

Algoritmos de reconstrucción de superficies 3D para modelaje antropométrico

O. Ruiz Salguero; R. Schrader Gil; J. Acosta Duarte
Centro Interdisciplinario de Investigación (CII) en CAD / CAM / CG
Universidad EAFIT
A.A. 3300, Medellín, COLOMBIA
E-mail: oruiz@eafit.edu.co; Tel.: +57(4)266-0500; Fax.: +57(4)266-4284

1. Resumen

Los protocolos de medición antropométrica se caracterizan por la profusión de medidas discretas o localizadas, en un intento para caracterizar completamente la forma corporal del sujeto. Dichos protocolos se utilizan intensivamente en campos como medicina deportiva, forense y/o reconstructiva, diseño de prótesis, ergonomía, en la confección de prendas, accesorios, etc. Con el avance de algoritmos de recuperación de formas a partir de muestreos (digitalizaciones) la caracterización antropométrica se ha alterado significativamente. El artículo presente muestra el proceso de caracterización digital de forma corpórea, incluyendo los protocolos de medición sobre el sujeto, el ambiente computacional -DigitLAB- (desarrollado en el CII-CAD-CAM-CG de la Universidad EAFIT) para recuperación de superficies, hasta los modelos geométricos finales. Se presentan comparaciones de los resultados obtenidos con DigitLAB y con paquetes comerciales de recuperación de forma 3D. Los resultados de DigitLAB resultan superiores, debido principalmente al hecho de que este toma ventaja de los patrones de las digitalizaciones (planares de contacto, por rejilla de pixels - range images -, etc.) y provee módulos de tratamiento geométrico - estadístico de los datos para poder aplicar efectivamente los algoritmos de recuperación de forma. Se presenta un caso de estudio dirigido a la industria de la confección, y otros efectuados sobre conjuntos de prueba comunes en el ámbito científico para la homologación de algoritmos.

2. Abstract

The protocols of anthropometric measures are characterized by the profusion of discreet or located measures, in an attempt to completely characterize the subject's shape. These protocols are used intensively in fields such as sports, forensic y/o reconstructive medicine, prosthesis design, ergonomics, garment and accessories industry, etc. With the advance of algorithms of shape recovery starting from samplings (digitization) the anthropometric characterization has changed significantly. This article presents the process of digital characterization of corporeal form, including the measurement protocols performed on the subject, the computational environment - DigitLAB - (developed in the CII-CAD-CAM-CG of the University EAFIT) for surface recovery and the final geometric models. Comparisons of the results for shape reconstruction obtained with DigitLAB and with commercial packages are presented. The results of DigitLAB are superior, due mainly to the fact that it takes advantage of the patterns of the digitalization (contact, planar, pixels grill - range images -, etc.), and provides modules of geometric - statistical treatment of the data that enable effective application of the algorithms of shape reconstruction. A case of study directed to the garment industry is presented, as well as others on data sets which are common in the scientific community for landmarking of algorithms.

3. Introducción

La recuperación de forma a partir de muestreos de puntos (x,y,z) de la superficie interna y externa de objetos tiene aplicaciones no solo en diseño de productos e ingeniería inversa, sino en áreas hasta ahora más remotas como medicina, antropometría, entretenimiento, y simulación de fenómenos físicos superficiales. Las

tecnologías de muestreo permiten capturar miles de puntos en forma rápida. Sin embargo, la recuperación de la forma es todavía un objetivo lejano. Aunque existen muchos algoritmos que recuperan forma, su aplicación en ambientes industriales se ve impedida por su falta de respuesta a las diferencias funcionales del objeto, que no siempre se traducen en forma geométrica. Asimismo, se ha llegado a la conclusión de que un conjunto de herramientas de pre-proceso son tan importantes como los algoritmos de forma mismos. DigitLAB está siendo desarrollado en el CII-CAD/CAM/CG para suplir esta necesidad. Este artículo intenta ilustrar la metodología empleada por DigitLAB para la manipulación de los datos puntuales (incluyendo a las físicas) para la recuperación de superficies, hasta llegar los modelos geométricos finales. Aunque el caso de estudio aquí presentado es de una topología simple, se presenta un ejemplo no trivial de las topologías que DigitLAB es capaz de recuperar en la actualidad.

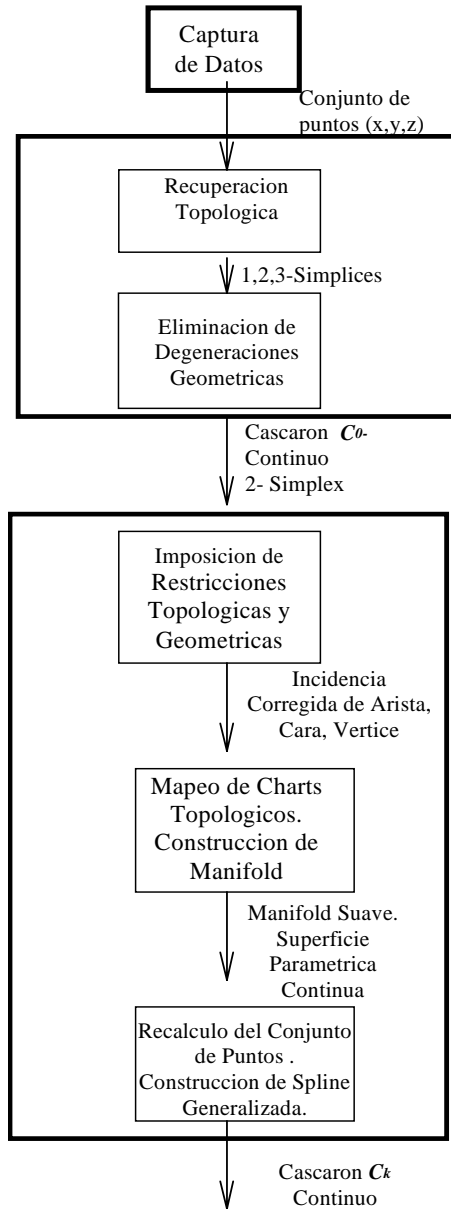


Fig. 1 – Pasos de la reconstrucción de superficies

espacios Euclidianos llamados charts mientras en su total extensión representan arreglos complejos vía las funciones de transición entre dichos charts ([10]). En este artículo, el término será usado en ambos sentidos, con un significado preciso que está claro dentro del contexto.

