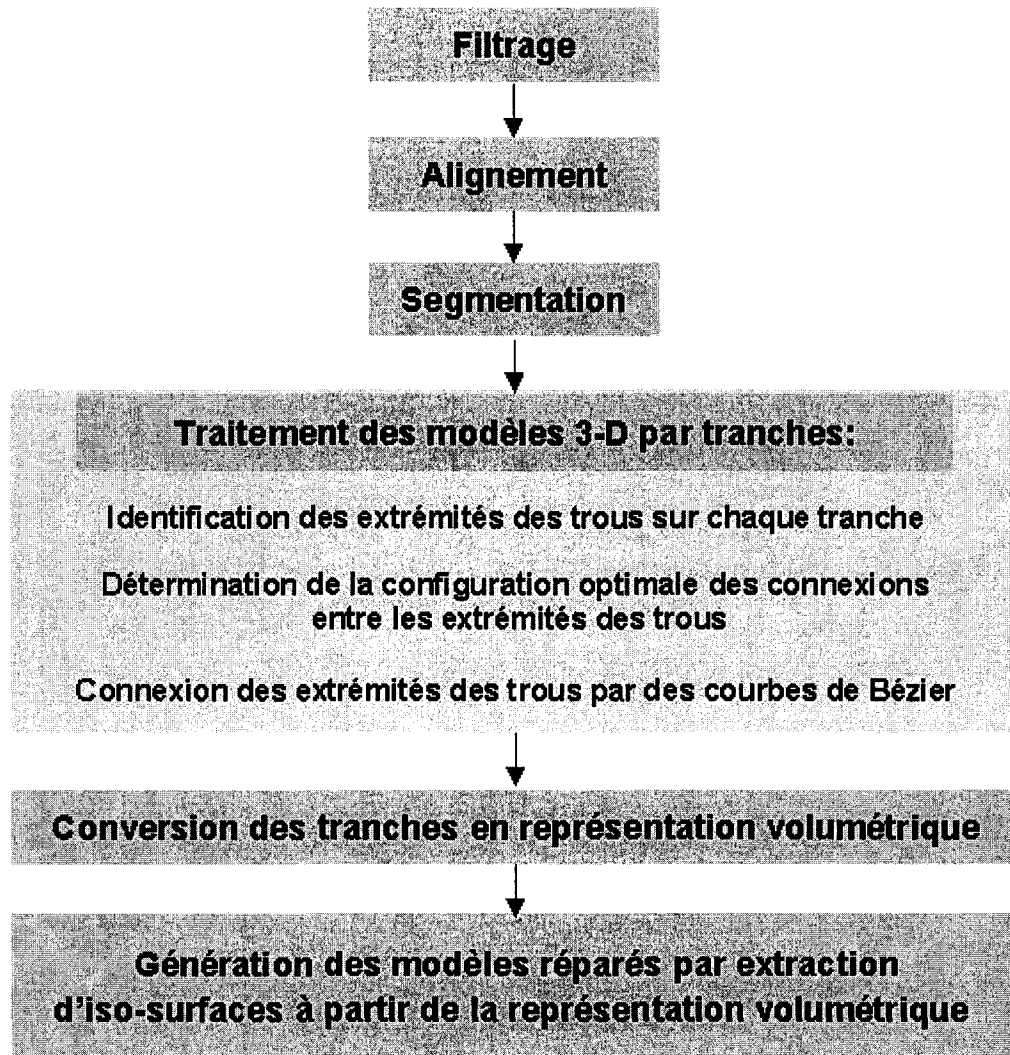


Figure 35 Différentes étapes de l'algorithme de fermeture des trous dans les modèles 3D de corps humain

4.3.1 Filtrage des modèles 3D de corps humain

Les modèles 3D de corps humain sont affectés d'un bruit qui est particulièrement sévère au voisinage des trous. Un filtrage est par conséquent requis pour minimiser les effets de ce bruit sur la fermeture des trous.

Plusieurs techniques de lissage de surfaces polyédriques se basent sur une optimisation non-linéaire [53] [87] [88]. Ce processus est extrêmement coûteux pour des surfaces ayant un grand nombre de sommets tel que les modèles de la base de données CAESAR.

La solution la plus simple de filtrer une surface polyédrique constituée d'un grand nombre de polygones consiste à effectuer un filtrage Laplacien. Ce dernier est un algorithme itératif, où durant une itération, chaque sommet est déplacé vers le barycentre de ses voisins. Cependant ce filtre introduit un rétrécissement de la surface puisque les sommets tendent à converger vers le centre de gravité de la surface originale. Les travaux de Taubin [82] qui se base sur la généralisation de l'analyse de Fourier aux signaux définis par les sommets de surfaces polyédriques permettant de résoudre le problème de rétrécissement tout en ayant une complexité linéaire. Pour ces propriétés, cet algorithme est retenu pour le filtrage des modèles de la base de données CAESAR.

4.3.1.1 Filtre de Taubin

L'algorithme de Taubin consiste à appliquer une approximation d'un filtre passe-bas à un signal de graphe défini par les sommets de surfaces polyédriques. Ce dernier est défini par une matrice $x = (x_1, \dots, x_n)^t$ où chaque ligne x_i représente les coordonnées du sommet i de la surface polyédrique. Le filtre passe bas est formulé comme suit :

$$x' = f(K) x$$

Où $K = I - W$ est une matrice de $n \times n$, I la matrice identité et W une matrice de coefficients de pondération.

Les coefficients de pondération w_{ij} peuvent être choisis de plusieurs façons. Toutefois pour conserver la linéarité de l'algorithme, ces coefficients doivent être indépendants du signal x . Une possibilité consiste à choisir w_{ij} égal à l'inverse du nombre de voisins du sommet i . Ce choix est valable si la longueur des arêtes de la surface polyédrique est assez uniforme. Cette condition est vérifiée pour la base de données CAESAR. En effet,

la moyenne des écarts type des longueurs calculée pour une centaine de modèles est égale à 0,00129 m.

Taubin a obtenu une approximation d'un filtre passe-bas idéal caractérisé par une bande passante k_{pb} par troncation de sa série de Fourier. Les détails de la conception de ce filtre sont présentés dans l'annexe 1. Ce filtre, qui décroît rapidement après la bande passante k_{pb} , est défini par le polynôme d'ordre N suivant :

$$f_N(k) = \omega_0 \frac{(\theta_{pb} + \sigma)}{\pi} T_0(1 - k/2) + \omega_n \sum_{n=1}^N \frac{2 \sin(n\theta_{pb} + \sigma)}{n\pi} T_n(1 - k/2)$$

T_n est le polynôme de Chebyshev d'ordre n [23] défini récursivement comme suit :

$$T_n(w) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ w & n = 1 \\ 2wT_{n-1}(w) - T_{n-2}(w) & n > 1 \end{cases}$$

Le paramètre θ_{pb} vérifie $k_{pb} = 2(1 - \cos(\theta_{pb}))$. Les coefficients ω_n forment une fenêtre pour la troncation de la série de Fourier du filtre passe bas idéal. Plusieurs choix de fenêtres sont possibles :

$$w_n = \begin{cases} 1 & \text{Rectangulaire} \\ 0.5 + 0.5 \cos(n\pi/(N + 1)) & \text{Hanning} \\ 0.54 + 0.46 \cos(n\pi/(N + 1)) & \text{Hamming} \\ 0.42 + 0.5 \cos(n\pi/(N + 1)) + 0.08 \cos(2n\pi/(N + 1)) & \text{Blackman} \end{cases}$$

Le coefficient σ est lié à la largeur du premier lobe de la série de Fourier de la fenêtre utilisée.

4.3.1.2 Application du filtre de Taubin aux modèles 3D de corps humain

Taubin a rapporté que le choix d'une fenêtre de Hamming, d'un nombre d'itérations $N = 20$ et d'un $\sigma = 0,2327$ donne une approximation rapide et efficace d'un filtre passe bas. Taubin propose également que le choix d'une bande passante $k_{pb} = 0,1$ minimise la distorsion des surfaces ayant un grand nombre de sommets en général.

L'algorithme a été appliqué sur 300 modèles de la base CAESAR. La figure 36 illustre un exemple de filtrage d'un modèle de corps humain. La surface du modèle filtré est plus lisse que celle originale. Afin de prouver que ce lissage n'implique pas une distorsion significative de la surface originale, nous proposons de calculer les distributions des distances entre les sommets des modèles filtrés et la surface des modèles originaux à l'aide du logiciel Polyworks d'Innovmetric [33]. Pour l'exemple de la figure 3, la distribution des distances est caractérisée par une moyenne de 0,55mm et un écart type de 0,36mm. Sur l'ensemble des 300 modèles sur lesquelles le filtrage a été appliqué, les moyennes des distributions varient dans l'intervalle [0,4mm, 0,62mm]. Les écarts type des distributions varient dans l'intervalle [0,32mm, 0,4mm]. Ces résultats montrent que le filtrage n'introduit pas une distorsion significative des modèles 3D.

Il est à noter que le filtrage élargit les trous puisque chaque sommet tend à s'approcher de ses voisins. En dépit de l'élargissement des trous, les résultats de réparation des modèles filtrés présentent moins d'artéfacts que dans le cas sans filtrage, comme il sera illustré dans la section 4.3.6.

4.3.2 Alignement

Au cours de la numérisation du corps humain, les positions des pieds sont marquées sur la plate-forme du capteur 3D. Toutefois les différences entre les positions prises par différents sujets à l'intérieur des marques accentuent le désalignement entre les modèles numérisés de corps humain. L'alignement de ces modèles afin de minimiser ce décalage

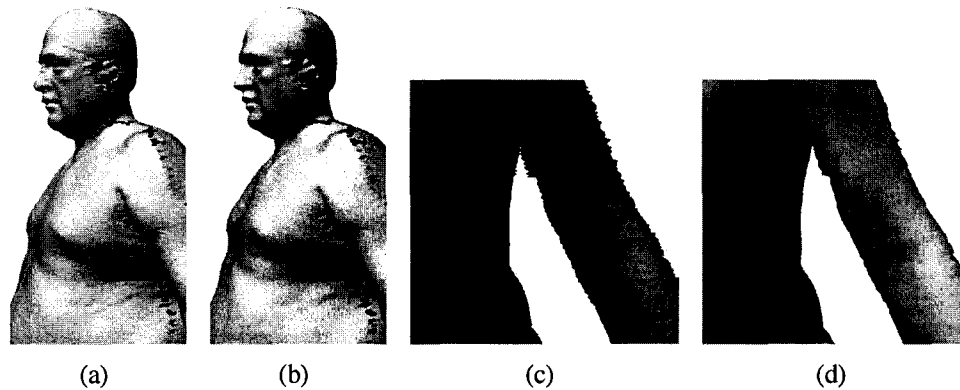


Figure 36 Filtrage de la surface d'un modèle de corps humain par l'algorithme de Taubin. (a) et (c) Modèle original. (b) et (d) Modèle filtré : Le bruit de surface est atténué après filtrage. La distribution de la distance entre le modèle original et le modèle filtré est caractérisée par une valeur moyenne de 0,55mm et d'un écart type de 0,36mm. Ceci prouve que la distorsion de surface est négligeable. Le filtrage introduit un élargissement des trous.

est essentiel pour améliorer la mise en correspondance assurée par la représentation volumétrique de ces modèles.

L'analyse Procrustes généralisée [28] est un outil classique d'alignement d'objets. Le principe de cette méthode consiste à identifier les paramètres des transformations rigides qui minimisent les distances euclidiennes entre différents objets. Afin de calculer les distances, ces derniers sont décrits par une représentation qui vérifie une relation de correspondance entre les objets à aligner. Une telle représentation n'est pas disponible pour les modèles de la base de données CAESAR. Par conséquent ces modèles ne peuvent être alignés en utilisant l'analyse Procrustes.

Le système de coordonnées initial des modèles de la base de données CAESAR est illustré sur la figure 37(a). On se propose d'appliquer une translation aux différents modèles de sorte que leurs centres de gravité soient alignés verticalement. Ces translations compensent le désalignement introduit par les différences des positions des pieds. Les modèles de corps humain étudiés sont caractérisés par une grande densité de points de surface (de l'ordre

de 300 000 polygones). En conséquence, les coordonnées de leur centre de gravité sont estimées par la moyenne des coordonnées des points de surface.

Les modèles 3D sont translatés uniquement selon les axes X et Y . Ainsi l'origine du système de coordonnées change uniquement selon ces deux axes. Le but de ne pas faire coïncider l'origine de l'axe z avec les centres de gravité est de préserver la superposition des modèles au moins au niveau des pieds et des jambes. Ceci améliore la mise en correspondance assurée par la représentation volumétrique des modèles.

On propose également d'appliquer une rotation aux modèles 3D de corps humain afin de les orienter selon leurs directions principales. Dans le cas de la posture étudiée (sujet debout avec bras écartés du torse), les directions principales correspondent à la hauteur (Z), la largeur (Y) et à l'épaisseur du corps (X) (figure 37(b)). Elles sont déterminées comme étant les vecteurs propres de la matrice de covariance des coordonnées (x, y, z) des points de la surface. Cette réorientation du système de coordonnées a pour avantage de réduire le volume du plus petit parallélépipède qui enveloppe les modèles 3D. Ce qui implique une réduction du nombre de voxels requis dans la représentation volumétrique. Par ailleurs la réorientation du système facilite la segmentation des pieds et des mains, comme il sera montré dans la section suivante.

La figure 38 illustre la superposition de deux modèles avant et après translation et rotation. Ce résultat montre que les transformations appliquées réduisent le désalignement entre les différents modèles. Le calcul de la somme des carrés des distances entre les sommets du modèle en bleu et la surface de celui en gris confirme que les modèles sont mieux alignés. En effet, cette somme est réduite de $183,5m^2$ à $39,84m^2$ après rotation et translation des modèles. Nous avons également choisi arbitrairement un modèle de référence à partir de l'ensemble des 300 modèles sur lesquelles nous avons appliqué la phase d'alignement. Les sommes des carrés des distances entre les sommets des différents modèles et la surface du modèle de référence sont évaluées avant et après alignement. Les résultats montrent

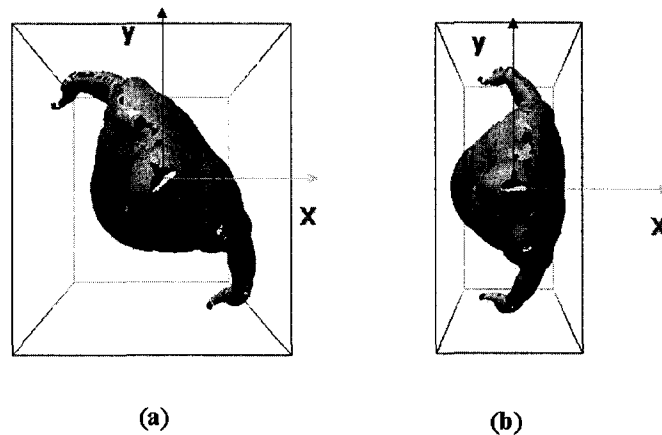


Figure 37 Changement de système de coordonnées. (a) Modèle original. (b) Modèle repositionné.

que la moyenne des sommes est réduite de $266,66m^2$ à $110,19m^2$ et que l'écart type est réduit de $127,27m^2$ à $67,14m^2$. Ceci confirme que la rotation et la translation appliquées aux modèles les rendent mieux alignés.

4.3.3 Segmentation

Le but de cette étape n'est pas d'effectuer une segmentation complète du corps humain mais d'identifier uniquement les données correspondant aux mains, aux pieds et à la tête. Cette identification est utile pour deux raisons. D'une part, les modèles de la base CAESAR manquent de données particulièrement au niveau des mains. L'analyse de la forme de ces dernières exige l'utilisation de capteurs 3D qui permettent de les numériser avec une résolution appropriée et à partir de points de vue adéquats. Bien qu'au cours du projet CAESAR, les individus aient été numérisés à partir de différents points de vue, les surfaces des mains n'ont pas été convenablement couvertes par le système de numérisation. En plus, la résolution de numérisation, qui est de l'ordre de 5mm, ne permet pas d'acquies les détails de la forme des mains. L'information fournie par le projet CAESAR est par conséquent insuffisante pour étudier la variabilité de la forme des mains. C'est pour cela qu'au cours de cette étude on se propose d'éliminer les points de surface correspondant

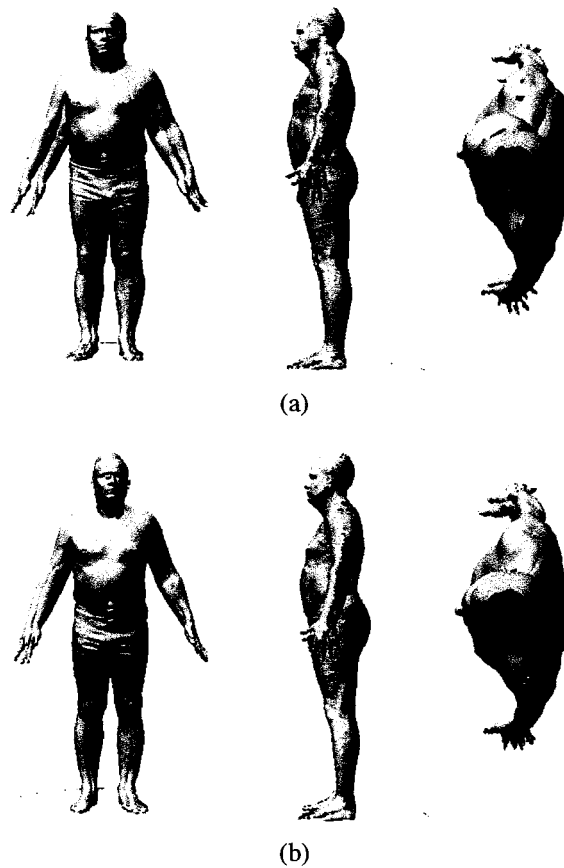


Figure 38 Aligment des modèles de la base de données CAESAR. (a) Différentes vues de la superposition de deux modèles avant aligment. (b) Différentes vues de la superposition de deux modèles après aligment.

aux mains. D'ailleurs, dans le processus de réparation des modèles de corps humain par déformation d'un modèle générique [1], les données correspondant aux mains sont négligées. C'est pour cela que les mains des modèles réparés ont une forme très similaire à celle du modèle générique comme le montre la figure 39.