4.1. Captura de Datos

4. Revisión bibliográfica y antecedentes

La reconstrucción de superficies partiendo de un conjunto de puntos incluye (Fig. 1) la adquisición de datos, reconstrucción topológica, y garantía de la continuidad requerida para cada aplicación (CNC, prototipos rápidos, despliegue, cálculo de propiedades de masa, etc.). La geometría del objeto determina el tipo de muestreo y la mayor eficiencia de unos métodos sobre otros. De la misma forma los datos de salida (facetas vs. superficies paramétricas lisas, cascarones abiertos vs. cascarones cerrados, etc.) determina el proceso de reconstrucción de la superficie. El objetivo de este estudio es resaltar las tendencias más notorias en estos aspectos.

En el contexto de Modelo Geométrico, el concepto de topología se refiere a la información de conexión del grafo que es el esqueleto de un modelo 3D o 2D (caras, uniones, bordes). En contraposición, la geometría proporciona las posiciones, dimensiones y formas (curvas, superficies, los puntos) de las entidades de topología [17,12]. En un contexto paralelo, la topología expresa las propiedades de *manifolds* o superficies que localmente parecen (o puede mapearse a)

Los métodos de captura del conjunto de puntos que describen la superficie de un objeto (cuadro superior, Fig. 1) pueden ser (a) de contacto vs (b) remoto (óptica). Los métodos de contacto han alcanzado un nivel razonable de flexibilidad dada la posibilidad de usar mesa de X-Y-Z con 3 grados de libertad (dof) o un brazo digitalizador con 5 dofs. Aunque las mesas son rápidas y precisas, su aplicabilidad para objetos con rasgos cóncavos ocultos está limitada. Los brazos digitalizadores son menos exactos y más lentos, pero permiten acceder rasgos muy ocultos del objeto dada su configuración similar a un brazo de dentistería. Los métodos ópticos pueden ser pasivos o activos. Los métodos pasivos integran varias vistas del objeto procesando múltiples *range images*, mientras los activos siguen un haz de luz impactando sobre el objeto para extraer las coordenadas (x,y,z) de su superficie. En el primer caso, un conjunto grande de imágenes superpuestas son procesados simultáneamente para determinar su posición relativa e inferir las coordenadas (x,y,z) de la porción de la superficie que aparece en las fotos [16]. Aunque este método es costoso en términos de recursos computacionales, tiene la capacidad de procesar objetos muy grandes y cóncavos usando un número suficiente de *range images*. También permite muestrear sujetos vivos que no pueden sostener una posición rígida durante periodos largos. Los métodos de rastreo de luz siguen un haz de luz que viaja sobre la superficie examinada. El punto generado en la superficie por el rayo es detectado en varias vistas, y sus coordenadas (x,y,z) son extraídas. El cubrimiento depende de la capacidad del haz de luz para seguir la superficie entera del objeto, y el arreglo de la cámaras para registrar dicho recorrido. Este método tienen una complejidad mas baja que pasiva, pero está limitado para muestrear rasgos cóncavos en el objeto. Puesto que los sujetos vivos tienen dificultad sosteniendo una posición rígida es más conveniente para los objetos inertes ([3, 18]).

Otros métodos en imágenes médicas (CAT, MRI) implican la detección de tejidos del cuerpo partiendo de la diferencia en la apariencia que el hueso, músculo u órganos presentan bajo la excitación magnética o Rayos X. En estos casos el elemento básico capturado por software de medicina es un *voxel* (*volumetric pixel*), y es manejado por coordenadas espaciales o técnicas de *octrees* [24,29]) en lugar información de la superficie ([27,7]). Por consiguiente, esta técnica cae fuera del alcance de este artículo. No obstante, si la información extraída del MRI o el datos del CAT se convierte a un muestreo de contornos de órganos o huesos, el problema se convierte en uno de reconstrucción de superficies, y es pertinente a la discusión presente, como se vera mas adelante.

4.2. Topología y reconstrucción de manifold

Una vez se obtiene el muestreo del conjunto de puntos (caja 1, Fig. 1), sigue la reconstrucción de la superficie (caja 2) produciendo de esta manera un cascaron continuo facetado, C^0 -continuo ([2]). Se aplica post-procesamiento (caja 3) en algunos casos para lograr una superficie paramétrica C^2 -continua, o en otros casos para obtener una superficie C^0 -continua optimizada para las aplicaciones posteriores (FEM, visualización, etc.) [14].

Aunque en muchos casos el muestreo físico introduce un patrón para la clasificación de datos, este es un caso particular y ventajoso, y los algoritmos estudiados no usan dicha ventaja. Para recuperar información de conectividad (caja 2, Fig. 1) dos de las técnicas aplicadas son *Alfa Shapes* [8,9] y *Marching Cubes* [15]. A grandes rasgos, las *Alfa Shapes* establecen clasifican subconjuntos de puntos más cercados entre si que una distancia α . Cuando $\alpha = 0$, las *Alfa Shapes* son exactamente el conjunto original de puntos. Cuando $\alpha = \infty$, las *Alfa Shapes* son el envolvente convexo (*convex hull*) del conjunto de puntos dado. El usuario puede seleccionar un valor intermedio de α para recuperan la conectividad del conjunto de puntos en la forma de un complejo simplicial formado por simples 0, 1, 2 y 3. Aunque el resultado de esta fase es una malla topológicamente correcta, las degeneraciones geométricas (por ejemplo aristas colgantes) pueden estar presentes, y el conjunto de simples debe ser procesado nuevamente para dejar sólo simples-2 (dado que la meta inmediata es un cascarón) con geometría aceptable [11]. Realizando una labor similar a las *Alfa Shapes*, el algoritmo *Marching Cubes* construye una superficie de facetas que aproximan la superficie $f(x,y,z)=0$. Las facetas son determinadas por la intersección de la superficie con un arreglo volumétrico de celdas cubicas. A causa de esta aproximación, se puede demostrar que las facetas planas generadas tienen un número máximo de 6 lados. El resultado de ambos algoritmos (*Alfa Shapes* y *Marching Cubes*) es un cascaron de facetas planas con continuidad $C0$ entre ellas.

La etapa 3 toma un cascarón continuo C^0 correcto, y lo cubre con *charts* vértice, arista y cara para obtener un mapeo completo entre el cascaron C^0 y un manifold M . Este mapeo hace posible definir una parametrización

dependiente del *chart* que produce una superficie continua C^2 , exceptuando áreas de agujeros (donde la superficie se interrumpe totalmente). En Fig 1, la imposición de Conectividad / Geometría implica el re - cálculo de los vértices cuyo grado de incidencia es demasiado alto o caras con demasiados lados. Adicionalmente, cualquier manipulación de interpretación de información produce inmediatamente caras no planares, la corrección de la información de puntos se produce para restaurar las caras planares con el grado de incidencia correcto ([5, 6]). El resultado es una estructura topológica que ofrece condiciones correctas en los vértices, aristas y caras para la construcción de *charts*. La construcción de *charts* produce un cubrimiento de la superficie del *manifold* con parches superpuestos en el espacio paramétrico, los cuales ayudan a asegurar continuidad C^2 de superficies SPLINE generalizadas [10]. La construcción de Splines generalizadas es ayudada por el calculo de un conjunto “correcto” de puntos. Este conjunto es el mas cercano al modelo propuesto [11]. En esta referencia, [11] se menciona la insuficiencia de forzar continuidad C^k para garantizar los correctos servicios de la superficie, así como la necesidad de distribuciones de curvatura más finas y suavidad de la superficie por tramos.

4.3. Estadísticas y técnicas de minimización

La estadística para el procesamiento de nubes de puntos muestreados (x, y, z) típicamente actúa en: (i) Formular y probar la hipótesis de planaridad, cilíndricidad, perpendicularidad, etc., ([1,4]) vitales en áreas como metrología. (ii) Converger a hipótesis verosímiles sobre los puntos físicos sobre la superficie a partir de información incompleta del muestreo, por ejemplo (x_{foto}, y_{foto}) de imágenes parcialmente superpuestas ([16]). En cada paso, se aplica una aproximación cuadrada para encontrar la mejor transformación entre las imágenes i y j . (iii) Crear un conjunto de puntos alternativos al conjunto físico del muestreo, satisfaciendo el criterio del representatividad del punto original por el generado. [11] calcula los puntos de control mas aceptable para generar una superficie B-spline difiriendo lo menos posible de la *Alfa Shapes* C^0 -continua del muestreo de puntos. [13] toma los k los puntos más próximos dentro de la digitalización y halla su mejor (en el sentido estadístico) plano representativo. Los planos se usan para definir la superficie *manifold* en R^3 llamada superficie “zero” $(f(p) = 0)$, $Z(f)$ ($Z(f) = \{p \in R^3 / f(p)=0\}$) que permite aplicar el algoritmo *Marching Cubes* para obtener el cascarón C^0 continuo.

4.4. Heurísticas en reconstrucción de superficies

Szeliski ([26]) parte de la suposición de que muchas superficies formadas en procesos naturales minimizan una función potencial entre las partículas que las forman. Tomando la derivado del potencial inter-partícula de las fuerzas y torques que actúan sobre las partículas se computa la sucesión de estados que un conjunto inicial de partículas sufriría bajo la acción de los potenciales. El conjunto inicial también es aumentado creando nuevos puntos cuando hay sectores despoblados. Cada punto lleva un sistema coordinado asociado, y algunos puntos se consideran fijos durante el proceso (sistema coordinado estático). El artículo no hace referencia a los criterios para establecer puntos fijos, y dado su objetivo, no atiende la recuperación de superficies que no son el resultado de procesos naturales (por ejemplo procesos de fabricación).

4.5. Conclusiones de revisión bibliográfica

La premisa básica para que la recuperación de una superficie a partir de una nube de puntos es que la digitalización se haya realizado con un intervalo de, a lo mas, la mitad de la dimensión mínima de geometría de interés en el cuerpo (criterio de Nyquist). Dicho criterio, básico en control digital, es una condición necesaria para la corrección de los algoritmos presentados en este artículo y en otros ([9], [13]). Por otro lado, de la literatura examinada es evidente que las técnicas automáticas que apuntan a un ajuste global (C^0 , C^1 o C^2) de la superficie no responden a los problemas de continuidad mixta, ruido local, zonas funcionales, o el uso de espacios paramétricos locales [11,28].