D'autre part, l'algorithme de remplissage de trous que l'on propose traite les données selon le segment du corps humain auquel elles appartiennent. En effet les régions qui présentent des points de branchement telles que celles au-dessus des aisselles et entre les jambes sont délicates à traiter. Leur réparation doit être effectuée selon des critères qui défavorisent la connexion de parties du corps humain au-delà des points de branchement. Ce critère

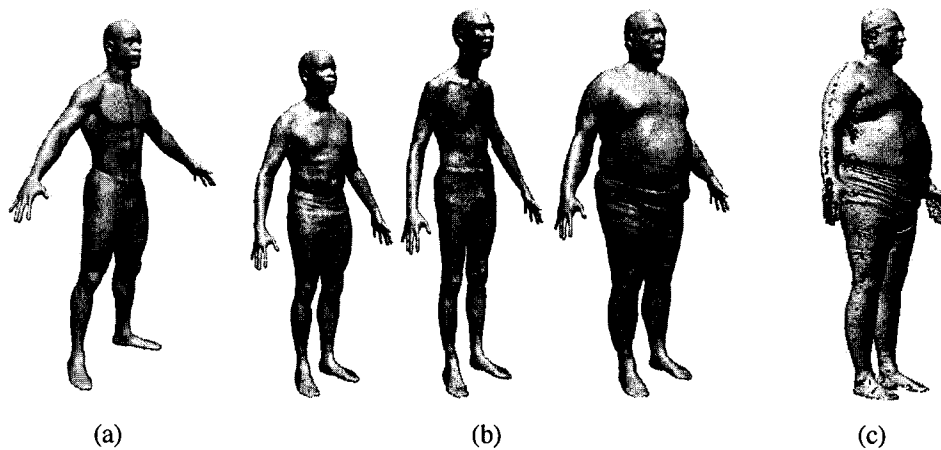


Figure 39 Réparation des modèles de corps humain par déformation d'un modèle générique [1]. (a) Modèle générique. (b) Modèles réparés : Les formes des mains sont similaires à celles du modèle générique car les données correspondant aux mains sont négligées au cours du processus de déformation. (c) Modèle original : On remarque que la forme originale des mains est différente de celle obtenue après réparation.

est applicable pour le reste du corps humain à l'exception des pieds et de la tête. En effet certaines parties de ces segments (orteils et oreilles) sont constitués de fragments épars dans les modèles de la base de données CAESAR. La reconstruction de ces détails est presque impossible. Le meilleur qu'on puisse attendre de l'algorithme de réparation est de générer une surface étanche même si elle ne correspond pas à la forme naturelle de ces parties du corps humain. Il est alors plus adéquat de réparer les pieds et la tête en tant qu'objets cylindriques.

La segmentation est facilitée par la réorientation des modèles 3D selon leurs directions principales (section 4.3.2).

Les points de surfaces correspondant à chaque pied sont délimités par deux parallélépipèdes tel que proposé dans [77]. Ces cases sont localisées de part et d'autre du plan (X, Z) comme le montre la figure 40. Les dimensions des parallélépipèdes sont choisies pour convenir à tous les modèles. Par exemple, le parallélépipède représentant le pied droit

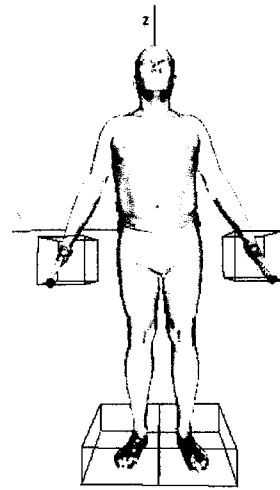


Figure 40 Segmentation des mains et des pieds

vérifie les conditions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \textit{Minimum}(x) = -0,3 \text{ m.} \\ \textit{Maximum}(x) = +0,3 \text{ m.} \\ \textit{Minimum}(y) = 0 \\ \textit{Maximum}(y) = +0,3 \text{ m.} \\ \textit{Minimum}(z) = z_{\text{min}} \text{ (la valeur minimale de } z \text{ pour tout le modèle).} \\ \textit{Maximum}(z) = z_{\text{min}} + 0,075 \text{ stature.} \end{array} \right.$$

La tête est identifiée approximativement par les points ayant des valeurs de la coordonnée z qui sont supérieures à un seuil z_{tte} . En effet, notre but n'est pas de segmenter exactement la tête mais de s'assurer que la partie au niveau des oreilles et traitée différemment du reste du corps. Pour les expériences qui suivent z_{tte} est égale à 85% de la stature.

La localisation des mains commence par l'identification des bouts des majeurs ($ma_{j\text{droit}}$ et $ma_{j\text{gauche}}$). Selon la posture et le système de coordonnées utilisés, ces points correspondent généralement aux extremums de la coordonnée y ($P_{y\text{min}}$ et $P_{y\text{max}}$). Certains sujets tendent à tenir leurs doigts légèrement tournés vers l'intérieur. Dans ce cas y_{min} et

y_{max} ne correspondent pas aux bouts des majeurs. Ces derniers sont alors identifiés par les points ayant le minimum de la coordonnée z aux voisinages de P_{ymin} et P_{ymax} . Les bouts des majeurs (maj_{droit} et maj_{gauche}) servent à définir deux parallélépipèdes qui délimitent les points de surface des mains. Par exemple, le parallélépipède correspondant à la main droite est défini par :

$$\left\{ \begin{array}{l} Minimum(x) = maj_{droit}(x) - 0,1 . \\ Maximum(x) = maj_{droit}(x) + 0,1 . \\ Minimum(y) = maj_{droit}(y). \\ Maximum(y) = maj_{droit}(y) + 0,15. \\ Minimum(z) = maj_{droit}(z). \\ Maximum(z) = maj_{droit}(z) + 0,2. \end{array} \right.$$

4.3.4 Traitement des modèles 3D par tranche

Afin de simplifier le remplissage des trous des modèles 3D, on propose de le traiter comme un problème de réparation de courbes 2-D. Pour cela, les modèles 3D de corps humains sont découpés en tranches horizontales.

4.3.4.1 Conversion de la surface des modèles 3D en tranches horizontales

Afin de convertir les modèles 3D en tranches, les intersections d'un ensemble de plans horizontaux avec les arêtes des triangles de la surface sont calculées. Ces plans sont régulièrement espacés. Les points d'intersection qui appartiennent au même triangle sont connectés par un segment de droite. Les points qui sont connectés au plus à un autre point de la tranche représentent les extrémités des trous. La réparation des modèles consiste à connecter ces points entre eux afin de générer des tranches qui sont constituées de courbes fermées. Il est à noter que pour les tranches au niveau des pieds, les points correspondant à chacun des pieds sont traités séparément.

4.3.4.2 Détermination de la configuration optimale des connexions entre les points correspondant aux extrémités des trous

Soit \mathcal{P}_k l'ensemble des points correspondant aux extrémités des trous de la tranche k . L'étape qui suit la conversion des modèles 3D en tranches consiste à déterminer une configuration optimale des connexions entre les points de chaque ensemble \mathcal{P}_k . Pour réaliser cette tâche, deux critères principaux sont adoptés. Le premier vise à connecter les points qui sont proches. Le deuxième a pour but de préserver la courbure des données mesurées en privilégiant la connexion des points dont les orientations des normales sont similaires. Ce dernier critère pénalise la génération de liens entre les segments du corps humain au-delà des points de branchement. Les deux critères sont exprimés par une fonction de coût C_k . Deux expressions de la fonction de coût sont utilisées pour distinguer les tranches correspondant aux pieds, ou à la tête, de ceux correspondant au reste du corps.

Le coût de connecter des points appartenant aux pieds ou à la tête est donné par :

$$C_k = \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}_k} \{ \|p_i - p_j\| + (1 - \cos(\vec{n}_i, \vec{n}_j)) \} \quad (4.1)$$

Où p_i et \vec{n}_i représentent respectivement la position du point i et la normale à la surface qui lui est associée.

Le coût de connecter des points appartenant au reste du corps est :

$$C_k = \sum_{(i,j) \in \mathcal{P}_k} \{ \|p_i - p_j\| * (1 - \cos(\vec{n}_i, \vec{n}_j)) \} \quad (4.2)$$

La deuxième fonction accorde plus d'importance à la similarité entre les orientations des normales aux surfaces. En effet le coût de connecter deux points ayant la même orientation de la normale est nul même s'ils sont très distants. Cette fonction pénalise la connexion des parties du corps humain au-delà des points de branchement. Ce cas se présente entre

le torse et les bras en dessous des aisselles ainsi qu'entre les jambes en dessous de l'aine. Quant à la fonction de l'équation 4.1, elle donne une importance similaire au critère de proximité et à celui de la similarité entre les orientations des normales aux surfaces. Cette fonction est plus adéquate pour des objets cylindriques comme les pieds et la tête.

La recherche de la configuration optimale se fait dans un domaine de connexions valides qui sont sujettes aux conditions suivantes :

- La distances entre deux points à connecter ne dépasse pas une distance maximale $dist_{max}$. La valeur de cette dernière dépend de la position de la tranche puisque la largeur des trous dépend de la partie du corps humain dont ils font partie. Les valeurs suivantes, qu'on a déterminé empiriquement, ont été utilisées pour les modèles de la base de données CAESAR :

$$dist_{max} = \begin{cases} 10 \text{ cm} & \text{pour la tête.} \\ 30 \text{ cm} & \text{pour les pieds.} \\ 20 \text{ cm} & \text{pour le reste du corps.} \end{cases}$$

- Un segment liant deux points à connecter ne doit pas couper ni un segment original de la tranche ni un segment qui va potentiellement connecter deux autres points.
- Tous les points doivent être connectés.
- Deux points ne peuvent pas être doublement connectés.
- Certains points de \mathcal{P}_k sont déjà liés par une chaîne de segments de droite. Ces points ne peuvent être reconnectés que si la courbure de la chaîne de segments les connectant présente une certaine courbure. Nous proposons de déterminer une mesure C_{min} qui nous donne une indication sur la courbure de la chaîne. C_{min} représente la moyenne des distances qui séparent les points de la chaîne à un segment liant les deux points qu'on cherche à connecter. Plus C_{min} est élevée, plus la chaîne est courbée. La valeur de C_{min} dépend de la localisation de la tranche. En effet, la surface des pieds est caractérisée par une faible courbure par rapport au reste du

corps. Les valeurs suivantes qu'on a déterminé empiriquement sont adoptées pour les modèles de la base de données CAESAR :

$$curv_{lim} = \begin{cases} 2,5 \text{ cm} & \text{pour les pieds.} \\ 5 \text{ cm} & \text{pour le reste du corps.} \end{cases}$$

La recherche de la solution optimale se fait par évaluation de la fonction coût pour toutes les connexions valides. La complexité de cet algorithme est $O(n!)$. Ce qui fait qu'il devient trop long à partir d'un certain nombre N de points qu'on cherche à connecter. L'application de notre algorithme sur les modèles de la base de données CAESAR montre que le temps de calcul de l'algorithme de remplissage de trous est inférieur à 15 minutes si N ne dépasse pas 17 pour toutes les tranches. Dans le cas contraire le temps de calcul peut dépasser une heure selon les cas. Afin d'éviter d'évaluer la fonction coût pour toutes les connexions valides, nous proposons de déterminer une matrice S de dimension $N \times N$ dont l'élément S_{ij} représentent le point p_j qui est le plus proche du point p_i selon le critère suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour les pieds et la tête :} \\ \|p_i - p_j\| + (1 - \cos(\vec{n}_i, \vec{n}_j)) = \min_{p_l \neq p_i} (\|p_i - p_l\| + (1 - \cos(\vec{n}_i, \vec{n}_l))) \\ \text{Pour le reste du corps :} \\ \|p_i - p_j\| * (1 - \cos(\vec{n}_i, \vec{n}_j)) = \min_{p_l \neq p_i} (\|p_i - p_l\| * (1 - \cos(\vec{n}_i, \vec{n}_l))) \end{array} \right.$$

Deux points p_i et p_j seront connectés si $S_{ij} = S_{ji}$. Les points qui ne vérifient pas cette condition seront connectés par l'exploration de toutes les connexions valides dans l'ensemble réduit des points non connectés. Si le nombre de points de cet ensemble est encore supérieur à 17, le remplissage des trous au niveau de la tranche sera assuré au cours de la phase de conversion des tranches en représentation volumétrique (section 4.3.5).

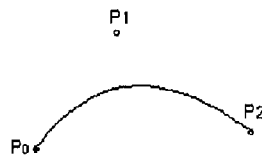


Figure 41 Courbe de Bézier du second ordre

4.3.4.3 Connexion des extrémités des trous par des courbes de Bézier

Après identification de la configuration optimale des connexions, les points correspondant aux extrémités des trous doivent être reliés par des courbes pour former des tranches complètes.

Les segments de droites représentent les courbes les plus simples à utiliser pour connecter les points. Ils donnent un résultat satisfaisant si les points sont très proches. Dans le cas contraire, les segments de droites ne présentent pas une bonne approximation des parties manquantes du corps humain. Des courbes de Bézier du second ordre [16] représentent une alternative simple qui offre une meilleure reconstruction de la forme humaine (figure 41). Ces courbes paramétriques sont définies par :

$$c(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u)P_i \quad 0 \leq u \leq 1$$

Où u est la variable paramétrique de la courbe, $B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!}u^i(1-u)^{n-i}$ représentent les polynômes de Bernstein d'ordre n [48] et P_i sont les points de contrôle des courbes.

La génération d'une courbe de Bézier du second ordre nécessite trois points de contrôle. Le premier et le troisième point (P_1 et P_3) correspondent aux deux points à connecter. Le deuxième point de contrôle P_2 est choisi comme l'intersection des tangentes à la surface au niveau de P_1 et P_3 . Les tangentes sont estimées en calculant les perpendiculaires aux normales à la surface aux niveaux des points à connecter. Le filtrage de la surface évoqué

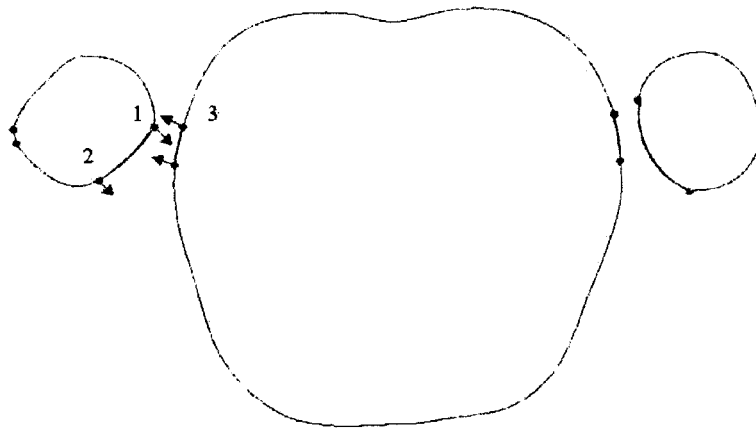


Figure 42 Réparation d'une tranche horizontale au-dessous des aisselles d'un modèle de corps humain. Les points verts représentent les extrémités des trous. Les flèches indiquent l'orientation des normales à la surface. Le critère de similarité entre les orientations des normales aux surfaces favorise la connexion du point 1 au point 2 empêchant ainsi joindre le bras au torse au-dessous du point de branchement. Les courbes rouges représentent l'approximation des données manquantes par des courbes de Bézier.

précédemment est souvent indispensable pour cette étape. En effet, le filtrage minimise le bruit dans l'orientation des normales et par la suite améliore l'approximation de la surface.

Dans certains cas, le filtrage n'est pas suffisant pour éliminer le bruit présent dans la position des points à connecter, ce qui influence l'estimation des tangentes. Ainsi le point P_2 calculé peut être très loin de P_1 et P_3 , ce qui génère des courbes distordues. Dans ce cas, on propose de remplacer P_2 par le point $P'_2 = \frac{P_2 + ((P_1 + P_3)/2)}{2}$.

Si deux courbes de Bézier de la même tranche se coupent, la détermination de la configuration optimale est répétée pour chercher des connexions qui ne génèrent pas des intersections. Les courbes de Béziens sont par la suite échantillonnées pour générer un ensemble de segments de droites. Ainsi à ce stade, chaque tranche est constituée d'un ensemble de segments connectés à l'exception de celles où une configuration valide des connexions n'a pas été déterminée.

La figure 42 illustre un exemple de réparation d'une tranche située au-dessous des aisselles. Les points verts correspondent aux extrémités des trous. Les flèches indiquent l'orientation des normales à la surface. L'utilisation de la fonction coût définie par l'équation 4.2 empêche de connecter le point 1 au point 3 même s'il lui est plus proche que le point 2. Une telle connexion aurait relié les bras au torse au-dessous des points de branchement. Les courbes rouges représentent l'approximation des données manquantes par des courbes de Bézier. On remarque que ces dernières préservent la continuité des courbes de la tranche.

4.3.5 Représentation volumétrique basée sur les cartes de distances signées

Après la phase de fermeture de contours en 2D, les tranches des modèles 3D sont converties en une représentation volumétrique basée sur des cartes de distances signées. Pour cela un parallélépipède qui enveloppe les modèles 3D de corps humain est subdivisé en un ensemble de voxels. La voxelization basée sur la distance signée est constituée de deux étapes. La première consiste à classifier les voxels en deux groupes selon qu'ils sont à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface des modèles 3D. Au cours de la deuxième étape, la distance signée séparant chaque voxel du point de la surface le plus proche est calculée.

4.3.5.1 Classification des voxels

Pour les modèles 3D qui constituent une variété topologique, autrement dit, le voisinage de chaque point de surface peut être déformé d'une façon continue à un disque, la classification est assez simple. En effet, chaque voxel peut être classifié selon le nombre de fois qu'un rayon projeté à partir de son centre traverse les polygones du modèle. Un nombre pair d'intersections correspond à un voxel à l'extérieur de la surface et un nombre impair correspond à un voxel à l'intérieur.

À ce stade du traitement, les modèles 3D sont représentés par des tranches horizontales formées de segments de droite. La classification des voxels s'appuie alors sur l'intersec-

tion des rayons issus du centre des voxels avec les segments des tranches. Dans le cas où ces dernières ont été proprement réparées au cours de la phase décrite dans la section 4.3.4, chaque voxel peut être classifié selon la parité du nombre d'intersections d'un seul rayon. Cependant ce critère entraîne une classification erronée si les trous de la tranche ne sont pas proprement fermés. Pour résoudre ce problème, on propose de projeter des rayons ayant des orientations différentes à partir du centre de chaque voxel. Un vote pour la classification du voxel est émis pour chaque direction. La classification finale correspond au vote majoritaire. Cette approche a été proposée dans [55] pour la réparation des modèles 3D de manière générale. En effet la bonne classification des voxels permet d'extraire une iso-surface fermée à partir d'une représentation volumétrique. La réparation des modèles de la base de données CAESAR, en utilisant uniquement cette méthode, n'assure pas une approximation adéquate des parties du corps surtout pour celles courbées tel qu'au niveau des aisselles. Cependant, il est intéressant d'utiliser plusieurs orientations pour minimiser les erreurs de classification des voxels dans le cas des tranches où l'algorithme de fermeture de contour (section 4.3.4) a échoué de trouver une configuration valide pour connecter les extrémités des trous.

Les axes utilisés dans notre application sont colinéaires au plan des tranches. La classification de chaque voxel en calculant les intersections de plusieurs rayons avec la surface du modèle est un processus coûteux. Pour cela, chaque orientation est représentée par un ensemble de rayons parallèles. Ces rayons votent pour la classification de tous les voxels qu'ils traversent. Pour chaque rayon, les points d'intersection avec les segments sont mémorisés. Un vote pour la classification d'un voxel est effectué selon le nombre de points d'intersections qui le suivent ou le précèdent selon une direction du rayon.

Dans le cas de notre application, trois orientations différentes sont utilisées. La première est parallèle à l'axe y . La deuxième et la troisième correspondent respectivement à des rayons faisant 45° et 135° avec l'axe x .

4.3.5.2 Calcul de la distance signée

Le calcul de la distance signée exacte séparant chaque voxel du point le plus proche de la surface d'un modèle 3D est un processus coûteux. Par ailleurs, l'extraction d'iso-surfaces à partir d'une représentation volumétrique requiert la détermination de la distance précise uniquement pour les voxels qui sont localisés à proximité de la surface. Pour cela on propose d'abord de déterminer une approximation de la distance. Ensuite, la distance précise est évaluée pour les voxels qui sont proches de la surface. Les techniques d'approximation de la distance euclidienne sont connues sous le nom de transformée de distance.