Dadas las premisas anteriores, es evidente que un tratamiento de digitalizaciones para propósitos industriales debe contar con varios módulos de soporte colaterales. Dichos módulos deben tener varias condiciones: (i) diagnosticar, corregir y/o modificar los datos de entrada, (ii) realizar esas modificaciones sobre el vecindario deseado (posiblemente nombrado y fácilmente accesible) y (iii) permitir una aplicación asíncrona (sin sucesión rígida) de dichas herramientas. Por ejemplo, los filtros pueden aplicarse antes o después de dividir o de emplear herramientas de identificación de esquinas, etc. Obviamente, los resultados de la aplicación dependen del orden seguido, pero dicho orden es definido dinámicamente por el usuario que decide a su vez basado en la naturaleza

de la digitalización. Las herramientas desarrolladas y el sistema que garantiza consistencia de datos en su aplicación - junto con la de recuperación topología y modificaciones, DigitLAB - es el enfoque principal de esta investigación. Un antepasado del sistema propuesto, en el área de Razonamiento Geométrico es referenciado en [19,20].

5. Formalización de metodología de DigitLAB

DigitLAB (Laboratorio de Digitalizaciones) es un ambiente computacional, mas que un conjunto de algoritmos para recuperación de forma geométrica. Dicha distinción se materializa en que DigitLAB contiene su propio lenguaje –DigitLAB-, manejo de variables, y una estructura sintáctica formal. El objetivo de dicha estructura subyacente es permitir al diseñador manipular (nombrar, accesar, y alterar selectivamente) los datos de la digitalización. Esta manipulación es esencial en garantizar que los datos están correctamente pre-procesados para su entrada a los algoritmos específicos de recuperación de forma. Aunque en la literatura científica se presentan varias líneas de tratamiento de digitalizaciones generales, es obvio que todos son impotentes ante las características funcionales del objeto a recuperar, y que no son reflejadas en la geometría de la digitalización en forma evidente. DigitLAB es una respuesta a la impotencia de algoritmos generales, y que básicamente provee las mejores herramientas posibles para que el razonamiento del diseñador se refleje sobre la calidad y organización de los datos que son objeto de los algoritmos de recuperación de forma. Los detalles de la implementación de DigitLAB pueden ser consultados en [25]. En esta oportunidad únicamente las rutinas básicas de tratamiento y reconstrucción son citadas.

5.1. Clasificación planar.

Dado un conjunto de puntos S , muestreados en forma aleatoria sobre un objeto, una partición del conjunto se debe realizar para organizar los datos por secciones de corte. Nótese que las secciones de corte no necesariamente tienen que coincidir con planos de muestreo físico del objeto: un muestreo totalmente aleatorio puede ser visto como uno planar, re-hecho (virtualmente) en la dirección que el usuario considere mas conveniente. Los puntos se clasifican de acuerdo al plano a cuya “área de influencia” o “vecindad” ellos pertenezcan.

$$\begin{aligned}
 S &= \{ p_1, p_2, p_3, \dots, p_N \} && \text{(conjunto inicial)} \\
 S_p &= \{ S_1, S_2, S_3, \dots, S_M \} && \text{(partición en subconjuntos } S_i \text{)} \\
 S_j \cap S_k &= \Phi, \quad j \neq k \quad S_p = \bigcup_{i=1}^{i=N} S_i, && \text{(} S_p \text{ es la partición. } S_i \text{ son disyuntos)} \\
 S_i &= \{ p \mid p \in S \wedge \text{dist}(p, \text{plano}_i) \leq \delta \} && \text{(vecindario plano } i\text{-esimo)}
 \end{aligned}$$

El resultado de este paso es identificar los puntos pertenecientes a los planos de corte con los que el objeto es virtualmente muestreado. Si la digitalización es de hecho en patrones planares, es mejor usar como familia de planos $\{ \text{plano}_i \}$ los utilizados en el muestreo físico. Nótese que si la distancia de influencia de cada plano invade la del siguiente, la intersección de los subconjuntos S_i ya no será vacía. A través de opciones de este comando se puede reemplazar el punto físicamente muestreado por su proyección sobre su plano mas cercano. En esta forma se puede generar una digitalización virtual sin error estadístico.

5.2. Recuperación de secciones de corte

Cada subconjunto S_i generado al particionar el conjunto inicial S de puntos por *planos* de influencia plano i esta en desorden. De hecho, cada plano de influencia puede cortar el objeto en secciones desconexas. La recuperación de dichas secciones es el objetivo presente. El resultado debe ser un conjunto de polilíneas cerradas.

$$S_i = \{ p_1, p_2, p_3, \dots, p_N \} \text{ (conjunto de puntos cercanos o proyectados al } \text{plano}_i \text{)}$$

$$S_i = \bigcup_{j=1}^{j=M} S_{ji} \quad (\text{partición en secciones –polilíneas- } S_{ji})$$

$$S_{ji} \cap S_{ki} = \emptyset, j \neq k \quad (\text{polilíneas } S_{ji} \text{ son disyuntivas siempre})$$

$$S_{ji} = \{ p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{iR} \mid p \in S_i \wedge \text{dist}(p_{i\kappa}, p_{i\kappa+1}) \leq \delta_{\text{sample}} \} \quad (\text{cada polilínea } S_{ji} \text{ es secuencia de puntos cercanos})$$

Cada sección esta definida como la secuencia de puntos p_{ij} que forman un camino cuya distancia inter – puntos no supera δ_{sample} , la distancia física de muestreo en cada plano. Al terminar esta etapa, cada plano de corte debe contener un conjunto de polilíneas , que representan el corte de ese plano con el objeto.