Transformée de distance :

Il existe plusieurs algorithmes qui fournissent une approximation rapide de la distance euclidienne tel que la distance «city-block», échiquier («chessbord») [70] et la distance de chanfrein («chamfer») [13]. Ces méthodes ont été initialement développées pour des images 2D binaires où les pixels sont classifiés en deux groupes : l'avant plan et l'arrière plan. Les transformées de distances ont pour but de fournir une approximation de la distance euclidienne entre chaque pixel de l'arrière plan et le pixel de l'avant plan qui lui est le plus proche. L'approximation se base sur l'hypothèse que la distance associée à chaque pixel peut être déduite de celle de ses voisins. Les distances sont d'abord initialisées de façon qu'une valeur 0 soit associée aux pixels de l'avant plan et qu'une valeur maximale soit associée aux pixels de l'arrière plan. Deux balayages utilisant des masques tels que ceux de la figure 43 sont effectués pour propager la distance à partir des pixels de l'avant plan à ceux de l'arrière plan. Par exemple, pour la distance échiquier le masque à gauche signifie que la nouvelle valeur de la distance \widetilde{dist}_n associée à un pixel de coordonnées (i, j) est déduite de sa distance actuelle (\widetilde{dist}) et de celles de ses voisins selon la formule :

$$\widetilde{dist}_n(i, j) = \min \begin{cases} \widetilde{dist}(i, j) \\ \widetilde{dist}(i - 1, j) + 1 \\ \widetilde{dist}(i, j + 1) + 1 \end{cases}$$

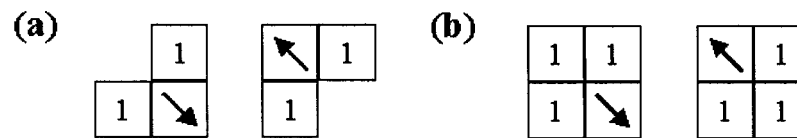


Figure 43 Masques de transformées de distance. (a) Distance échiquier («chessbord»). (b) Distance «city-block».

Ces méthodes propagent des valeurs entières de la distance ce qui limitent leur précision. Une meilleure approximation est achevée si plus d'information est diffusée de chaque pixel à ses voisins. Ceci représente le principe de la transformée de distance proposée par Danielson [21]. Cette technique propage un vecteur $L(i, j) = (L_i(i, j), L_j(i, j))$ représentant la position relative du pixel de l'avant plan le plus proche du pixel de coordonnées (i, j) plutôt que la distance minimale. Cette dernière est égale à la norme du vecteur $L(i, j)$.

Danielson propose deux versions de son algorithme : 4SED («4 neighbours Sequential Euclidean distance») et 8SED selon que le nombre de voisins de chaque pixel est de quatre ou huit (figure 44). La version 8SED donne une meilleure approximation de la distance euclidienne. Cet algorithme débute par associer le vecteur $(0, 0)$ aux pixels de l'avant plan et le vecteur $(vmax, vmax)$ aux pixels de l'arrière plan. $vmax$ représente une valeur élevée de distance. L'image est ensuite balayée quatre fois en utilisant les masques de la figure 44(b). Par exemple pour le masque en haut et à gauche, le nouveau vecteur $L_n(i, j)$ est déduit à partir du vecteur actuel $L(i, j)$ et de ceux des voisins du pixel (i, j) comme suit :

$$L_n(i, j) = \min \begin{cases} L(i, j) \\ L(i-1, j+1) + (-1, +1) \\ L(i-1, j) + (-1, 0) \\ L(i, j+1) + (0, 1) \\ L(i+1, j+1) + (1, 1) \end{cases}$$

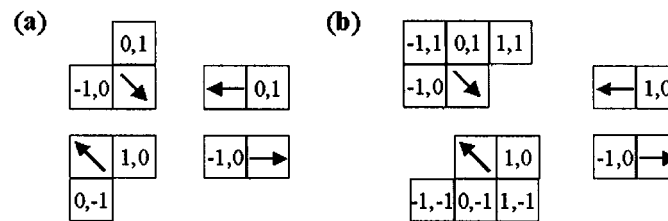


Figure 44 Masques de la distance de Danielson. (a) Masques basés sur quatre voisins (4SED). (b) Masques basés sur huit voisins (8SED).

Le minimum est calculé au sens de la norme des vecteurs.

Une généralisation de l'algorithme 8SED aux modèles 3D est utilisée dans notre application. Pour cela l'algorithme de Danielson est appliqué aux voxels tranche par tranche. Deux balayages sont effectués du bas vers le haut du volume et vice versa (selon l'axe z). Pour chaque tranche, la distance associée à un voxel est évaluée à partir de ses 26 voisins.

Afin de calculer les distances pour les voxels à l'intérieur et à l'extérieur du modèle, l'algorithme de Danielson est appliqué à deux reprises au volume. Au cours de la première, les distances des voxels qui sont à l'intérieur du modèle et sur la surface sont initialisées à zéro. La propagation permet d'estimer les distances des voxels extérieurs à la surface du modèle. L'inverse est effectué au cours de la deuxième application. Les distances positives sont associées aux voxels intérieurs et des valeurs négatives sont associées à ceux qui sont à l'extérieur.

Calcul de la distance précise :

A ce stade, les modèles 3D sont convertis en tranches qui sont constitués de segments de droite. Ceci est avantageux puisque l'évaluation de la distance à un segment est moins coûteuse que celle à un triangle.

La distance approximative \widetilde{dist} calculée avec l'algorithme de Danielson est utilisée pour identifier les voxels qui sont à proximité de la surface. La distance précise est ensuite évaluée pour les voxels vérifiant $|\widetilde{dist}| < 10 V_{echan}$, avec $V_{echan} = 8mm$ qui représente

le pas d'échantillonnage des modèles 3D. La période d'échantillonnage choisie assure un compromis entre la rapidité de calcul et la reconstruction des détails de la forme du corps humain.

La distance précise est d'abord évaluée en considérant les segments de la tranche à laquelle appartient le voxel. Afin d'accélérer le calcul, un carré autour du voxel et ayant pour dimension $2 \widetilde{dist}$ est utilisé pour délimiter les segments de la tranche à considérer dans le calcul de la distance minimum. Soit d_s la distance minimale obtenue au niveau de la tranche du voxel. Les segments de droite des autres tranches qui sont à l'intérieur d'un cube autour du voxel et ayant pour dimensions $2 d_s$ sont vérifiés pour le calcul de la distance finale.

Le temps moyen requis pour la conversion en tranches jusqu'au calcul de la distance précise pour un pas d'échantillonnage de 8 mm est autour de 5min, ceci pour un ordinateur ayant un processeur de 2 GHz.

4.3.6 Extraction d'iso-surface à partir de la représentation volumétrique

La reconstruction d'une surface fermée du modèle du corps humain à partir de la représentation volumétrique est effectué en utilisant l'algorithme du «marching cube» [47]. Ce dernier se base sur des cubes dont les sommets correspondent aux centres des voxels de la représentation volumétrique. Chaque cube est remplacé par un ensemble de polygones qui sont déduits à partir de la classification de ses sommets comme étant à l'intérieur ou à l'extérieur de la surface. La classification fournit 256 configurations possibles. En utilisant des propriétés de symétrie, le nombre de configurations peut être réduit à 15 comme le montre la figure 45. L'idée de base est que la surface traverse un côté du cube si un des sommets est à l'intérieur de la surface alors que l'autre est à l'extérieur. Une table de conversion permet de générer des triangles à l'intérieur d'un cube en se basant sur la configuration de ses sommets. Les distances associées aux sommets déterminent les points d'intersection de la surface avec le cube.

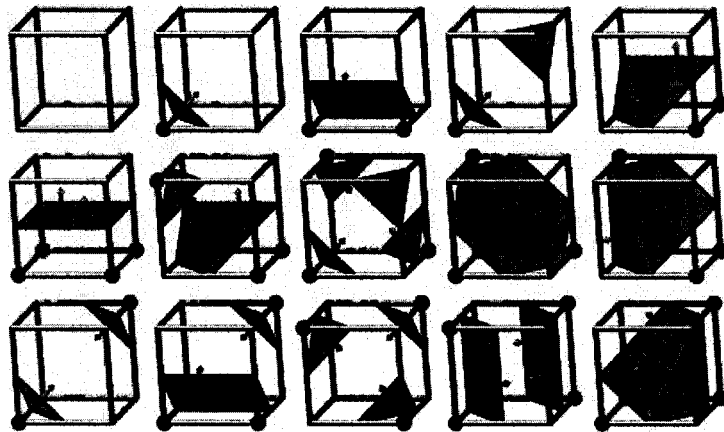


Figure 45 Les 15 configurations utilisées dans la génération d'iso-surface par l'algorithme du «Marching cube». Les sommets marqués sont classifiés à l'intérieur de la surface.

4.3.7 Résultats et discussion

La figure 46 illustre un exemple de réparation d'un modèle 3D d'un corps humain. Ces résultats montrent que l'algorithme que nous avons développé fournit un remplissage qui donne visuellement une bonne approximation de la majorité du corps humain sans recours à des points de repère anatomiques. Pour certaines régions tel que les oreilles, les données numérisées sont constituées de fragments dispersés de la surface réelle. Il est donc très difficile d'estimer dans ce cas les données manquantes. Ceci justifie les artéfacts générés par l'algorithme.

Afin d'illustrer l'effet du filtrage des modèles 3D, nous avons appliqué l'algorithme de remplissage des trous sans filtrage des modèles. La figure 47 montre que la surface du modèle réparée avec filtrage est plus continue que celle obtenue sans filtrage.

L'algorithme de remplissage des trous que nous proposons, a l'avantage de remplir les trous des modèles 3D tout en générant une représentation utile pour la description statistique de la forme du corps humain.

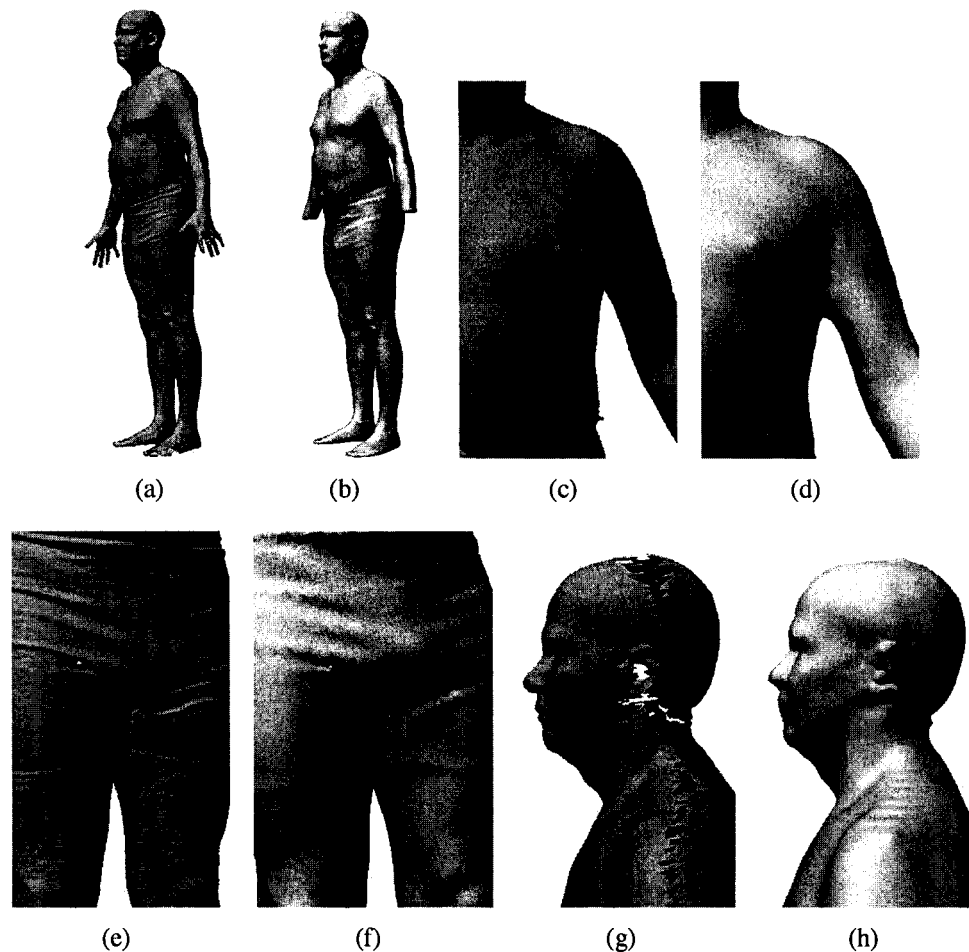


Figure 46 Fermeture des trous des modèles de la base de données CAESAR : la méthode donne des résultats satisfaisants pour la plupart des parties du corps humain. La méthode ne permet pas la reconstruction des oreilles. Ceci est dû d'une part au grand manque de données dans cette région et à la fréquence d'échantillonnage choisie. (a),(c),(e) et (g) modèle original. (b),(d),(f) et (h) modèle après fermeture des trous.

Les modèles réparés par déformation d'une surface générique complète [1], présentent des surfaces qui sont plus continues et qui paraissent plus réalistes que les surfaces générées par notre algorithme. Cependant notre algorithme a les deux avantages suivants : d'une part, il n'utilise pas les points de repères anatomiques. D'autre part, la déformation du modèle générique pour l'ajuster aux modèles numérisés est un long processus. En effet, elle se base sur l'optimisation d'une fonction coût en fonction de milliers de paramètres.

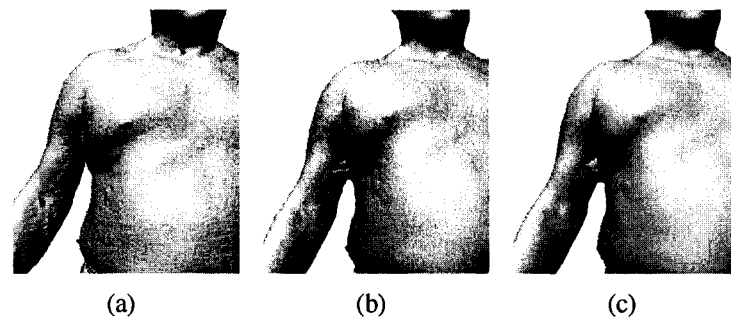


Figure 47 Effet du filtrage sur la fermeture des trous des modèles 3D. (a) Modèle original (b) Réparation d'un modèle sans filtrage. (b) Modèle réparé avec filtrage : Ce dernier génère des surfaces plus continues en dépit du fait qu'il élargisse les trous.

L'algorithme que nous proposons prend en moyenne 5 minutes pour un taux d'échantillonnage de 8mm.

Le traitement des modèles 3D à partir du filtrage jusqu'à la génération de surfaces fermées déforme les données mesurées. Nous avons montré que la distorsion introduite par filtrage est négligeable. Aussi au cours du traitement des modèles par tranche, les données manquantes sont estimées sans changer les données originales. La majeure source de déformation des modèles provient du taux d'échantillonnage. Le choix de ce dernier doit être fait selon un compromis entre le niveau de détail qu'on veut préserver et la rapidité de calcul au cours de la phase de remplissage des trous et la phase d'analyse statistique appliquée sur la représentation volumétrique.

4.4 Conclusion

La fermeture des trous des modèles 3D est une tâche complexe. Il n'y a pas une solution générale qui s'applique à tous les modèles 3D. La déformation d'un modèle générique qui est caractérisé par une surface complète est une solution efficace pour remplir les trous des modèles de corps. Toutefois cette méthode nécessite une connaissance préalable des positions des points de repère anatomiques. Ces données sont difficile à extraire automatiquement à partir des modèles 3D. Leur marquage préalablement à la numérisation est un

processus coûteux qui est sujet à l'interprétation humaine. Dans ce chapitre, on a proposé une méthode qui ne se base pas sur une telle information. Plutôt, la méthode essaie d'estimer les données manquantes à partir des données mesurées. Les modèles sont d'abord découpés en tranches horizontales. Le problème de fermeture de surface 3D est converti en un problème de génération de courbes 2-D fermées. Une fois réparées, les tranches sont converties en une représentation volumétrique qui est basée sur un champ de distance signée. La surface du modèle réparé est par la suite extraite comme une iso-surface à partir de la représentation volumétrique. Les résultats montrent que l'algorithme donne une approximation qui est visuellement bonne pour la plupart des parties du corps humain à l'exception des régions dont une majorité de la surface n'a pas été numérisée. L'algorithme proposé a l'avantage de générer en sortie une représentation volumétrique des modèles 3D qui servira au développement d'une représentation compacte de la forme du corps humain.

CHAPITRE 5

APPLICATION DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES AUX MODÈLES 3D REPRÉSENTÉS PAR DES CARTES DE DISTANCES SIGNÉES

Ce chapitre présente les résultats de l'application de l'analyse en composantes principales aux cartes de distances signées calculées dans le chapitre précédent.

5.1 Application de l'ACP sur une carte de distance signée

L'analyse en composantes principales est appliquée sur un ensemble de 300 modèles correspondant à des sujets males. Ces modèles sont convertis en une représentation volumétrique par échantillonnage d'un parallélépipède de dimension $(0,7m, 1,2m, 2m)$. Le pas d'échantillonnage est de 8mm.

Un ensemble de vecteurs propres correspondant aux valeurs propres les plus significatives est extrait. Ces vecteurs propres représentent une base orthonormale de l'espace du corps humain. Ainsi les modèles de corps humain peuvent être caractérisés par leur projection dans cette espace. Afin de prouver la compacité de la représentation, le pourcentage de variance est calculé, selon la formule 3.11, en incrémentant le nombre de vecteurs propres. La figure 48 illustre la variation de ce pourcentage. On note que 95% de la variabilité de la forme du corps humain dans l'ensemble étudié est couverte par les premiers 64 vecteurs propres. Ceci représente une réduction remarquable dans les dimensions de cet espace.

La figure 49 illustre des exemples de reconstruction de modèles de corps humain à partir des premiers 64 vecteurs propres. Les résultats montrent que la forme de modèles qui sont originalement représentés par à peu près 300000 polygones (30 Mo) est globalement reconstruite à partir d'une représentation compacte de 64 coefficients (128 octets). Le niveau de détails présenté par la reconstruction est suffisant pour regrouper des modèles de corps humain selon la similarité de leur forme. Le reste des composantes représente

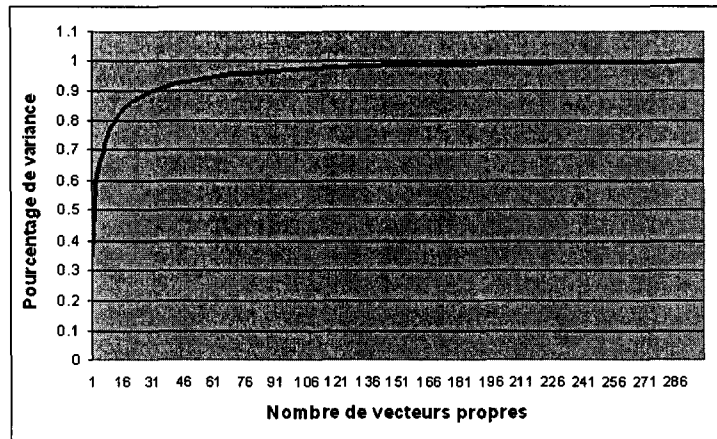


Figure 48 Variation du pourcentage de variance en fonction du nombre de personnes propres pour une représentation volumétrique basée sur un champ de distance signée.

les détails de la personne qui ne sont pas pertinents pour la détermination des modèles représentatifs d'une population donnée.