5.3. Filtros y muestreo virtual

En casos en los cuales la digitalización física es de mala calidad (esparcida, irregular, etc.), los contornos recuperados presentan una gran cantidad de ruido. En otros casos, puede haber en cada contorno un numero excesivo de puntos, espaciamento irregular entre ellos, espaciamento diferente al del siguiente nivel (plano de corte), etc. En dichos casos es necesario filtrar el contorno (un re-muestreo es un caso especial de filtro). La formalización matemática de esta etapa sigue.

$$S_{ji} = \{ p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{iR} \} \quad (\text{polilínea en bruto } S_{ji})$$

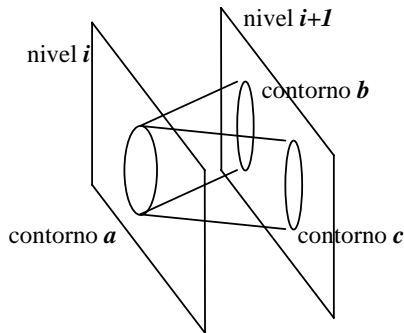
$$P_{ji} = \{ q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}, \dots, q_{iQ} \} \quad (\text{polilínea procesada } P_{ji})$$

$$q_{ij} = f(p_{i,j}, p_{i,j+1}, p_{i,j+2}, \dots, p_{i,j+W}) \quad (\text{función de filtro } f(), \text{ventana de longitud } W)$$

La función de filtro mas simple es el promedio de los puntos en la ventana W . Sin embargo tiene la característica de contraer las secciones del objeto, y por lo tanto debe ser aplicada selectivamente. Otras funciones $f()$ son la decimación del conjunto (que se implementa con un promedio ponderado sesgado sobre el punto sobreviviente), y el promedio direccional o re-muestreo (circunscrito al lugar geométrico del contorno inicial). El resultado de esta etapa es un conjunto de polilíneas suavizadas, regularmente espaciadas y con características afines entre niveles, para permitir un apareamiento entre ellos (pasos siguientes).

5.4. Recuperación de topología intra-niveles

La estructura de una sección de corte se compone de varios contornos (donde el plano secciona las paredes del objeto). Sin embargo puede haber inclusiones de unos en otros (por ejemplo en secciones de órganos). Es necesario por lo tanto recuperar las relaciones entre los contornos reconstruidos. Dichas relaciones se pueden representar como un grafo, cuyos nodos son contornos, y cuyos arcos son la relación $r()$ entre ellos (*ninguna, contenido, contiene, corta*). Nótese que en esta etapa del proceso no debería existir corte entre las polilíneas de contorno, pero se añade aquí como factor de auto-monitoreo de DigitLAB.



$$G_i = (\text{Nodes}, \text{Edge}) \quad (\text{grafo } G_i \text{ de relaciones entre polilíneas})$$

$$\text{Nodes} = P_i = \{ q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}, \dots, q_{iQ} \} \quad (\text{nodos =conjunto } P_i \text{ de polilíneas } q_{ji})$$

$$\text{Edges} = \{ (q_{i1}, q_{i2}) / r(q_{i1}, q_{i2}) \} \quad (\text{arcos son parejas de la relación } r())$$

Fig.2 - Parejas (a,b) y (a,c) de contornos a unir entre los niveles i e $i+1$



Fig. 3. - Proceso de digitalización (a) en vivo, (b) por medio de un chaleco de yeso.

Aunque se ha escogido un grafo para la representación, se puede demostrar que dicho grafo simplifica a un árbol. Sin embargo, dicha distinción cae fuera del alcance de este artículo.

5.5. Recuperación de topología inter-niveles

Una vez las relaciones entre los contornos de un nivel son obtenidas el paso siguiente es reconstruir las relaciones de los grafos de dos niveles consecutivos. Esta etapa es considerablemente mas difícil. Hasta el momento, DigitLAB ha resuelto una simplificación del problema, en el cual no existen contornos dentro de contornos (osea, el objeto no tiene paredes internas). La Fig. 2 muestra el problema de mapear un contorno en el nivel i hacia uno o mas contornos en el nivel $i+1$. Las anteriores son las formalizaciones de los pasos y herramientas de DigitLAB. La siguiente sección ilustra dichas formalizaciones en el modelaje de forma humana.

6. Resultados. Aplicación antropométrica

Para diversas aplicaciones del Centro Interdisciplinario de Investigación (CII) en CAD, CAM y CG se ha requerido el modelaje antropométrico. En particular, la industria de confección de prendas femeninas ha mostrado interés en dichos resultados. Por ello, uno de los casos de prueba para DigitLAB se ha desarrollado en esta área, con el proceso y resultados descritos a abajo. La modelo es una mujer caucásica, de 25 años de edad, 1.65 mts de estatura. El objetivo de la medición fué obtener un modelo digital del torso. El intervalo de muestreo, dado que el factor de precisión para confecciones no es demasiado exigente, fue de 0.5 cms. Dos mediciones fueron realizadas: (i) directa, sobre la modelo, y (ii) indirecta, sobre un vaciado del torso en yeso. La secuencia de pasos fué como sigue:

1. Toma de mediciones antropométricas básicas sobre el sujeto.

Para muestreo se utilizo un brazo articulado MicroScribe 3DX (de Immersion Corporation) con envolvente de alcance 1.27 mts y 5 dofs, cuya precisión en la aguja de punta es de 0.23 mm. Se trazó sobre el torso de la modelo una malla cuadriculada (Fig. 3.a). Esta medición directa se realizo para tener una estimación del intervalo de muestreo requerido, y para poder establecer una comparación contra el muestreo indirecto (por yeso). Las celdas de malla definidas en este primer intento fueron de aproximadamente 0.7 cms de lado. Dado que dicho enmallado fue realizado manualmente, se usaron curvas geodésicas, lo cual permitió espaciar el muestreo en lugares de menos curvatura. Esta relajación se hizo para evitar que la modelo tuviera que permanecer demasiado tiempo inmóvil. Como se supuso inicialmente, la calidad de este muestreo fue muy baja, por movimientos involuntarios tanto de la modelo como del operario. Sin embargo, sirvió para estimar el numero de puntos necesarios, y para determinar los parámetros de medida aplicados por el antropólogo forense que asesoró la prueba. El muestreo a partir de un molde de yeso (Fig. 3b) proporciono las condiciones deseadas de rigidez y la oportunidad de repetir las pruebas cuantas veces fuera necesario. El molde fue también marcado con las líneas

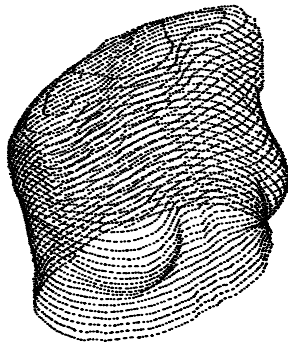


Fig. 4 - Puntos digitalizados.

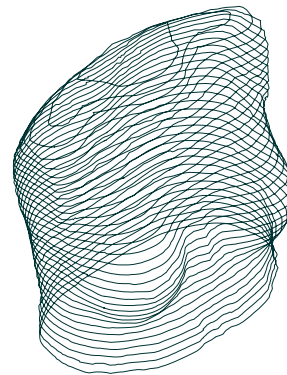


Fig. 5 - Niveles recuperados.

de medidas discretas para antropometría forense y/o deportiva. Tanto en el muestreo directo como en el indirecto se realizaron únicamente sobre la mitad derecha del torso, asumiendo que para el propósito inmediato (confecciones) la asimetría natural no sería significativa.

El brazo MicroScribe entrega datos a varios paquetes externos que realizan el registro de puntos y un ajuste inicial de superficie (ver comparación con DigitLAB mas adelante). De la superficie generada en primera instancia se realizo un re-muestreo, con el único fin de generar un conjunto de datos aumentado. Nótese que el re-muestreo (una herramienta de DigitLAB) aplicada en esta etapa replica también ruido y problemas del muestreo físico y por lo tanto no significa una mejora de los datos capturados, sino un aumento en su cantidad. Todos los factores de ruido de la digitalización se replicaron en el conjunto de datos aumentado. El conjunto de puntos fue entonces duplicado por medio de una herramienta “mirror”, después de haber calibrado exactamente la posición del plano de simetría vertical del torso. 10 mm y una distancia entre puntos de 3mm generando un digitalización virtual con 8020 puntos. La Fig. 4 muestra el conjunto de puntos de entrada para el ajuste de superficie en DigitLAB.

2. El procesamiento con DigitLAB ejemplifica las especificaciones formales de la sección anterior. Los siguientes fueron los pasos ejecutados.

(a) Clasificación planar por medio de la herramienta *pocketing()*, la cual no solo clasifico los puntos por niveles de digitalización, sino también los proyecto hacia su plano de influencia mas cercano.

(b) Recuperación de secciones de corte o contornos por aplicación de la herramienta *build_contour()*. Nótese que en este caso la mayoría de las secciones son convexas o tienen kernel (como las tratadas en [21,23]). Por lo tanto esta geometría no exigió las capacidades de recuperación de secciones inconexas de DigitLAB. El resultado de esta etapa es un conjunto de polilíneas por cada nivel (ver Fig. 5).

(c) Filtrado de Contornos por medio de la herramienta *filter()*, la cual suaviza el ruido de la digitalización inicial. Un detalle de dicha suavización aparece en la Fig. 6, con su efecto general mostrado en la Fig. 7. Nótese

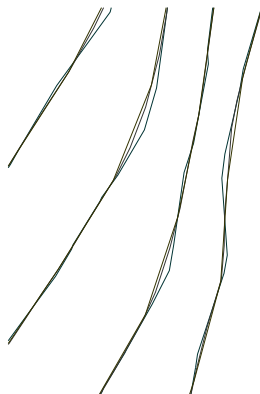


Fig. 6 - Zoom sobre filtro de contornos

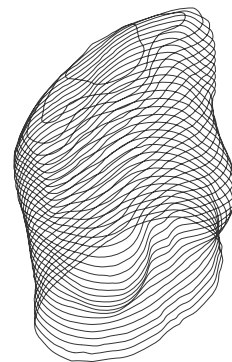


Fig. 7 - Contornos recuperados filtrados

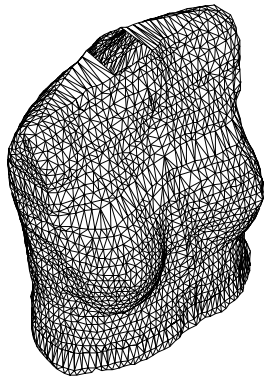


Fig. 8. - Resultados de un SW comercial especializado.

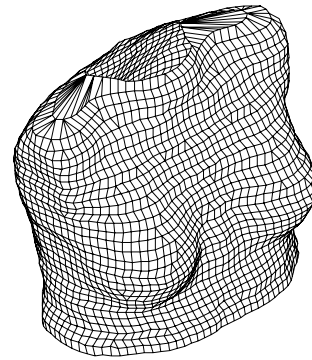


Fig. 9. - Resultados de DigitLAB para el torso.

que el paso (a) (*pocketing()*) genera una necesidad de filtrar los contornos inicialmente obtenidos dado que al “prestar” puntos de un plano de influencia a otros, la frontera de la figura necesariamente se desdibuja. Sin embargo, aun en ausencia de dicha proyección y préstamo, la difusión de frontera es generalmente causada por ruido en el muestreo.