Afin de prouver que les modèles réparés peuvent être reconstruits approximativement à partir des 64 premières composantes principales, nous proposons de déterminer pour chaque modèle la distribution des distances entre les sommets du modèle reconstruit et la surface du modèle réparé. Les résultats obtenus sur 300 modèles montrent que les moyennes des distributions varient dans l'intervalle [0,2 mm, 3,3 mm]. Les écarts type varient dans l'intervalle [0,2 mm, 2,8mm] . Ceci prouve la qualité de la reconstruction.

5.2 Vérification de la mise en correspondance assurée par la représentation volumétrique basée sur une carte de distances signées

Dans la section 3.2.2.2 nous avons supposé que la mise en correspondance assurée par la représentation volumétrique est une approximation d'une représentation anatomique. Dans ce paragraphe on propose de valider ce fait. Pour cela on propose de générer l'iso-surface correspondant aux distances nulles à partir de la moyenne des cartes de distances des 300 modèles auxquels on a appliqué l'ACP. La surface générée (figure 50(a)) corres-

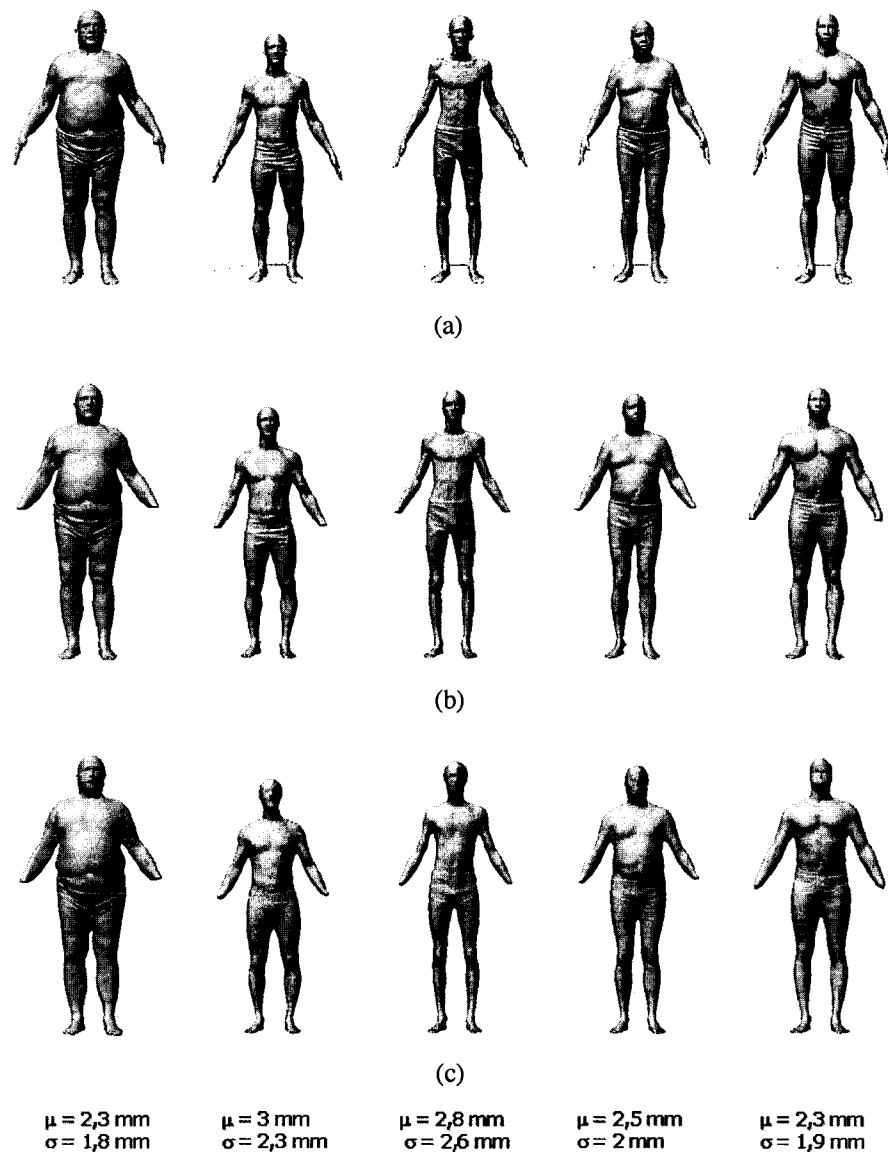


Figure 49 Reconstruction de modèles de corps humain à partir des premiers 64 vecteurs propres extraits par application de l'ACP à la représentation volumétrique de 300 sujets mâles. (a) Modèles originaux. (b) Modèles réparés. (c) Modèles reconstruits : μ et σ représentent respectivement, la moyenne et l'écart type de la distribution des distances entre les sommets des modèles reconstruits et la surface des modèles réparés.

pond pour la majorité du corps à une personne moyenne. Toutefois le modèle 3D généré

présente des déformations au niveau du cou et des bras. Ceci s'explique par le fait que les modèles de corps humain manque d'alignement au niveau de ses segments du corps.

Afin de vérifier que la surface générée tend vers la surface de l'individu moyen de l'ensemble des modèles étudiés, nous proposons de comparer la stature et le volume de la surface générée avec la moyenne des volumes et la moyennes des statures de ces modèles. Les résultats montrent que la différence entre la stature de la surface générée à partir de la moyenne des cartes de distances signées ($1,771m$) et la moyenne des statures des modèles ($1,777m$) est inférieure au pas d'échantillonnage qui est de $8mm$.

Le volume des modèles 3D est estimé à partir de la représentation volumétrique comme la somme des volumes des voxels qui sont classifiés à l'intérieur de la surface du corps. Les résultats montrent que le volume de la surface générée à partir de la moyenne des cartes de distances signées ($0,086m^3$) est proche de la moyenne des volumes des modèles étudiés ($0,081m^3$).

Pour montrer davantage que la surface générée à partir de la moyenne des cartes de distances signées tend vers la surface de l'individu moyen de l'ensemble des modèles auxquels on a appliqué l'ACP, on propose d'utiliser les points de repères anatomiques qui ont été marqués sur les sujets préalablement à la numérisation. La figure 51(a) illustre un modèle de corps humain de la base de données CAESAR. Les sphères vertes indiquent les positions des points de repère anatomiques de ce modèle. Nous proposons de calculer la moyenne des points de repères de tous les modèles et de les superposer avec le modèle 3D généré à partir de la moyenne des cartes de distances signées 51(b). Ce résultat montre que les points de repère, à l'exception de ceux autour du cou, préservent leur signification anatomique sur cette surface. Ceci confirme que la surface générée à partir de la moyenne des cartes de distances signées tend vers la surface de l'individu moyen de l'ensemble des modèles. Les points de repère autour du cou ne sont pas visibles car ils sont situés en arrière de la surface du modèle.

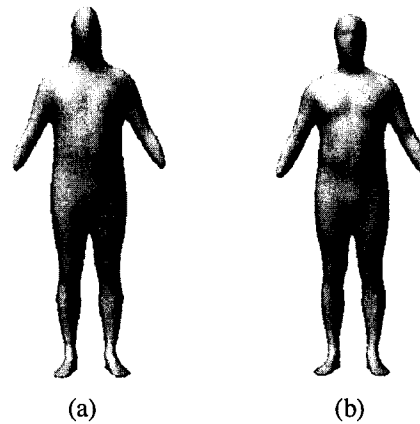


Figure 50 Surfaces générées à partir des moyennes des cartes de distances signées. (a) Moyenne des modèles non-normalisés. (b) Moyenne des modèles normalisés.

5.3 Normalisation de la stature

Afin d'améliorer la mise en correspondance assurée par la représentation volumétrique nous proposons de normaliser les statures des modèles à une même valeur ($1m$) et d'appliquer l'ACP sur les représentations volumétriques des modèles normalisés. En effet, la normalisation permet d'améliorer l'alignement entre les modèles comme le montre la figure 52. Elle permet également d'isoler la variation de la forme du corps humain de celle de sa stature. Cette dernière peut être considérée tout simplement comme un facteur d'échelle. Chaque modèle 3D peut être reconstruit à partir d'une description qui inclut ce facteur d'échelle ainsi la projection du modèle normalisé dans l'espace des composantes principales.

La représentation volumétrique des modèles normalisés est déterminée par échantillonnage d'un parallélépipède ayant pour dimension ($0,5\text{ m}$, $0,7\text{ m}$, $1,02\text{m}$). Le pas d'échantillonnage est de 5 mm .

La figure 50(b) montre que la surface générée à partir de la moyenne des cartes de distances signées des modèles normalisés ne présente pas des déformations comme celle

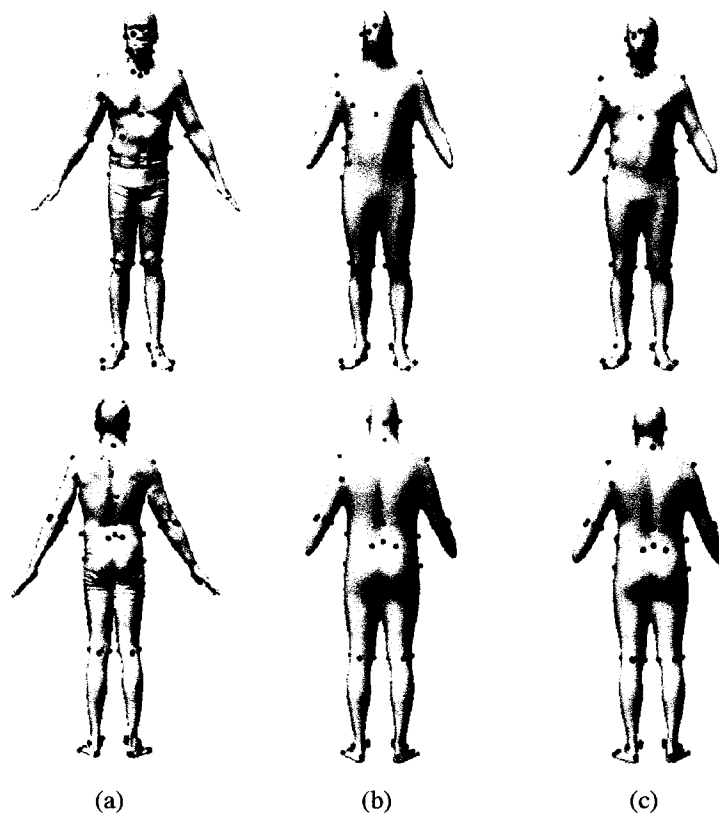


Figure 51 Comparaison des moyennes des points de repères avec les surfaces générées à partir des moyennes des cartes de distances signées. (a) Points de repères d'un modèle de la base de données CAESAR. (b) Superposition des moyennes des points de repères avec la surface moyenne dans le cas de non normalisation de stature. (c) Superposition des moyennes des points de repères avec la surface moyenne dans le cas de normalisation de stature.

obtenue dans le cas où les statures ne sont pas normalisées. Ceci prouve que la normalisation améliore la mise en correspondance entre les modèles. Nous avons également calculé la position moyenne de chaque point de repère pour tous les modèles après réduction d'échelle. La figure 51(c) illustre la superposition de la moyenne de chaque point de repère avec la surface générée à partir de la moyenne des cartes de distances signées des modèles normalisés. Nous remarquons que même les points de repères autour du cou préservent leur signification anatomique.

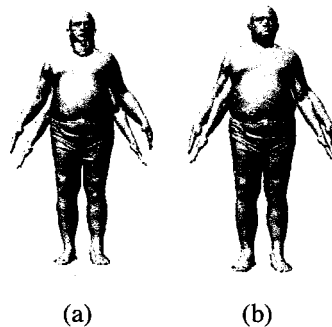


Figure 52 L’alignement entre les modèles 3D de corps humain est amélioré par la normalisation de la stature. (a) Superposition de deux modèles non-normalisés. (b) Superposition des modèles de (a) après la normalisation de la stature.

5.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons montré que l’application de l’ACP aux cartes de distances signées fournit une description compacte et générative des modèles 3D de corps humain. En effet, ces modèles qui sont originalement représenté par à peu près 300000 polygones, peuvent être décrits et reconstruits à partir d’une dizaine de coefficients. Ces derniers correspondent à la projection des modèles dans l’espace des composantes principales extraites à partir des cartes de distances d’un ensemble de corps humain numérisés. Les résultats montrent que la mise en correspondance assurée par les cartes de distances signées tend vers une correspondance anatomique entre les modèles. La normalisation des statures réduit le désalignement entre les modèle et améliore la mise en correspondance entre assurée par les cartes de distances signées.

CHAPITRE 6

VISUALISATION ET INTERPRÉTATION DES PRINCIPAUX MODES DE VARIATION DE LA FORME DU CORPS HUMAIN

Le but de ce travail de recherche est de développer une méthode qui permette d'assister les concepteurs à analyser la variabilité de la forme du corps humain au sein d'une population donnée à partir de données anthropométriques tridimensionnelles. Ces dernières sont d'abord converties en une description compacte qui contient assez d'information pour reconstruire la forme originale des modèles de corps humains. La description compacte est obtenue au moyen de l'analyse en composantes principales sur un ensemble de modèles de corps humains qui sont définis par une représentation volumétrique basée sur un champ de distance signée. En effet, l'ACP permet d'extraire un ensemble réduit de composantes qui expliquent un maximum de variabilité dans l'espace étudié. Ces composantes correspondent aux principaux modes de variation de la forme du corps humain. Au cours de ce chapitre, on propose de visualiser ces modes. Un essai d'interprétation de leur signification anatomique est également présenté. Cette interprétation reste toutefois à valider par des experts en anthropométrie, anatomie et anthropologie.

Trois types d'expériences sont menés pour analyser la variabilité de la forme au sein d'une population donnée [10]. Au cours de la première, l'ACP est appliquée sur les modèles 3D sans normalisation de leurs statures. Dans la deuxième expérience, les statures sont normalisées. Cette opération a pour but d'une part d'isoler la variation de la forme du corps humain de la variation de sa stature. D'autre part, les modèles normalisés sont mieux alignés, ce qui améliore la correspondance entre eux. La troisième expérience consiste à traiter des modèles dont les bras ont été éliminés. Les bras représentent en fait les segments du corps où il y a le moins d'alignement entre les modèles. En plus, le calcul des composantes principales à partir des représentations volumétriques peut être bruité par le

chevauchement entre les bras de certains modèles avec les torsos d'autres. C'est pour cela que l'élimination des bras renforce la correspondance entre les différents modèles.

Dans l'interprétation qui suit, la variation de la forme du visage sera considérée comme un bruit qui est introduit par l'utilisation de la représentation volumétrique. En effet, la représentation volumétrique peut donner de meilleurs résultats concernant la variabilité du visage si les têtes des modèles sont étudiées séparément du corps, et qu'ils sont mieux alignés. Cette opération n'a pas été expérimentée dans ce travail, puisqu'on s'intéresse à la variabilité globale du corps humain et non pas aux détails.

6.1 Principe de la visualisation des modes de variation

L'ACP permet d'extraire un ensemble de composantes qui représente une base orthonormale de l'espace de formes définie par la population étudiée. Ainsi chaque modèle peut être reconstruit à partir de ses coefficients de projection dans cette base (équation 3.9).

Afin de visualiser les différents modes de variation, un modèle de corps humain qui est proche de la moyenne est sélectionné. Ses coefficients de projection dans la base des composantes principales servent de noyau pour la création de séquences de modèles virtuels qui illustrent les différents modes de variation. Pour chaque mode de variation, les modèles virtuels sont générés par incrémentation du coefficient de projection sur la composante en question comme le montre la figure 53. Les autres coefficients sont maintenus égaux à ceux du modèle noyau. Les séquences générées permettent de discerner la variation de forme induite par la composante étudiée.

L'interprétation associée aux différents modes de variation est ensuite confirmée par la visualisation d'un ensemble de modèles réels qui sont rangées en ordre croissant de leur projection sur la composante en question. Les modèles sont choisis de façon à ce que leurs projections soient uniformément espacées entre le minimum et le maximum de la composante étudiée.

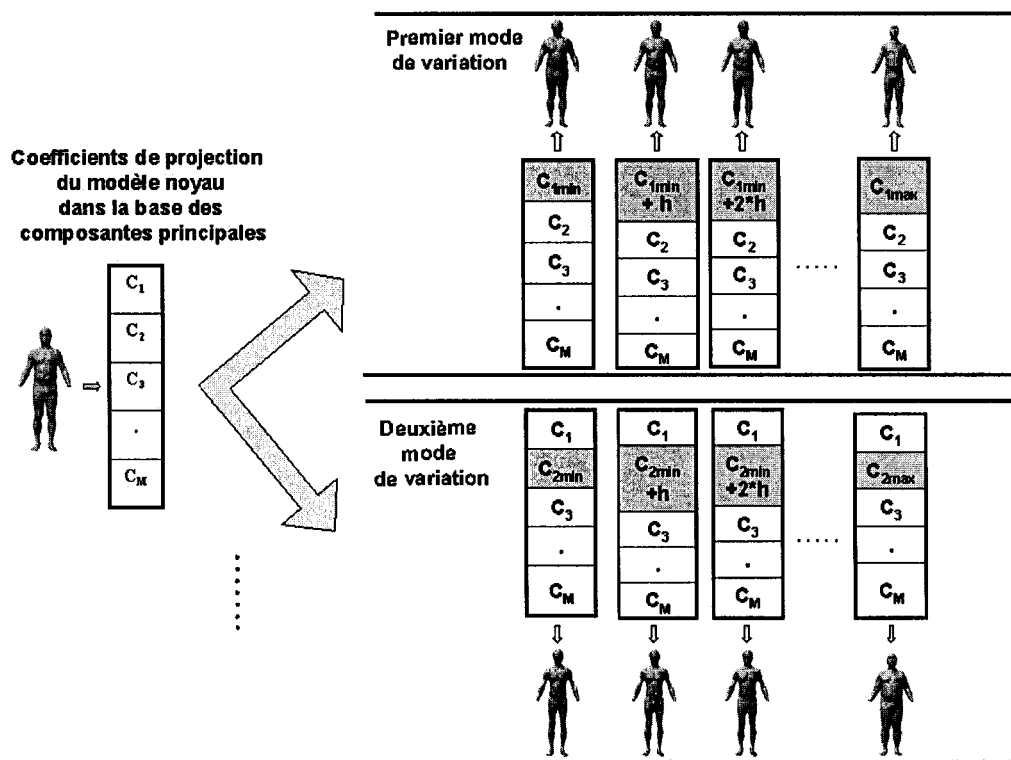


Figure 53 Génération des séquences de modèles virtuels pour la visualisation des différents modes de variation. Les coefficients c_{imin} et c_{imax} représentent respectivement le minimum et le maximum des coefficients de projection sur la composante i pour l'ensemble des modèles qui ont servi pour l'extraction des composantes principales.

Dans les trois types d'expériences effectuées, on fournit la visualisation et l'interprétation des cinq premiers modes de variation. Ces derniers seront présentés selon l'ordre décroissant du pourcentage de variance qu'ils représentent pour la population considérée.

6.2 Analyse de la variabilité des modèles non normalisés

Au cours de cette expérience les modèles 3D sont traités sans normalisation de leur stature. La représentation volumétrique est générée par échantillonnage d'un parallélépipède de dimension (0,7 m, 1,2 m, 2 m) autour des modèles. Le pas d'échantillonnage est de 8 mm.

	Premier mode	Deuxième mode	Troisième mode	Quatrième mode	Cinquième mode
Modèles non-normalisés	35%	15%	9,5%	4%	3,1%
Modèles normalisés	33,9%	16,6%	8,9%	4%	3,6%
Modèles avec bras segmentés	36,2%	9,5%	6,3%	5,2%	4,6%

Tableau I

Pourcentage de variabilité associé aux premiers modes de variation de la forme humaine.

Le pourcentage de variabilité associé à chacun des cinq premiers modes de variation est indiqué sur le tableau I.

6.2.1 Premier mode de variation

La visualisation de la séquence des modèles virtuels générés par incrémentation de la projection sur la première composante principale montre une variation de la stature et du poids (figure 54(a)). La corrélation de la première composante avec ces variables anthropométriques présentée dans le tableau II appuie cette interprétation. La corrélation est également confirmée par la figure 54(b), où des modèles 3D réels de l'ensemble étudié sont rangés dans l'ordre croissant de leur projection sur la première composante. Dans une extrémité de la composante, les modèles sont gros et grands tandis que dans l'autre, les modèles tendent à être petits et minces.

6.2.2 Deuxième mode de variation

Le tableau II ainsi que la figure 56 montrent que le deuxième mode de variation est fortement corrélé avec le poids normalisé. On définit ce dernier comme étant le rapport entre le poids et le cube de la stature. Ce fait est confirmé par la visualisation du deuxième mode de variation par une séquence de modèles virtuels et une séquence de modèles réels

	Premier mode	Deuxième mode
Stature	-0,87	0,37
Poids	0,80	0,57
Poids normalisé	-0,247	0,92

Tableau II

Corrélation des deux premiers modes de variation, extraits à partir des modèles non-normalisés, avec la stature et le poids.

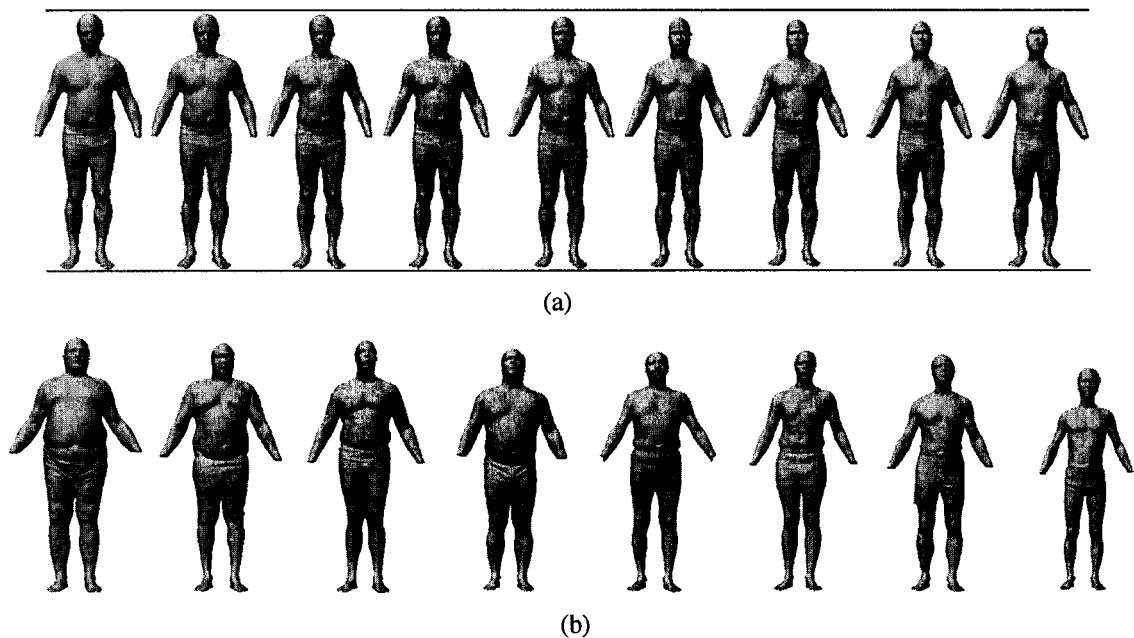


Figure 54 Premier mode de variation pour les modèles non-normalisés. Ce mode correspond à une variation de la stature et du poids. (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels. Dans une extrémité de la composante, les modèles sont gros et grands, tandis que dans l'autre ils sont minces et petits.

(figure 55). En effet, dans une extrémité de la composante, les modèles sont élancés alors que dans l'autre, ils tendent à être gros et plus petit.

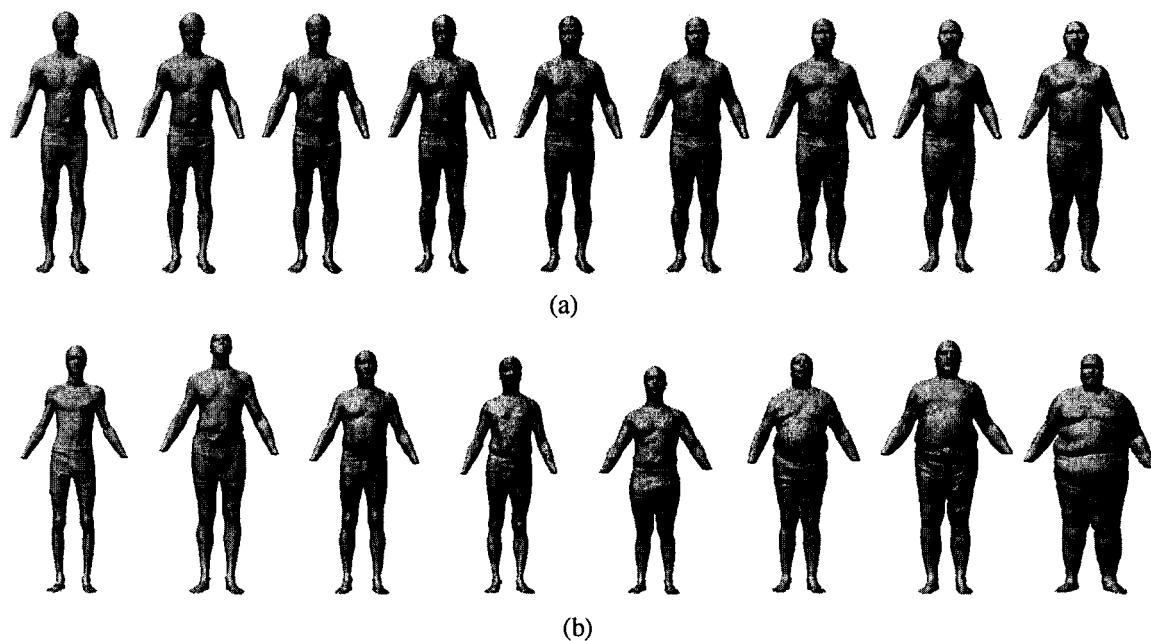


Figure 55 Deuxième mode de variation pour les modèles non-normalisés. Ce mode est fortement corrélé avec le poids normalisé ($poids/(stature)^3$). (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels. Dans une extrémité de la composante, les modèles sont élancés alors que dans l'autre, ils tendent à être gros et plus petit.

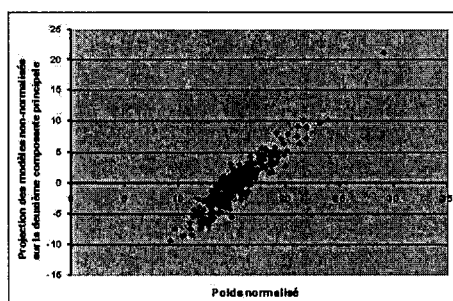


Figure 56 Corrélation entre le deuxième mode de variation et le poids normalisé dans le cas où les modèles de corps humain ne sont pas normalisés.

6.2.3 Troisième mode de variation

La troisième composante principale ne semble pas correspondre à un mode de variation anatomique (figure 57). Plutôt, elle représente un artéfact qui est dû au manque d'alignement au niveau des parties supérieures des différents modèles de corps humain.

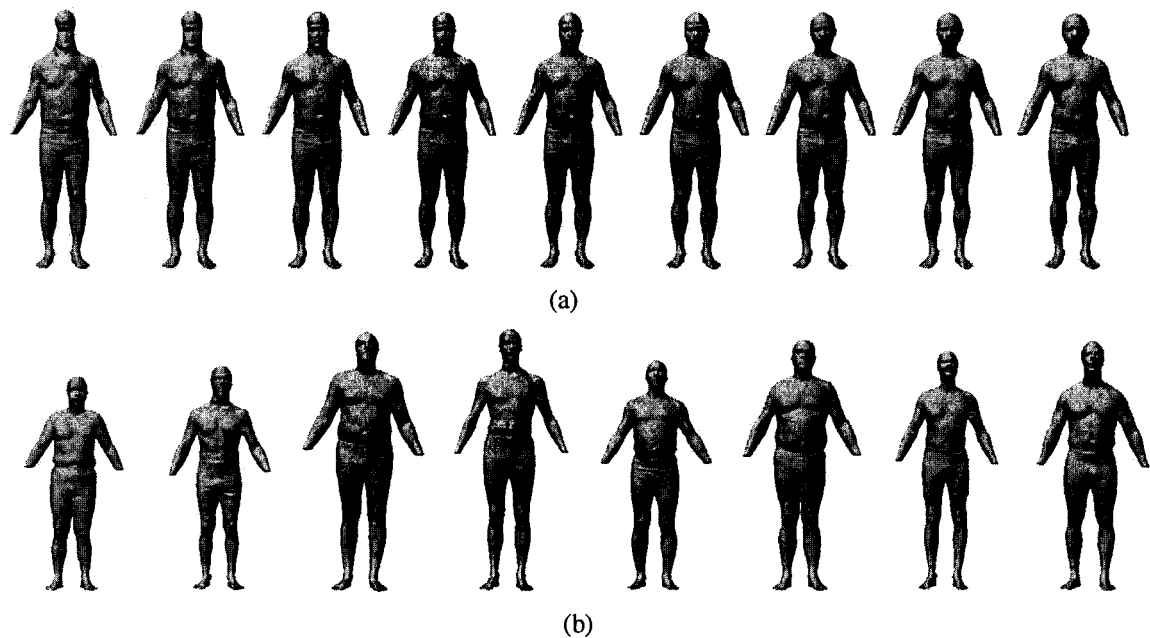


Figure 57 Troisième composante principale pour les modèles non-normalisés. (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels. A priori, cette composante ne reflète pas un mode de variation anatomique du corps humain mais correspond à un artefact qui est dû au manque d'alignement au niveau des parties supérieures des différents modèles 3D utilisés pour l'extraction des composantes principales.

6.2.4 Quatrième mode de variation

Le quatrième mode de variation reflète un changement de posture comme le montre la figure 58. Les modèles varient d'une posture où ils sont plus penchés vers l'avant à une posture où leur dos est redressé vers l'arrière.

6.2.5 Cinquième mode de variation

Le cinquième mode de variation reflète un changement de la musculature ainsi que de la distribution de la masse entre le torse et les jambes (figure 59). Une des extrémités de ce mode est caractérisée par un torse ventru, des hanches étroites et des cuisses rapprochées. En accroissant le coefficient de projection sur ce mode, les modèles deviennent de plus en

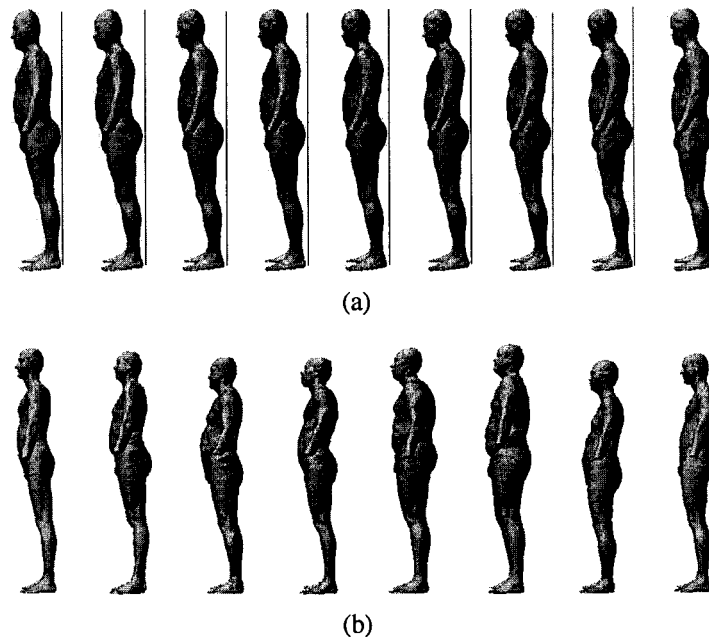


Figure 58 Quatrième mode de variation pour des modèles non-normalisés. Cette composante reflète une variation de posture. (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels. Dans une extrémité, les modèles ont le dos penché vers l'avant tandis que dans l'autre les modèles ont le dos plus redressé vers l'arrière.

plus musclés. Leurs bassins tendent à s'élargir et leurs jambes sont plus écartées. Cet axe est comparable à la forme ectomorphe définie par Sheldon et al. [73].

6.3 Analyse de la variabilité des modèles normalisés

L'application de l'analyse en composantes principales sur la représentation volumétrique de modèles non normalisés permet d'extraire des modes tels que la variation de la stature, du poids, de la posture et de la distribution de masse. Néanmoins, le manque d'alignement fait que la représentation volumétrique n'assure pas une bonne correspondance entre les différents modèles 3D. Ceci explique des artefacts comme la troisième composante qui ne semble pas correspondre à un mode de variation anatomique. La normalisation des statures des modèles améliore l'alignement entre les modèles et par la suite permet de réduire les artefacts de manque de correspondance.

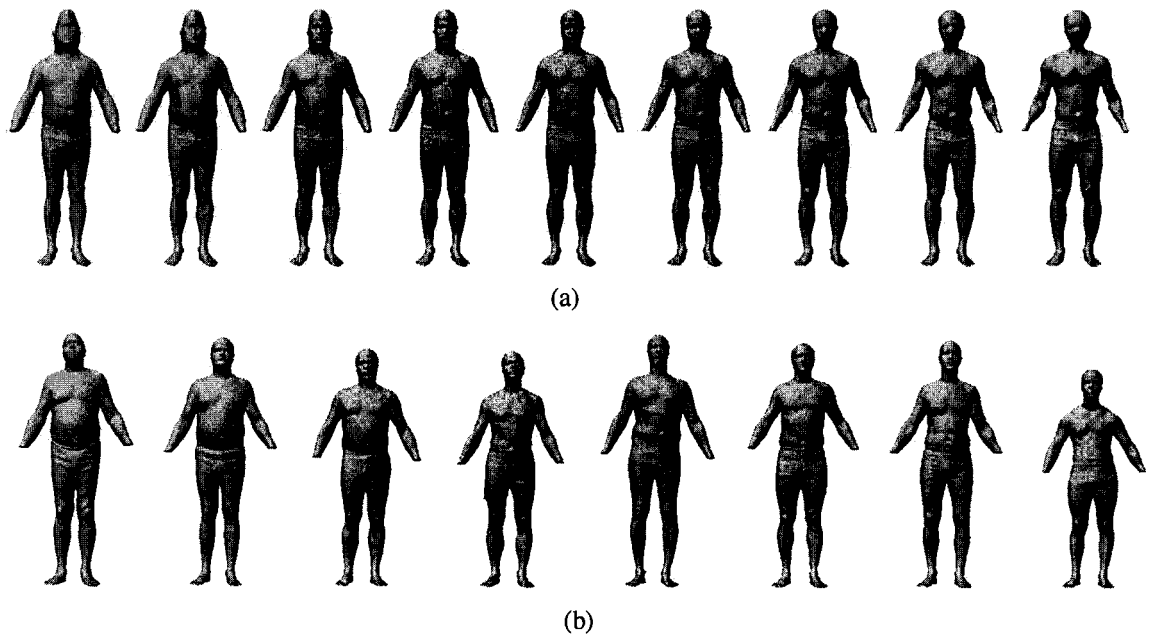


Figure 59 Cinquième mode de variation pour les modèles non-normalisés. Cette composante reflète un changement de la musculature ainsi que de la distribution de la masse entre le torse et les jambes. (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels. La forme varie d'un torse ventru, hanches écartés et cuisses rapprochées à un torse musclé, hanches plus large et jambes plus écartés.

6.3.1 Premier mode de variation

Après la normalisation des statures, il est intuitif de s'attendre à ce que la première composante principale fasse ressortir la variation du poids. C'est effectivement le résultat obtenu comme le montre la figure 60. Cette composante est similaire au deuxième mode de variation dans le cas où les modèles ne sont pas normalisés. L'inversement du sens de variation est dû au fait que les vecteurs propres sont déterminés à un signe près au cours de l'analyse en composantes principales. On remarque que les modèles virtuels de la figure 60(a) présentent moins de bruit surtout au niveau du visage que ceux reconstruits dans le cas de non-normalisation. Ce fait s'explique par le renforcement de l'alignement entre les modèles.

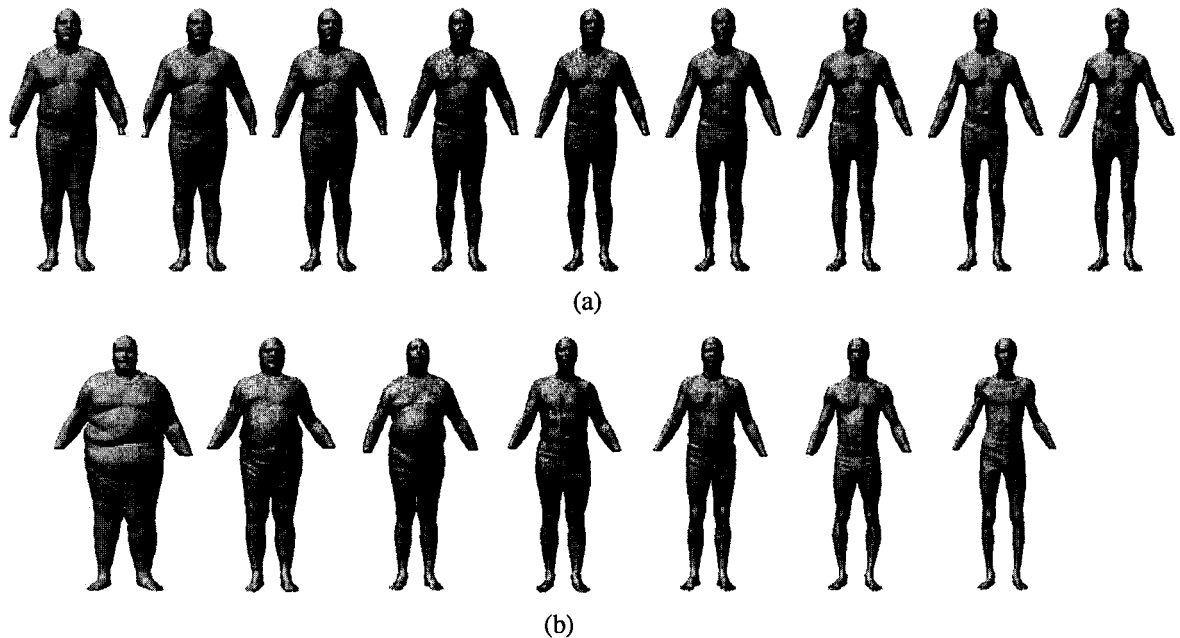


Figure 60 Premier mode de variation dans le cas de normalisation de la stature. Ce mode correspond à une variation du poids normalisé. (a) Séquence de modèles 3D virtuels : Ces modèles sont moins bruités que ceux reconstruits sans normalisation de la stature.(b) Séquence de modèles 3D réels.