(d) Recuperación de la superficie por medio de la herramienta *link_levels()*, la cual realiza las siguientes tareas: (i) determinación del grafo de relaciones inter-niveles entre contornos, para decidir cuales contornos del nivel $i+1$ pertenecen al mismo tronco o bifurcación topología que un contorno dado en el nivel i . (ii) preproceso de los contornos apareados. (iii) determinación de alguna función (muchas veces biyectiva) que defina la piel que une los contornos (lofting). (iv) creación de la malla topología correcta cuyos elementos son triángulos o facetas (de 4 vértices). (v) sellamiento de los contornos terminales con el cual las “tapas” del cascaron se cierran por medio de un algoritmo de triangulación de polígonos.

Con el paso (d) se concluye la recuperación básica de la topología del objeto. Nótese que en (d) se ha omitido la discusión sobre dos aspectos: la determinación del grafo de relaciones entre contornos en el interior de un nivel y la determinación del grafo de relaciones entre niveles cuando el objeto tiene paredes internas. Aunque el CII tiene algunos resultados en estos aspectos, son de una naturaleza supremamente incipiente. En el caso actual, la geometría del torso no requirió de algoritmos mas sofisticados para el apareamiento inter-niveles, y además no existen paredes internas. Por ello, los grafos mencionados son muy simples. La Fig. 8 muestra los resultados producidos por un software recomendado por Immersion Corporation y que trabaja en interface con el brazo digitalizador. La Fig. 9 presenta los resultados de DigitLAB para el torso. La Fig. 10 presenta dichos resultados para el conjunto de datos tri-foil, cuyas características topológicas son mucho mas complejas que las del torso. Nótese que cada nivel de corte contiene varias secciones (contorno es disconexo) y por lo tanto la sección de corte tiene kernel nulo. El tri-foil y conjuntos de datos óseos ([22]) son manejado con DigitLAB, constituyendo

una mejora a los algoritmos presentados en [21], los cuales solo manejaban secciones con *kernel*. Las herramientas actuales procesan (obviamente) el torso del ejemplo presente en forma correcta.

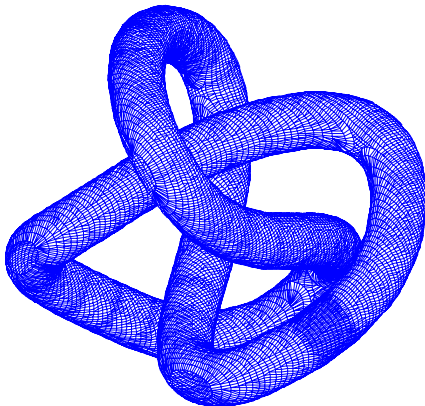


Fig. 10. - Resultados de DigitLAB para conjunto de datos tri-foil.

7. Conclusiones

De las Figs. 7 y 8 puede notarse que, aunque el software comercial posiblemente tiene algoritmos muy poderosos y generales para la recuperación de la superficie, la superficie generado por DigitLAB, con algoritmos mas simples es superior en suavidad, y en la calidad de las facetas. Esta calidad se mide por el factor de forma resultante, el cual debe adecuarse a las necesidades del software de Elementos Finitos (por ejemplo). La estrategia de generación de facetas de DigitLAB usa heurísticos para garantizar (salvo casos

especiales) dicha calidad. Aunque el caso de estudio antropométrico tiene una topología simple, otros casos de estudio presentados (Fig. 9) demuestran que DigitLAB es capaz de manejar topologías generales de paredes externas. El manejo de topologías de paredes internas será reportado en el futuro.

En el aspecto de razonamiento geométrico y topológico otros algoritmos que requieren atención son aquellos para decidir cuando dos formas planas son semejantes, para construir loftings mas elegantemente, para detectar secciones en forma de ocho y evitar contornos auto-intersectantes, y para permitir contornos no cerrados. Todos estos aspectos son de gran interés y utilidad en la presente investigación.

Los resultados mostrados sugieren que en el manejo de digitalizaciones el procesamiento estadístico y de razonamiento geométrico de los datos resulta tan importante como los algoritmos mismos de recuperación de superficie. En respuesta a esta situación, la filosofía de DigitLAB ha sido la de proveer un ambiente, similar a MatLAB™ o Mathematica™, para el mencionado pre-procesamiento. Dicho ambiente ha permitido la mejora substancial de los datos que llegan a sus propios algoritmos de ajuste de superficies, por lo cual sus resultados generales han sido altamente satisfactorios.

8. Reconocimientos

Esta investigación ha sido patrocinada por Colciencias (Instituto Colombiano para la Ciencia y la Tecnología, contrato 152-96) la Universidad EAFIT. El Investigador principal agradece a los profesores Placid Ferreira de el *Large Scale Flexible Automation Lab.* de la Universidad de Illinois en Urbana – Champaign, el Dr. Charles Wu de *Ford Motor Company* por su patrocinio en 1993 y 1995 para los trabajos previos en ajuste de superficies para ingeniería de estampado. DigitLAB contó con la asesoría del Prof. Carlos Cadavid (Dr. Topología) y del Prof. Juan G. Lalinde (AbD. Ciencias de la Computación). El Instituto Fraunhofer IGD (Darmstadt) y la *Deutsche Akademischer Austauschdienst* (DAAD) hicieron posible la participación del principal investigador en la División de Imágenes Medicas de Fraunhofer IGD en un proyecto afín, publicado en otros foros. El Prof. Dr. Xoan Leiceaga Baltar (Univ. Vigo, España) proporciono una valiosa pasantía para el trabajo bibliográfico y de preparación de esta investigación. La medición antropométrica fue asesorada por el Antropólogo Jesús Camacho (Indeportes, Antioquia, Colombia) y contó con la colaboración de Isabel C. Dominguez, (programa de Nutrición, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia).