La figure 61 confirme la forte corrélation entre le premier mode de variation et le poids normalisé. Cette corrélation est encore plus nette que celle obtenue pour les modèles non-normalisés. Cette différence peut être expliquée par le renforcement de la correspondance assurée par la représentation volumétrique suite à la normalisation des modèles 3D.

6.3.2 Deuxième mode de variation

La deuxième composante principale correspond à une variation de la posture où le dos est redressé vers l'arrière dans une extrémité, et penché vers l'avant dans l'autre (figure 62). Ce mode de variation est similaire à la quatrième composante dans le cas de non-normalisation de la stature.

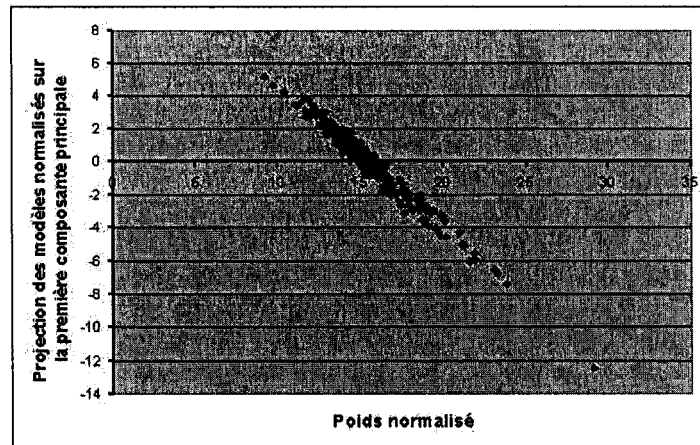


Figure 61 Corrélation entre le premier mode de variation dans le cas de normalisation de la stature et le poids normalisé.

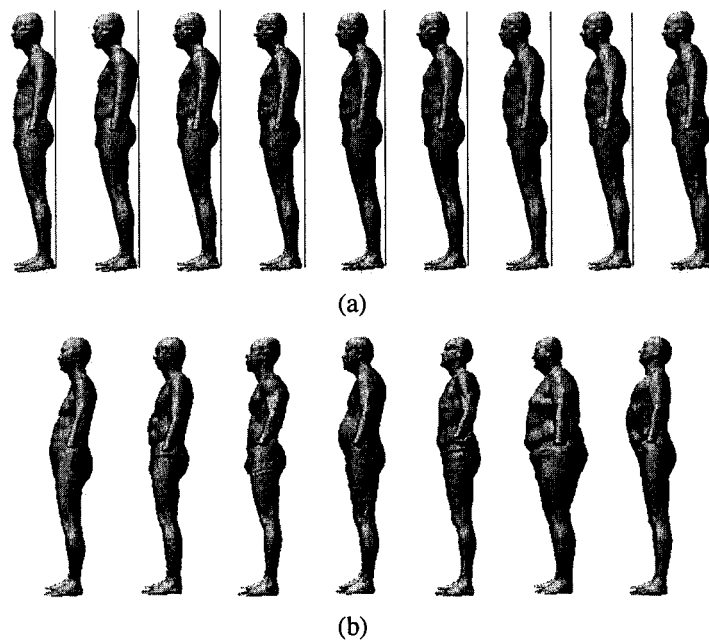


Figure 62 Deuxième mode de variation dans le cas de normalisation de la stature. Ce mode reflète une variation de la posture : Les modèles varient d'une posture où le dos est redressé vers l'arrière à une posture où ils sont penchés vers l'avant. (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels.

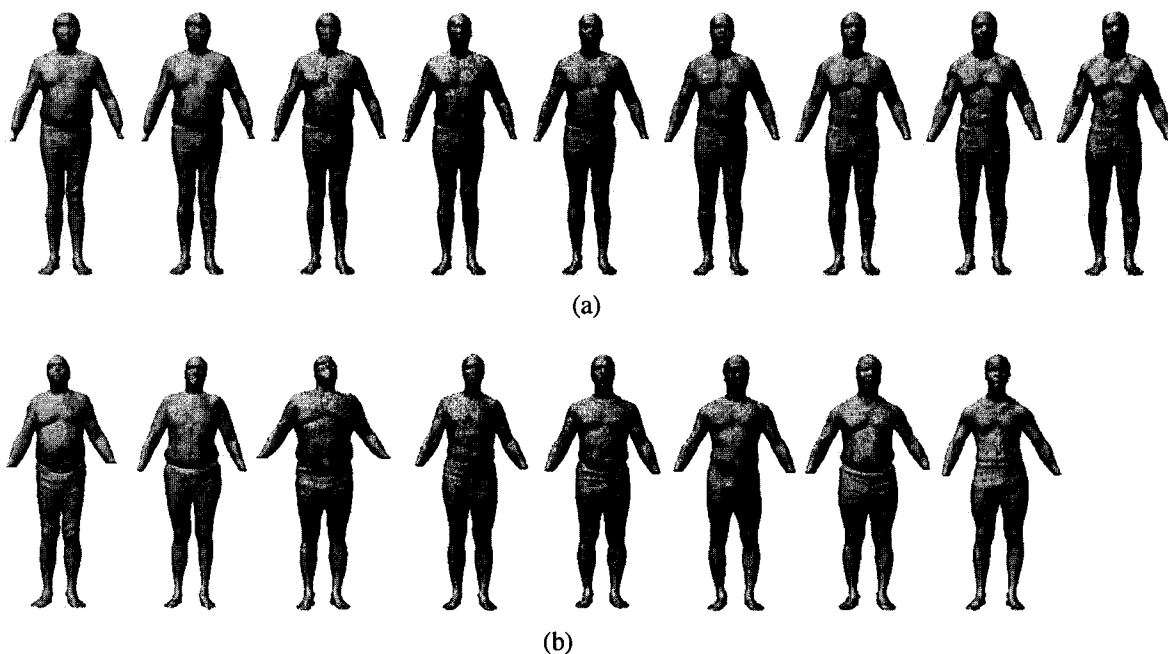


Figure 63 Troisième mode de variation dans le cas de normalisation de la stature. Cette composante reflète un changement de la musculature ainsi que de la distribution de la masse entre le torse et les jambes. (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels.

6.3.3 Troisième mode de variation

La troisième composante principale correspond à un changement de distribution de la masse ainsi qu'à une variation de la musculature (figure 63). Ce mode de variation est similaire à la cinquième composante dans le cas de non-normalisation de la stature. Dans un extrême du mode, les modèles sont ventrus avec des hanches étroites et des cuisses rapprochées. En s'approchant de l'autre extrémité, les modèles deviennent plus musclés avec des hanches plus larges et des jambes plus écartées. La figure 64 illustre une légère corrélation (-0,22) entre le deuxième mode de variation et le rapport entre le tour de taille et la circonférence des hanches. On remarque que les valeurs minimales de corrélation correspondent à un tour de taille supérieur aux hanches alors que pour les valeurs supérieures de corrélation, les hanches tendent à être plus larges.

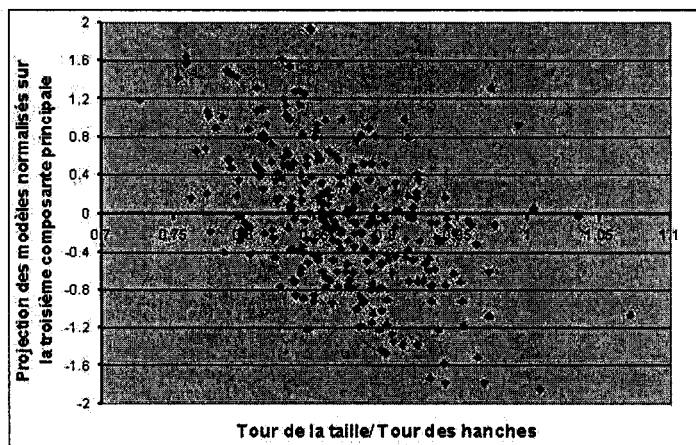


Figure 64 Corrélation du troisième mode de variation avec le rapport entre le tour de taille et la circonférence des hanches.

6.3.4 Quatrième mode de variation

La quatrième composante principale reflète une variation dans l'écartement des bras par rapport au torse (figure 65). Ce mode correspond également à une variation des proportions entre la partie inférieure et celle supérieure du corps. Pour une des extrémités le torse et les jambes sont proportionnels alors que pour l'autre les jambes deviennent plus longues et minces.

6.3.5 Cinquième mode de variation

Le cinquième composante principale correspond à une variation de la position de la tête par rapport au reste du corps (figure 66). Cette variation est accompagnée par une accentuation de la courbure du dos.

6.4 Analyse de la variabilité des modèles normalisés avec bras segmentés

Afin d'éliminer les effets de chevauchement des bras de certains modèles avec les torses d'autres modèles, on propose d'analyser la variabilité de la forme de modèles avec bras segmentés. La segmentation est effectuée au cours de la réparation des modèles de corps

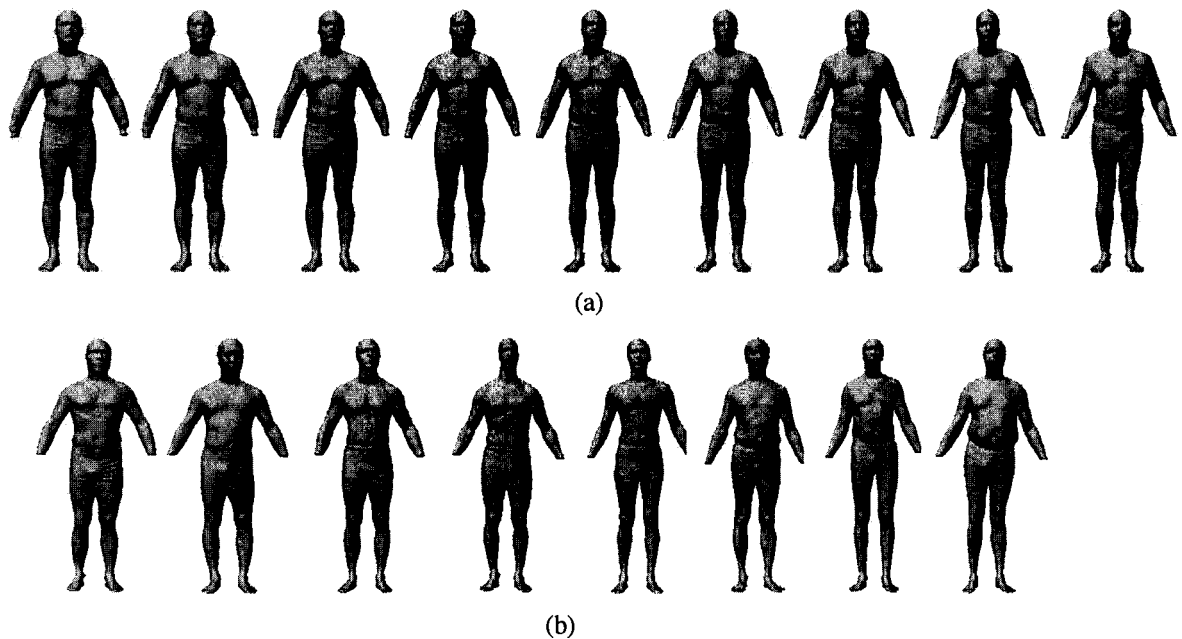


Figure 65 Quatrième mode de variation dans le cas de stature normalisé. Ce mode reflète une variation de l'écartement des bras ainsi qu'une variation de la longueur des jambes. Dans une extrémité du mode, les modèles ont des bras bien écartés du torse ainsi que des parties supérieures et inférieures qui sont proportionnelles. Dans l'autre extrémité, les bras sont moins écartés et les jambes sont plus longues. (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels.

humain (chapitre 3). Le nombre de boucles de chaque tranche est évalué. Dès que ce nombre atteint trois, la boucle qui a la plus grande circonférence est retenue. Celles qui sont secondaires correspondent aux bras et par la suite sont éliminées.

Les cinq premières composantes principales extraites par application de l'ACP aux modèles segmentés correspondent aux mêmes modes de variation obtenues précédemment, à l'exception des variations concernant les bras (figure 67). Cependant les pourcentages de variation qu'ils représentent sont différents comme le montre le tableau I. Cette différence peut être expliquée par l'élimination des variations qui sont dues aux bras. Ainsi on conclut que le chevauchement entre le torse de certains modèles et les bras d'autres n'a

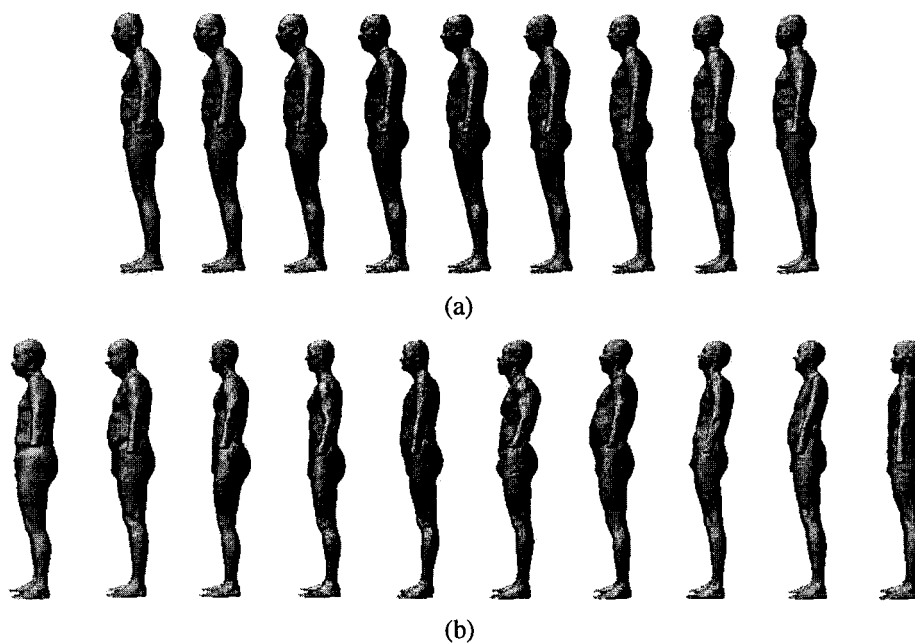


Figure 66 Cinquième mode de variation dans le cas de stature normalisée. Dans un extrême, les modèles ont la tête penché vers l'avant. Ce mode reflète une variation de la position de la tête par rapport au reste du corps ainsi qu'une variation dans la courbure du dos. (a) Séquence de modèles 3D virtuels. (b) Séquence de modèles 3D réels.

pas un impact majeur sur les modes de variations extraites à partir d'une représentation volumétrique des modèles 3D.

6.5 Discussion des résultats

Les résultats obtenus montrent que l'application de l'analyse en composantes principales aux représentations volumétriques des modèles 3D de corps humains permet d'extraire des modes de variation tels que la stature, le poids, la posture et la distribution de masse sans utilisation d'information préalable sur les positions de points de repère anatomiques.

Les modes de variation obtenus dans le cas des modèles non-normalisés présentent des artefacts qui sont dus au manque d'alignement. Ce dernier fait que la représentation vo-

lumétrique n'assure pas une bonne approximation de la correspondance anatomique entre les différents modèles.

La normalisation des statures permet de renforcer la correspondance entre les différents modèles. Ainsi des artefacts comme la troisième composante (figure 57) sont éliminés. La segmentation des bras permet d'éliminer la possibilité de chevauchement entre les bras de certains modèles et le torse d'autres. Toutefois, ce chevauchement n'a pas un impact majeur sur les résultats. En effet, les modes de variation obtenus après segmentation sont semblables à ceux obtenus sans segmentation.

Dans ce chapitre, une interprétation est fournie uniquement pour les cinq premiers modes de variation dans chaque expérience. En fait, les composantes suivantes sont complexes et combinent plusieurs modes de variation. Leur interprétation nécessite une expertise dans les domaines de l'anthropométrie, anatomie et anthropologie.

Il est certain que l'utilisation d'une représentation surfacique basée sur des points de repère anatomiques assure une meilleure correspondance entre les différents modèles. Afin de tester la validité de la pseudo-correspondance fournie par la représentation volumétrique et d'identifier ses limites, il serait intéressant de comparer les modes de variation extraits en utilisant les deux représentations, à savoir la représentation surfacique et la représentation volumétrique pour le même ensemble de modèles. Pour le moment les travaux publiés dans le cadre de la représentation surfacique sont appliqués à un ensemble réduit de modèles qui sont différents des modèles utilisés dans nos expériences. Seuls les trois premiers modes de variation sont publiés [2]. Le premier mode correspond à une variation de la stature. Le deuxième mode correspond à un déplacement horizontal du corps. Cette variation ne ressort pas dans nos premières composantes illustrées précédemment vu que les modèles ont été alignés au cours de la phase de fermeture des trous. La troisième composante correspond à une variation du poids.

6.6 Conclusion

Nous avons développé une méthode permettant d'extraire les principaux modes de variation de la forme humaine à partir de données anthropométriques tridimensionnelles, sans utilisation de connaissance préalable sur les positions de points de repère anatomiques. Ces données servent à définir une relation de correspondance entre les différents modèles. Dans notre cas l'utilisation de la représentation volumétrique assure une pseudo-correspondance entre les différents modèles. L'analyse en composantes principales est appliquée à cette représentation pour extraire les modes de variation de la forme du corps dans une population donnée. La quantification et la visualisation de ces modes sont importantes pour la conception de divers produits tels que les vêtements, équipements de protection, espaces de travail et moyens de transport. Dans ce travail, nous avons fourni notre interprétation des modes de variation de la forme humaine dans un échantillon de 300 sujets mâles de la base de donnée CAESAR. Cette interprétation reste à valider par des experts dans le domaine de l'anthropométrie, de l'anatomie et de l'anthropologie.

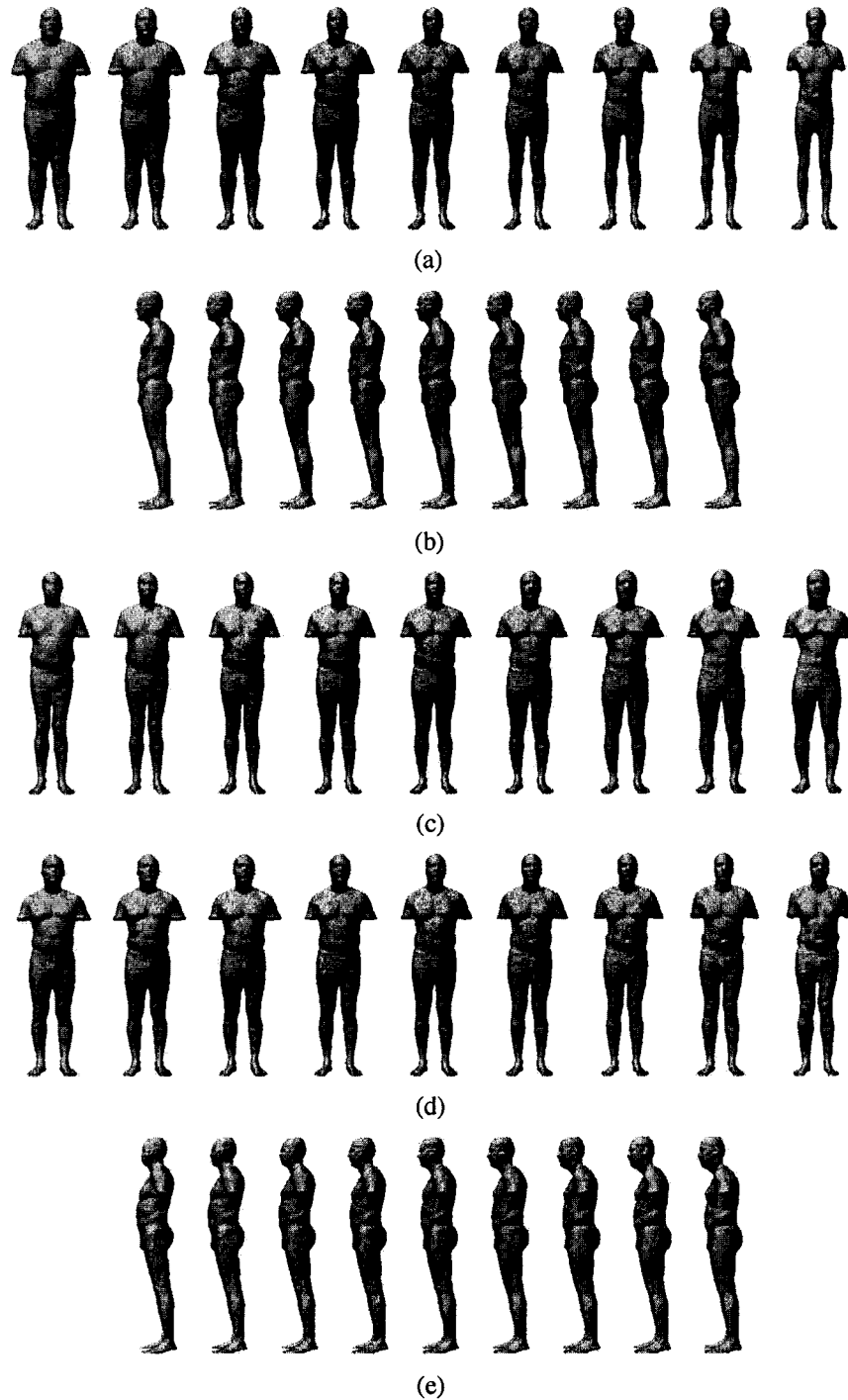


Figure 67 Les cinq premières composantes principales des modèles avec bras segmentés correspondent aux mêmes modes de variation obtenus pour les modèles normalisés et non-segmentés à l'exception des variations liées aux bras. (a) Premier mode. (b) Deuxième mode. (c) Troisième mode. (d) Quatrième mode. (e) Cinquième mode.

CONCLUSION

Au cours de ce travail de recherche, nous avons proposé une méthode qui permet d'analyser la variabilité de la forme du corps humain à partir de données anthropométriques tridimensionnelles. L'analyse est effectuée grâce au développement d'une nouvelle quantification de la forme du corps humain qui est plus riche que la quantification traditionnelle assurée par des mesures unidimensionnelles. Cette description a l'avantage d'être compacte tout en permettant la reconstruction de la forme originale. La contribution majeure apportée par notre approche réside dans le fait que l'analyse est effectuée sans recours aux points de repère anatomiques. L'acquisition de ces derniers est un processus long qui alourdit les coûts des projets de collecte de données anthropométriques.

L'analyse de la variabilité est précédée par un pré-traitement qui a pour but de fermer les trous des modèles 3D de corps humain. Ces trous, qui sont dus principalement à l'occlusion de certaines parties du corps durant la numérisation, risquent d'introduire un bruit dans le traitement des données. C'est pour cela qu'il est nécessaire de les éliminer. L'algorithme de fermeture de trous proposé se base principalement sur le découpage des modèles 3D en tranches. Ceci a pour but de réduire le problème de remplissage de trous dans des surfaces 3D à un problème de fermeture de courbes 2D. L'approche proposée utilise des hypothèses émises sur la topologie du corps humain ainsi que sur la posture prise durant la numérisation. Les résultats obtenus montrent que l'algorithme développé permet pour la plupart des régions de déduire les surfaces manquantes à partir des données mesurées. Les exceptions concernent généralement la tête, plus spécialement au niveau des oreilles, et également les pieds. Ces régions sont souvent caractérisées par un manque sévère de données. Le développement de cet algorithme nous a permis de réaliser la complexité du problème de fermeture de trous surtout dans le contexte du corps humain.

La clé du développement de la description compacte du corps humain découle de l'usage combiné de l'analyse en composantes principales et d'une représentation volumétrique

des modèles 3D de corps humain. Cette représentation, qui est basée sur la distance signée, assure une mise en correspondance des modèles 3D, ce qui permet de les analyser statistiquement sans recours aux points de repère anatomiques. Plus précisément la représentation volumétrique assure une approximation de la correspondance anatomique. La précision de cette approximation est dépendante de l'alignement des modèles 3D. L'application de l'ACP à la représentation volumétrique d'une population donnée permet d'extraire un ensemble réduit de composantes principales qui forment une base orthonormale de l'espace de forme humaine. La description compacte est constituée des coefficients de projection des modèles de la population étudiée dans la base orthonormale des composantes principales. Les résultats obtenus montrent que la forme globale des modèles est reconstruite à partir de cette description compacte.

La description obtenue constitue une véritable quantification de la forme. La compacité et la richesse de cette quantification offrent le potentiel d'être utilisée pour regrouper les individus d'une population donnée. Le regroupement permettra de définir un nouveau standard de tailles qui conviennent mieux à la population étudiée que celles déduites à partir de mesures traditionnelles. Par ailleurs, la description obtenue fait ressortir les principaux modes de variation au sein d'une population donnée. La visualisation de ces modes de variation, ainsi que les pourcentages de variation qui leur sont associés, aident les concepteurs à comprendre la variabilité de la forme au sein d'une population ciblée. Chaque mode de variation est visualisé par la génération d'une séquence de modèles virtuels qui varient uniquement selon leur projection sur la composante en question. La séquence permet d'isoler la variation de forme induite par cette composante. On propose également de visualiser des modèles réels qui sont rangés en ordre croissant de leur projection sur la composante étudiée.

La précision de la mise en correspondance fournie par la représentation volumétrique dépend de l'alignement entre les modèles 3D de corps humain. Les modèles traités tiennent une même posture. En plus les positions des pieds sont marquées sur la plate-forme du sys-

tème de numérisation. Ces conditions favorisent l'alignement entre les modèles étudiés. Pour compenser les différences de position des pieds qui persistent malgré le marquage sur la plate-forme, une phase d'alignement est appliquée aux modèles 3D. La différence de stature entre les modèles est une autre source de désalignement. C'est pour cela que l'application de l'ACP à la représentation volumétrique des modèles 3D génère des composantes qui ne semblent pas correspondre à une variation anatomique. Elles sont plutôt dues à un manque d'alignement. Afin de renforcer l'alignement entre les modèles et par la suite accroître la précision de la mise en correspondance, les statures des modèles ont été normalisées. Cette opération n'altère pas l'information sur la forme puisque la stature peut être considérée comme un simple facteur d'échelle. Afin de renforcer davantage la correspondance entre les modèles, l'ACP a été appliquée sur les modèles 3D après segmentation de leur bras. Cette opération permet d'éliminer un potentiel chevauchement entre le torse de certains modèles et les bras d'autres.

Bien que la représentation volumétrique ne fournisse qu'une approximation de la correspondance anatomique, elle permet néanmoins d'extraire des modes tels que la variation du poids et la variation de la distribution de masse entre le torse et les jambes. Cette représentation permet également de ressortir des modes qui reflètent une variation de posture.

Nous avons concentré notre propre interprétation sur les cinq premiers modes de variation extraits avec stature originale des modèles, stature normalisée et bras segmentés. Les autres modes correspondent à des variations complexes. Leur interprétation requiert une expertise dans les domaines de l'anthropométrie, de l'anatomie et de l'anthropologie physique.

Travaux futurs

Les extensions possibles à ce travail de recherche sont :

- Amélioration de l'algorithme de remplissage des trous : Pour déterminer la façon optimale de connecter les extrémités des trous, toutes les possibilités valides sont

explorées. Ce processus est long et sa faisabilité limite le nombre de points à traiter. L'utilisation d'un algorithme d'optimisation sous contraintes permettra d'améliorer les performances de l'approche proposée. Les algorithmes basés sur la théorie des graphes est une possibilité à explorer.

Il serait également intéressant d'approcher les données manquantes par des B-splines plutôt que des courbes de Bézier.

- Utilisation des coefficients de projection des modèles dans la base des composantes principales pour le regroupement des individus d'une population donnée.
- Les premiers modes de variation visualisés correspondent à une véritable variation de la forme. Pour le reste des composantes, il est difficile de différencier entre les variations de forme authentiques de celles qui sont induites par le manque de correspondance ou par la variation de posture. D'une part il sera intéressant de collaborer avec des experts dans le domaine de l'anthropométrie pour mieux interpréter les modes de variation extraits. D'autre part, l'application de notre approche ainsi que celles qui utilisent les points de repère anatomiques sur les mêmes modèles 3D permettront de différencier les composantes significatives de celles qui sont bruitées. Dans les futurs projets de numérisation, il serait important de prendre des mesures rigoureuses afin d'imposer une posture unique aux sujets à numériser.
- Les approches qui se basent sur les points de repère anatomiques déforment la surface polyédrique d'un modèle générique de corps humain pour l'ajuster aux modèles numérisés. La déformation est entre autres guidée par les points de repère anatomiques qu'on a évité d'utiliser. Si les modèles sont alignés et normalisés, la déformation du modèle générique pourra se faire sans utilisation des points de repère anatomiques. Cette approche a le potentiel de fournir une meilleure approximation de la correspondance anatomique que la représentation volumétrique sans recours aux points de repère.

ANNEXE 1

FILTRE DE TAUBIN

L'algorithme de Taubin est basé sur une généralisation de l'analyse de Fourier aux signaux de graphe définis par les sommets de surfaces polyédriques. Ces dernières sont représentées par un graphe $G = (V, E)$ où V est l'ensemble des sommets de la surface polyédrique et E regroupe les arrêtes qui les connectent. Un signal de graphe est représenté par une matrice $x = (x_1, \dots, x_n)^t$ où chaque ligne x_i représente les coordonnées du sommet i de la surface polyédrique. L'analyse de Fourier est un outil classique pour le filtrage des signaux. Taubin propose d'étendre cette analyse aux signaux de surface polyédrique en se basant sur l'observation que le calcul de la transformée de Fourier discrète d'un signal est équivalent à sa décomposition en une combinaison linéaire des vecteurs propres de l'opérateur Laplacien. Pour les signaux de graphe, ce dernier est défini par :

$$\Delta x_i = \sum_{j \in i^*} w_{ij} (x_j - x_i).$$

Où i^* représente l'ensemble des sommets qui sont connectés au sommet i et les coefficients de pondération w_{ij} sont des réels non négatifs vérifiant $\sum_{j \in i^*} w_{ij} = 1$. Ces coefficients peuvent être choisis de plusieurs façons. Toutefois pour conserver la linéarité de l'algorithme, ils doivent être indépendants du signal x . Le choix de $w_{ij} = 1/|i^*|$ est une possibilité simple qui est valide si la longueur des arêtes de la surface polyédrique est assez uniforme.

Les coefficients de pondération w_{ij} sont organisés dans une matrice W . Soit $K = I - W$ avec I la matrice identité. L'opérateur Laplacien appliqué à un signal de graphe peut être formulé comme $\Delta x = -Kx$. Les valeurs propres de la matrice K sont réelles et vérifient $0 < k_1 < k_2 < \dots < k_n < 2$. Un signal de graphe x peut être formulé comme une combinaison linéaire des vecteurs propres de K comme suit :

$$x = \sum_{i=1}^n \hat{x}_i e^i \tag{1.1}$$

avec \hat{x}_i représentant les coefficients de la transformée de Fourier discrète du signal. Les vecteurs propres de la matrice K peuvent être considérés comme les modes naturels de vibration et les valeurs propres qui leur correspondent représentent les fréquences naturelles qui leur sont associées. Les faibles valeurs propres de la matrice K correspondent aux basses fréquences et celles élevées représentent les hautes fréquences.

Pour éliminer le bruit, il suffit de calculer le signal de la surface en tant que combinaison linéaire des vecteurs propres de la matrice K en éliminant les termes correspondant aux hautes fréquences. Toutefois les surfaces étudiées sont caractérisées par un grand nombre de sommets, ce qui rend le calcul des valeurs et des vecteurs propres de la matrice K infaisable. Une alternative pour filtrer le signal consiste à atténuer les termes correspondant aux hautes fréquences par une fonction de transfert $f(k)$ comme suit :

$$x' = \sum_{i=1}^n f(k_i) \hat{x}_i e^i \quad (1.2)$$

Le choix d'une fonction f polynomial implique que le filtrage est équivalent à $x' = f(K)x$. Il se réduit alors à approcher la fonction de transfert f_{pb} d'un filtre passe-bas idéal sur l'intervalle $[0, 2]$.

$$f_{pb} = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq k \leq k_{bp} \\ 0 & \text{pour } k_{bp} \leq k \leq 2 \end{cases}$$

avec k_{pb} représente la bande passante de la fonction de transfert.

Le filtre le plus simple qui satisfait la contrainte de complexité linéaire est le filtre Laplacien. Ce dernier est un processus itératif tel que durant toute itération, chaque sommet de la tessellation est déplacé au barycentre de ses voisins. L'inconvénient du filtre Laplacien est qu'il introduit un rétrécissement de la surface qui tend à converger vers son centre de gravité. En effet, une itération du filtre Laplacien est équivalente à $x_1 = x + \lambda \Delta x = (I - \lambda K)x$ avec $0 < \lambda < 1$ est un facteur qui contrôle la diffusion du processus. Après N itérations, le

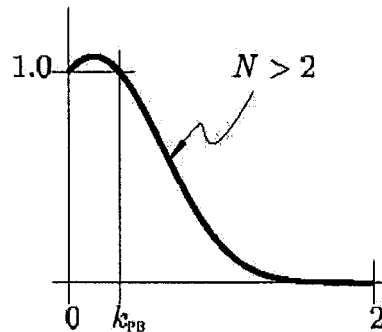


Figure 68 Graphe de la fonction de transfert $((1 - \lambda k)(1 - \mu k))^{N/2}$ pour $N > 2$

filtre Laplacien correspond à l'application de la fonction de transfert $f(K) = (1 - \lambda K)^N$. Le rétrécissement observé sur les surfaces est dû au fait que cette fonction de transfert ne correspond pas à un filtre passe bas puisque :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (1 - \lambda k)^N = \begin{cases} 1 & \text{for } k = 0 \\ 0 & \text{for } 0 < k \leq 2 \end{cases}$$

Taubin propose de remédier au rétrécissement en utilisant la fonction de transfert

$$f_N(k) = ((1 - \lambda k)(1 - \mu k))^{N/2} \text{ avec } 0 < \lambda \text{ et } \mu < -\lambda \quad (1.3)$$

Ce filtre est similaire au filtre Laplacien mais alterne entre deux valeurs du facteur de diffusion. Le deuxième terme de la fonction de transfert compense le rétrécissement introduit par le premier terme. La fonction de transfert de l'équation 1.3 correspond à un filtre passe-bas comme le montre la figure 68. Toutefois un grand nombre d'itération est requis pour accélérer la décroissance de la réponse du filtre après la bande passante.

Taubin a proposé une autre approximation du filtre passe-bas qui se base sur les polynômes de Chebyshev [23]. Le filtre décroît plus rapidement vers 0 après la bande passante. La fonction de transfert est obtenue par troncature de la série de Fourier du filtre passe bas

idéal défini par :

$$H_{pb} = \begin{cases} 1 & \text{if } |\theta| < \theta_{bp} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

avec $k_{pb} = 2 * (1 - \cos(\theta_{pb}))$. Puisque $H_{pb}(\theta)$ est une fonction paire, sa série de Fourier s'exprime seulement en terme de cosinus :

$$h_{pb} = h_0 + 2 \sum_{n=0}^{\infty} h_n \cos(n\theta)$$

avec

$$h_n = \begin{cases} \theta_{bp}/\pi & n = 0 \\ \sin(n\theta_{bp})/(n\pi) & n > 1 \end{cases}$$

En utilisant l'égalité $\cos(n\theta) = T_n(\cos(\theta))$ et le changement de variable $k = 2(1 - \cos(\theta))$, l'approximation de H_{pb} par un polynôme d'ordre N est donnée par :

$$f_N(k) = \frac{\theta_{pb}}{\pi} T_0(1 - k/2) + \sum_{n=1}^N \frac{2\sin(n\theta_{pb})}{n\pi} T_n(1 - k/2) \quad (1.4)$$

avec T_n étant le n-ième polynôme de Chebyshev défini par :

$$T_n(w) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ w & n = 1 \\ 2wT_{n-1}(w) - T_{n-2}(w) & n > 1 \end{cases}$$

La troncature directe de la série de Fourier génère une fonction de transfert avec des oscillations avant et après la fréquence de coupure comme le montre la figure 69. De plus, la valeur moyenne (centroïde du signal) n'est pas préservée. Cette fonction de transfert n'est pas adéquate car le filtre désiré doit être le plus proche possible de 1 à l'intérieur de la bande passante et décroître vers zéro après la bande passante.

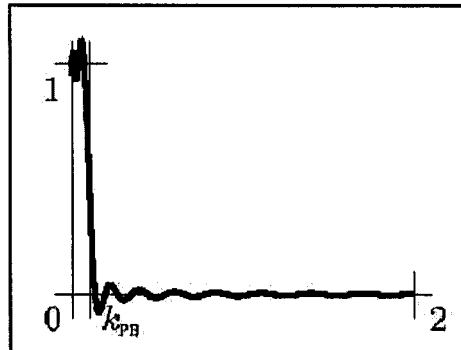


Figure 69 Effet de la troncature directe de la série de Fourier d'un filtre passe-bas idéal

Afin de contrôler la convergence de la série de Fourier, une fonction de pondération est utilisée pour modifier les coefficients de Fourier. Ainsi le polynôme d'approximation du filtre passe bas est formulé comme suit :

$$f_N(k) = \omega_0 \frac{\theta_{pb}}{\pi} T_0(1 - k/2) + \omega_n \sum_{n=1}^N \frac{2 \sin(n\theta_{pb})}{n\pi} T_n(1 - k/2) \quad (1.5)$$

Les coefficients ω_n définissent une fenêtre pour la troncature de la série de Fourier. La transformée de Fourier de la fenêtre doit avoir des lobes secondaires qui sont relativement négligeables. L'approximation polynomiale de l'équation 1.4 correspond au cas d'une fenêtre rectangulaire. D'autres fenêtres comme celles de Hanning, Hamming et Blackman sont plus adaptées à la contrainte car un grand pourcentage de leur énergie est contenu dans le lobe principal.

$$w_n = \begin{cases} 1 & \text{Rectangulaire} \\ 0.5 + 0.5 \cos(n\pi/(N+1)) & \text{Hanning} \\ 0.54 + 0.46 \cos(n\pi/(N+1)) & \text{Hamming} \\ 0.42 + 0.5 \cos(n\pi/(N+1)) + 0.08 \cos(2n\pi/(N+1)) & \text{Blackman} \end{cases}$$

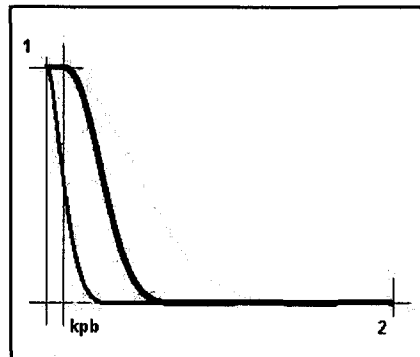


Figure 70

Fonctions de transfert de filtres passe-bas. La courbe en noir gras correspond à la troncature de la fonction de transfert d'un filtre passe-bas idéal avec une fenêtre de Hamming, $N = 20$ et $\sigma = 0,2327$. La courbe en noir mince correspond à la même fenêtre avec $\sigma = 0$. La courbe en gris correspond à la fonction de transfert $((1 - \lambda k)(1 - \mu k))^{N/2}$ pour $N = 20$ et $\lambda = 0,5$.