9. Referencias bibliográficas

- [1] ANSI Y14.5.1M-Draft, 1993, "Mathematical Definition of Dimensioning and Tolerancig Principles", *American Society of Mechanical Engineers*. New York
- [2] Bolle, M, Rudd, C., Vemuri, 1991, "On Three Dimensional Surface Reconstruction Methods". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol3, No1, pp. 1-13.
- [3] Borhese, N., Ferrigno, G., Baroni, G., Pedotti, A., Ferrari, S., Savare, E., 1998, "AutoScan: A Flexible and Portable 3D Scanner". *IEEE Computer Graphics and Applications, Computer Graphics I/O Devices* May/June, pp. 39-41.
- [4] Carr, K., 1995, " Modeling and verification methods for the inspection of geometric tolerances using point data ", Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [5] Catmull, E., Clark, J., 1978, "Recursively Generated B-Spline Surfaces on Arbitrary Topological meshes". *Computer Aided Design*, Vol 10, No 6, Nov, pp 350-355.
- [6] Doo, D., Sabin, M., 1978, "Behavior of Recursive Division of Surfaces near Extraordinary Points ". *Computer Aided Design*, Vol 10, No 6, Nov, pp 356-360.

- [7] Drebin R., Carpenter, L. and Hanrahan, P., 1988 "Volume Rendering", *ACM Computer Graphics*, Vol. 22, Number 4, August.
- [8] Edelsbrunner, H., 1987, "Algorithms in Combinatorial Geometry", Springer Verlag. New York.
- [9] Edelsbrunner, H., 1994, "Three Dimensional Alpha Shapes". *ACM Transactions on Graphics*, Vol 13, No 1, Jan, pp 43-72.
- [10] Grimm, C., Hughes, J., 1995, "Modeling Surfaces of Arbitrary Topology using Manifolds". *Proceedings, SIGGRAPH - 95 Annual Conference Series*, Los Angeles, August 6-11, n. 29, pp. 359-368.
- [11] Guo, B., 1997, "Surface Reconstruction: From Points to Splines". *Computer Aided Design*, Vol 29, No 4, pp 269-277.
- [12] Hoffmann, C., 1989, "Geometric and Solid Modeling", *Morgan Kauffmann Publishers*.
- [13] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., Stuetzle, W., 1992, "Surface Reconstruction from Unorganized Points". *Proceedings, SIGGRAPH -92 Annual Conference Series*, Chicago, July 26-31, n. 26, pp. 71-78.
- [14] Khan, M., Vance, J., 1995, "A Mesh Reduction Approach to Parametric Surface Polygonization". *Proceedings, ASME Design Engineering Technical Conferences. -Advances in Design Automation*, pp. 41-48.
- [15] Lorensen, W., Cline, H., 1987, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", *ACM Computer Graphics*, Vol. 21, No. 24, July, pp. 163-169.
- [16] Neugebauer P., 1997, "Geometrical Cloning of 3D Objects via Simultaneous Registration of Multiple Range Images". *Proceedings, International Conference on Shape Modeling and Applications*, Aizu-Wakamatsu, Japan, March 3-6.
- [17] Mortenson, M., 1985, "Geometric Modeling", John Wiley and Sons. New York.
- [18] Petrov, M., Talapov, A., Robertson, T., Lebedev, A., Zhilyaev A., Polonsky, L., 1998, "Optical 3D Digitizers: Bringing Life to the Virtual World". *IEEE Computer Graphics and Applications, Computer Graphics I/O Devices* May/June 1998, pp. 28-37.
- [19] Ruiz, O., Marin, R. and Ferreira, P., 1994, "A Geometric Reasoning Server with Applications to Geometric Constraint Satisfaction and Reconfigurable Feature Extraction". *Proceedings, 3rd Luso-German Workshop on Graphics and Modeling in Science and Technology*, Coimbra, Portugal.
- [20] Ruiz, O., 1995, "Geometric Reasoning in Computer Aided Design, Manufacturing and Process Planning", Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [21] Ruiz, O., Isaza, D., 1997, "Fitting and Edition of Surfaces to Digitizations. An Application AIS Compatible". *Proceedings, EGRAF-97. I Iberoamerican Symposium on Graphic Expression*, Oct 13-15, 1997 Camaguey, Cuba
- [22] Ruiz, O., Henao, C., 1998, "Modelaje Geométrico De Estructura Ósea". *X Congreso Internacional de Ingeniería Grafica*, June 3-5 1998, Málaga, España.
- [23] Ruiz, O., Posada, J., 1998, "Computational Geometry In The Preprocessing Of Point Clouds For Surface Modeling". *Proceedings, IDMME-98 (Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering)*, May 27-29, Compiegne, France. pp. 613-620

- [24] Samet, H., 1995, "Application of Spatial Data Structures: Computer Graphics, Image Processing and GIS", Addison Wesley Publishing. Co.
- [25] Schrader, S., 1999, "DIGITLAB I. Reconstrucción de Superficies a Partir de Digitalizaciones Planares", Tesis., Universidad EAFIT.
- [26] Szeliski, R., Tonnesen, D., Terzopoulos, D., 1993, "Modeling Surfaces of Arbitrary Topology with Dynamic Particles". *Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 82-87.
- [27] Vanzandt W., 1992, "Scientific Visualization: One Step in lab Analysis Workflow", *Advanced Imaging*, Feb, pp. 20.
- [28] Várady, T., Martin, R., Cox, J., 1997, "Reverse Engineering of Geometric Models", *Computer Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268.
- [29] Yau, M., Srihari, S.N., 1983, "A Hierarchical Data Structure for Multidimensional Digital Images" , *Communications of the ACM*, 66, 7(July 1983), pp. 504-515.