Soit σ la largeur du lobe principale de la transformée de Fourier de la fenêtre. Le filtre défini par l'équation 1.5 est approximativement égal à 1 à l'intérieur de l'intervalle $[0, \theta_{pb} - \sigma]$, presque égal à zéro dans l'intervalle $[\theta_{pb} + \sigma, \pi]$ et décroissant dans l'intervalle $[\theta_{pb} - \sigma, \theta_{pb} + \sigma]$. Afin de forcer le filtre à avoir une valeur presque égale à 1 dans l'intervalle $[0, \theta_{pb}]$, le changement suivant est effectué :

$$f_N(k) = \omega_0 \frac{(\theta_{pb} + \sigma)}{\pi} T_0(1 - k/2) + \omega_n \sum_{n=1}^N \frac{2 \sin(n\theta_{pb} + \sigma)}{n\pi} T_n(1 - k/2) \quad (1.6)$$

L'algorithme de Newton de recherche de racines est utilisé pour déterminer σ qui maximise $f_N(k_{bp})$ sous la contrainte $|f_N(k)| < 1$ pour $k_{pb} < k < 2$. Taubin a montré que le choix d'une fenêtre de Hamming, d'un nombre d'itération $N = 20$ et d'un $\sigma = 0,2327$ donne une approximation rapide et efficace d'un filtre passe bas comme le montre la figure 70. Il a également rapporté que le choix d'une bande passante $k_{bp} = 0,1$ préserve un grand pourcentage de l'énergie des larges surfaces.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. Allen, B. Curless, and Z. Popovic ;. The Space of Human Body Shapes : Reconstruction and Parametrisation from Range Scans. *ACM Transactions on Graphics (ACM SIGGRAPH'2003)*, 22(3) :587–594, 2003.
- [2] B. Allen, B. Curless, and Z. popovic. <http://grail.cs.washington.edu/projects/digital-human/pub/allen04exploring.html>, 2004.
- [3] B. Allen, B. Curless, and Z. Popovic. Exploring the Space of Human Body Shapes : data-driven synthesis under anthropometric control. In *Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference*, Rochester, MI, June 2004.
- [4] Z. Ben Azouz, M. Rioux, and R. Lepage. 3D Description of the Human Body Shape : Application of Karhunen-Loève Expansion to the CAESAR database. In *Proceedings of the 16th International Congress and Exhibition of Computer Assited Radiology and Surgery*, pages 571–576, Paris, France, June 2002.
- [5] Z. Ben Azouz, M. Rioux, and R. Lepage. 3D Description of the Human Body Shape Using Karhunen-Loève Expansion. In *Proceedings of the International Workshop on 3D digitization*, Singapore, February 2002.
- [6] Z. Ben Azouz, M. Rioux, R. Lepage, and C. Shu. Compact Description of Human Body Shape Using Extended Hyperquadrics. In *Proceedings of the 15th Triennial Congress of the International Ergonomics Association(IEA 2003)*, Seoul, Korea, August 2003.
- [7] Z. Ben Azouz, M. Rioux, R. Lepage, and C. Shu. Description compacte de la forme du corps humain par des hyperquadriques étendues. In *Proceedings of Traitements et Analyse d'Informations Méthodes et Applications (TAIMA'2003)*, pages 281–286, Hammamet, Tunisia, September 2003.
- [8] Z. Ben Azouz, M. Rioux, C. Shu, and R. Lepage. Analysis of the Human Shape Using Volumetric Techniques. In *Proceedings of the Computer Animation and Social Agents Conference (CASA 2004)*, pages 197–206, Geneva, Switzerland, July 2004.
- [9] Z. Ben Azouz, M. Rioux, C. Shu, and R. Lepage. Characterizing human shape variation using 3-d anthropometric data. *Visual Computer Journal*, Accepted April 2005.

- [10] Z. Ben Azouz, C. Shu, R. Lepage, and M. Rioux. Extracting Main Modes of Human Shape Variation from 3-D Anthropometric Data. In *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'05)*, Ottawa, Canada, June 2005.
- [11] P. Bapu, M. Korna, and J. McDaniel. User's guide for combiman programs (computerized biomechanical man-model), version 6. Technical Report AFAMRL 83-097, Wright- Patterson AFB, OH : Air Force Aerospace Medical Research Laboratory, 1983.
- [12] V. Blanz and T. Vetter. A Morphable model for the Synthesis of 3d Faces. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 187–194. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999.
- [13] G. Borgefors. Distance Transformations in Arbitrary Dimensions. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 27 :321–345, 1984.
- [14] M.A. Brunsman, H.M. Daanen, and K.M. Robinette. Optimal Postures and Positioning for Human Body Scanning. In *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'97)*, pages 266–274, Ottawa, Canada, May 1997.
- [15] D. Burnside, M. Boehmer, and K.M. Robinette. 3-D Landmark Detection and Identification in the Caesar Project. In *Proceedings of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'2001)*, pages 393–398, Quebec City, Canada, May 2001.
- [16] P.E. Bézier. *Numerical Control - Mathematics and Applications*. John Wiley and Sons, London, 1972.
- [17] J.C. Carr, R.K. Beatson, J.B. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, and T.R. Evans. Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001*, pages 67–76, 2001.
- [18] I. Cohen and L.D. Cohen. A Hybrid hyperquadric model for 2-d and 3-d data fitting. *Computer Vision and Image Understanding*, 63(3) :527–541, 1996.
- [19] B. Corner and A. Hu. Effects of Sway on Image Fidelity in whole Body Digitizing. In *Proceedings of the Three-Dimensional Image Capture and Applications, SPIE*, volume 3313, pages 90–101, San Jose, CA, January 1998.
- [20] Cyberware. <http://www.cyberware.com>, 2004.

- [21] P.E Danielsson. Euclidean Distance Mapping. *Computer Graphics and Image Processing*, 14 :227–248, 1980.
- [22] J. Davis, S.R. Marschner, M. Garr, and M. Levoy. Filling Holes in Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion. In *Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, pages 428–438, Padua, Italy, June 2002.
- [23] P.J. Davis. *Interpolation and Approximation*. Dover Publications, 1975.
- [24] L. Dekker. *3D Human Body Modelling from Range Data*. PhD thesis, Departement of Computer Science, University College London, 2000.
- [25] L. Dekker, I. Douros, B.F. Buxton, and P. Treleaven. Building Symbolic Information for 3D Human Body Modeling from Range Data. In *Proceedings of the Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'99)*, pages 388–397, Ottawa, Canada, October 1999.
- [26] K. Fukunaga. *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. Academic Press, New York, 1972.
- [27] G.R. Geisen, C.P. Mason, V.L. Houston, J.J. Whitestone, B.K. McQuiston, and A.C. Beattie. Automatic Detection, Identification and Registration of Anatomical Landmarks. In *Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, volume 2, pages 750–753, San Diego, 1995.
- [28] J.C. Gower. Generalized Procrustes Analysis. *Psychometrika*, 40 :33–51, 1975.
- [29] S. Han, D.B. Goldgof, and K.W. Bowyer. Using hyperquadrics for shape recovery from range data. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision*, pages 492–496, Berlin, Germany, may 1993.
- [30] A. Hanson. Hyperquadrics : smoothly deformable shapes with convex polyhedral bounds. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 44(2) :191–210, 1988.
- [31] C. Horiguchi. BL (Body Line) scanner. The development of a new 3-d measurement and reconstruction system. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume 32, pages 421–429, Hakodate, Japan, 1998.
- [32] J.T. Hutton, B.F. Buxton, and P. Hammond. Dense Surface Point Distribution Models of the Human Face. In *Proceedings of IEEE Workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis*, pages 153–160, Kaurai, Hawaii, December 2001.
- [33] InnovMetric Inc. <http://www.innovmetric.com>, 2004.

- [34] A. Jaklic, A. Leonardis, and F. Solina. Segmentation and Recovery of Superquadrics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(11) :1289–1295, 1997.
- [35] M.W. Jones. The Production of Volume Data from Triangular Meshes Using Voxelization. *Computer Graphics Forum*, 15(5) :311–318, 1996.
- [36] P.R. Jones, G.M. West, D.H. Harris, and J.B. Read. The Loughborough Anthropometric Shadow Scanner. *Endeavour, New Series*, 13(4) :162–168, 1989.
- [37] X. Ju, N. Werghi, and J.P. Siebert. Automatic Segmentation of 3D Human Body Scans. In *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Imaging (CGIM 2000)*, pages 239–244, Las Vegas, USA, November 2000.
- [38] A. Kaufman. An Algorithm for 3D Scan Conversion of Polygons. In *Proceedings of EUROGRAPHICS'87*, pages 197–208, Amsterdam, North Holland, August 1987.
- [39] A. Kaufman. *Volume Visualization (Tutorial)*. IEEE computer Society Press, 1991.
- [40] D. Keren and C. Gotsman. Fitting Curves and Surfaces with Constrained Implicit Polynomials. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(1) :31–41, 1999.
- [41] M. Kirby and L. Sirovich. Application of the Karhunen-Loeve Procedure for the Characterisation of Human Faces. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(1) :103–108, 1990.
- [42] J.V. Kittler and J. Illingworth. Relaxation labelling algorithms-a review. *Image and Vision Computing*, 3(4) :206–216, November 1985.
- [43] M. Kouchi and M. Mochimaru. Analysis of 3-d Human Face Form an Spectacle Frames Based on Average Forms. In *Proceedings of the Digital Human Modeling Conference*, pages 69–89, Munich, Germany, June 2002.
- [44] S. Kumar, S. Han, D. Goldgof, and K. Bowyer. On recovering hyperquadrics from range data. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(11) :1079–1083, 1995.
- [45] L. Lebart, A. Morineau, and M. Piron. *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Dunod, 3e edition, 2000.
- [46] F.A. Lewark and J.H. Nurre. Automated Fiducial Labeling on Human Body Data. In *Proceedings of the Three-Dimensional Image Capture and Applications, SPIE*, volume 3313, pages 82–89, San Jose, CA, January 1998.

- [47] W.E. Lorensen and H.E. Cline. Marching Cubes : A High Resolution 3-D Surface Construction Algorithm. In *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, volume 21, pages 163–169, July 1987.
- [48] G.G. Lorentz. *Bernstein Polynomials*. Chelsea Publishing Company, New York, 1986.
- [49] ADAM : Advanced Dynamic Anthropomorphic Manikin. <http://www.ftss.com/pcat/products.cfm?obr=NS&bm=4&pcat=1adam>, 2004.
- [50] M. Mochimaru and M. Kouchi. Shoe Customization on 3D Deformation of Digital Human. *The Engineering of Sport*, 4 :595–601, 2002.
- [51] M. Mochimaru, M. Kouchi, and M. Dohi. A New Method for Evaluating Similarity and the Classification of the 3D Human Body Shape Based on the FFD Technique. In *Proceedings of the 13th Triennial Congress of the International Ergonomics Association*, volume 2, pages 382–384, Tampere, Finland, June 1997.
- [52] M. Mochimaru, M. Kouchi, and M. Dohi. Analysis of 3-d Human Foot Form Using the Free Form Deformation Method and its Application in Grading Shoe Lasts. *Ergonomics*, 43(9) :1301–1313, 2000.
- [53] H.P. Moreton and C.H. Séquin. Functional Optimization for Fair Surface Design. In *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 167–176, July 1992.
- [54] S. Muraki. Volume Data and Wavelet Transforms. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 13(4) :50–56, July 1993.
- [55] F.S. Nooruddin and G. Turk. The Production of Volume Data from Triangular Meshes Using Voxelization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 9(2) :191–205, June 2003.
- [56] J.H. Nurre. Locating Landmarks on Human Body Scan Data. In *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'97)*, pages 289–295, Ottawa, Canada, May 1997.
- [57] J.H. Nurre and S. Addleman. 3D Scan Systems Integration. Technical Report A682743, Ohio University, 1998.
- [58] M. Ohuchi and T. Saito. Three-dimensional shape modeling with extended hyperquadrics. In *Proceedings of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'2001)*, pages 262–269, Quebec City, Canada, May 2001.

- [59] E. Paquet, K.M. Robinette, and M. Rioux. Management of Three-Dimensional and Anthropometric Databases : Alexandria and Cleopatra. *Journal of Electronic Imaging*, 9 :421–431, 2000.
- [60] R.P. Pargas, N.J. Staples, and J.S. Davis. Automatic Measurement Extraction for Apparel from a Three-Dimensional Body Scan. *Optics and Lasers in Engineering*, 28(2) :157–172, 1997.
- [61] A.P. Pentland. Perceptual Organization and the Représentation of Natural Form. *Artificial Intelligence*, 28(3) :293–331, 1986.
- [62] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, and W.T. Vetterling. *Numerical Recipes in C++ : The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York, 2nd edition, 1992.
- [63] J. Ranke. Verständigung über ein gemeinsames cranio-metrisches verfahren (frankfurterverständigung). *Archiver Anthropologie*, 15 :1–8, 1884.
- [64] G. Reeb. Sur les points singuliers d’une forme de Pfaff complètement intégrable ou d’une fonction numérique. *Comptes Rendus Acad. Sciences Paris*, 222 :847–849, 1946.
- [65] M. Rioux. Fundamental limits of optical 3d digitizing systems for the measurement of the human body. In *Proceedings of the workshop on 3D Anthropometry and Industrial Products Design*, pages 311–316, Paris, France, June 1998. Université Paris V, Laboratoire d’Anthropologie Appliquée.
- [66] K.M. Robinette. Fit Testing as a Helmet Development Tool. In *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, volume 1, pages 69–73, Santa Monica, California, 1993.
- [67] K.M. Robinette. 3-D Fit Mapping. In *Proceedings of the International Ergonomics Association XIVth Triennial Congress (IEA 2000) and the 44th Annual Meeting of Human Factors and Ergonomics Society*, San Diego, CA, July 2000.
- [68] K.M. Robinette, H.M. Daanen, and E. Paquet. The Caesar Project : A 3-D Surface Anthropometry Survey. In *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM’99)*, pages 380–386, Ottawa, Canada, October 1999.

- [69] K.M. Robinette, M.W. Vannier, M. Rioux, and P.R.M. Jones. 3-D surface anthropometry : Review of technologies = L'anthropométrie de surface en trois dimensions : examen des technologies. In *Neuilly-sur-Seine : North Atlantic Treaty Organization Advisory Group for Aerospace Research & Development, Aerospace Medical Panel*, 1997.
- [70] A. Rosenfeld and J.L. Pfaltz. Distance Functions on Digital Pictures. *Pattern Recognition*, 1(1) :33–61, 1968.
- [71] T.W. Sederberg and S.R. Parry. Free-form Deformation of Solid Geometric Models. In *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, volume 20, pages 151–160, New York, NY, USA, 1986.
- [72] H. Seo and N. Magnenat-Thalmann. An Automatic Modeling of Human Bodies from Sizing Parameters. In *Proceedings of the 2003 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 19–26, July 2003.
- [73] W.H. Sheldon, S.S. Stevens, and W.B. Tucker. *The Varieties of Human Physique : An Introduction to Constitutional Psychology*. Hafer, New York, 1940.
- [74] M. Soucy and D. Laurendeau. A General Surface Approach to the Integration of a Set of Range Views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(4) :344–358, 1995.
- [75] N. Stein and B. Minge. Viro 3d : Fast three-dimensional full-body scanning for humans and other living objects. *Proceedings of SPIE*, 3313 :60–64, 1998.
- [76] M.V. Stralen. Towards a Human Specific Hole Filling tool box for 3D Body Scans. Master's thesis, Utrecht University, Institute of Information and Computing Sciences, 2003.
- [77] M.V. Stralen, H.A.M. Daanen, and J.W.H. Tangelder. A Tool Box to Identify Holes in 3D Human Body Scans. In *Proceedings of the 15th Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2003)*, Seoul, Korea, August 2003.
- [78] S. Sullivan, L. Sandford, and J. Ponce. Using Geometric Distance Fits for 3-D Object Modeling and Recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(12) :1183–1196, 1994.
- [79] A. Tahan, B.F. Buxton, M.C. Ruiz, and J. Bougourd. Point Distribution Models of Human Body Shape from a Canonical Representation of 3D Scan Data. In *Proceedings of Numérisation 3D - Scanning, 3D Human Digitizing and Modelling*, Paris, France, April 2003.

- [80] Y.C. Tai, S.P. Chao, and S.N. Yang. Automatic Detection and Labeling of Anatomical Landmarks on Virtual Human Model from 3D Laser Digitizer. In *Proceedings of the International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, 2002.
- [81] G. Taubin, F. Cukierman, S. Sullivan, J. Ponce, and D.J. Kriegman. Parameterized families of polynomials for bounded algebraic curve and surface fitting. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(3) :287–303, 1994.
- [82] G. Taubin, T. Zhang, and G.H. Golub. Optimal Surface Smoothing as Filter Design. In *Proceedings of the 4th European Conference on Computer (ECCV'96)*, volume 1, pages 283–292, Cambridge, UK, April 1996.
- [83] TC2. <http://www.tc2.com/>, 2004.
- [84] G. Turk and M. Levoy. Zippered Polygon Meshes from Range Images. In *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 311–318, 1994.
- [85] C.C.L. Wang, T.K.K. Chang, and M.M.F. Yuen. From Laser-Scanned Data to Feature Human Model : A System Based on Fuzzy Logic Concept. *Computer Aided Design*, 35 :241–253, 2003.
- [86] S.W. Wang and A. Kaufman. Volume sampled voxelization of geometric primitives. In *Proceedings of the 4th conference on Visualization'93*, pages 78–84, San Jose, CA, October 1993.
- [87] W. Welsh and A. Witkin. Variational Surface Modeling. *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH'92)*, pages 157–166, 1992.
- [88] W. Welsh and A. Witkin. Free-form Shape Design Using Triangulated Surfaces. *Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH'94)*, pages 247–256, 1994.
- [89] Wicks and Wilson Ltd. <http://www.wwl.co.uk>, 2004.
- [90] Y. Xiao, J.P. Siebert, and N. Werghi. Topological Segmentation of Discrete Human Body Shapes in Various Postures Based on Geodesic Distance. *The 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04)*, IEEE Computer Society Press, pages 131–135, 2004.
- [91] F.W. Young and R.M. Hamer. *Multidimensional scaling : History, theory and applications*. Hillsdale, N.J. : Lawrence Erlbaum Assoc, 1987.