Herramientas de modelado multirresolución de imágenes 3D utilizando *wavelets*

José Miguel Espadero †, Luis Rincón ‡
† U. Politécnica de Madrid. Dep. de Tecnología Fotónica.
Campus de Montegancedo s/n. 28660 Boadilla del Monte. Madrid, España.
‡ U. Rey Juan Carlos. Dep. de Ciencias Experimentales.
C. Tulipán, s/n. 28933 Móstoles. Madrid, España.

19 de octubre de 1999

Resumen

El procesamiento de objetos tridimensionales requiere la utilización de técnicas que manejen eficientemente una gran cantidad de datos. Las transformadas *wavelet* se han revelado como una herramienta muy potente en situaciones en las que es preciso tratar un elevado volumen de datos. Este tipo de transformadas permite representar los objetos en distintos niveles de resolución, con lo que es posible realizar manipulaciones sobre los mismos más eficientemente. Se presentan dos herramientas de modelado multirresolución, una de las cuales ajusta nubes de puntos 3D a mallas con una determinada topología, mientras que la otra es capaz de efectuar diferentes procesos sobre mallas tridimensionales utilizando *wavelets*. Los objetos se pueden visualizar mediante mallas en alambre de celdas hexagonales o mediante mallas de facetas triangulares.

Palabras Clave: Visualización 3D, Modelado 3D, Wavelets.

1 Introducción

Las aplicaciones relacionadas con el procesamiento de imágenes y la visión por computador se caracterizan habitualmente por su gran voracidad de recursos de memoria y cómputo. Por ello, es muy importante contar con modelos de representación del mundo real y de los objetos que lo componen que por un lado permitan describir sus propiedades de forma sencilla, sin implicar elevados requerimientos de memoria, y por otro favorezcan el desarrollo de algoritmos y herramientas eficientes que posibiliten su manipulación, reduciendo al máximo el tiempo de procesamiento y manteniendo en todo caso la precisión necesaria en los resultados.

No es extraño entonces el interés que tradicionalmente han despertado las técnicas de representación jerárquica y multirresolución en el campo de la visión por computador [1][2]. Estas técnicas permiten representar los objetos en varios niveles de resolución con distintos niveles de detalle y que a su vez conllevan diferentes necesidades en cuanto a almacenamiento y cómputo. En particular, la manipulación de representaciones con bajo nivel de resolución implica requerimientos de memoria bajos y velocidades de cálculo elevadas. Como inconveniente, la precisión de los resultados obtenidos es menor. De cualquier modo, ciertas tareas como, por ejemplo, la clasificación de objetos, pueden beneficiarse del análisis de los datos a distintas escalas.

Desde el punto de vista del modelado de objetos, las técnicas basadas en la transformada *wavelet* se han considerado como una nueva formalización de los métodos multirresolución desarrollados en la década de los

80. Estas transformadas han renovado el interés sobre las técnicas multirresolución, proporcionando una formalización matemática rigurosa, de la cual se deriva un marco en el que se están desarrollando constantemente nuevos algoritmos y técnicas extremadamente eficientes con aplicaciones muy diversas.

En este artículo se presentan dos herramientas que permiten trabajar con un modelo multirresolución de representación de objetos en tres dimensiones. La primera, denominada `SAI`, es una herramienta que aproxima una nube de puntos extraída de un objeto 3D al modelo utilizado. La segunda, denominada `Xwave`, presenta un interfaz gráfico a partir del cual es posible efectuar de manera eficiente diversas operaciones sobre la representación tridimensional proporcionada por `SAI`. `Xwave` puede trabajar en múltiples niveles de resolución, con lo que es capaz de procesar los datos del objeto con diferentes niveles de detalle. `SAI` y `Xwave` han sido desarrolladas utilizando herramientas de libre distribución, lo que ha asegurado su transportabilidad a diferentes plataformas sin necesidad de efectuar modificación ninguna en su código fuente.

En primer lugar se presenta el modelo multirresolución de representación de objetos utilizado. A continuación se procede a la descripción de `SAI` y `Xwave`, exponiendo las ventajas que proporciona el empleo de herramientas de procesamiento multirresolución. Seguidamente se muestran ejemplos de utilización de `Xwave` sobre objetos provenientes de diversas fuentes. Por último, analizaremos las herramientas de libre distribución empleadas durante la fase de desarrollo.

2 Modelo 3D multirresolución utilizando *wavelets*

Los objetos tridimensionales considerados proceden de conjuntos discretos de muestras tomadas sobre los objetos, conformando una nube de puntos que contiene información superficial de los mismos. En cada punto se registran sus coordenadas espaciales, aunque puede almacenarse también información de naturaleza no geométrica como color, temperatura, textura o cualquier otra magnitud asociada al mismo. Las nubes de puntos pueden proceder de diversas fuentes, entre las que pueden encontrarse sensores de posición manuales, sensores láser, sistemas de visión con varias cámaras o con luz estructurada, ultrasonidos, imágenes adquiridas mediante tomografía, imágenes sintéticas generadas con herramientas CAD, etc.

En [4] y en [5] se describe un sistema que permite obtener una representación multirresolución de un conjunto disperso de puntos pertenecientes a la superficie de objetos reales mediante *wavelets* esféricos. A continuación vamos a detallar el proceso efectuado.

Una vez obtenida la nube de puntos, y antes de definir el modelo multirresolución, es preciso construir una relación de vecindad que sirva para conectar los puntos de la nube con sus vecinos más próximos. Esta relación de vecindad se genera estableciendo conexiones entre los puntos de la nube de acuerdo con una cierta topología generada de forma que cumpla la propiedad de conectividad por subdivisión. Se ha utilizado como modelo inicial un icosaedro, que conforma una malla cuyas caras (*facetas*) triangulares se subdividen recursivamente. En cada operación de subdivisión de la malla completa, cada una de las facetas triangulares se particiona en otras cuatro, todas ellas de igual área. Así se obtiene una superficie esférica discretizada en una malla de $20 \cdot 4^j$ pequeñas facetas triangulares, siendo j el *orden* o *nivel de resolución* de la malla.

La estructura geométrica dual del icosaedro es el domo geodésico, constituido por una malla de alambre de celdas hexagonales. Cada vértice del domo presenta la propiedad de que todos los nodos de la malla tienen valencia (número de vecinos) constante e igual a 3. Si en el icosaedro subdividido de resolución j hay $20 \cdot 4^j$ facetas triangulares, igualmente existen $20 \cdot 4^j$ nodos en la malla de alambre. Así puede establecerse un homomorfismo que hace corresponder cada vértice o nodo del domo a una faceta triangular del icosaedro subdividido.

El siguiente paso consiste en aproximar la nube de puntos original a una malla de celdas hexagonales, conservando en ésta la topología del domo geodésico. Para ello, se asociará cada punto de la nube a un vértice del domo (en la representación dual de la malla de triángulos, al centro de una faceta). Entre las distintas soluciones existentes para realizar tal operación, se encuentra el proceso descrito por Ikeuchi *et al.* en [7]. El ajuste se lleva a cabo mediante un proceso iterativo, en el que interviene una combinación de fuerzas que regularizan la curvatura local de la malla de alambre e intentan ajustarla a la nube de puntos de entrada. Así se obtendrá la malla de alambre que representa la superficie original. En cada vértice o nodo se almacenará la información geométrica (coordenadas espaciales) y la información no geométrica contenida en cada punto de la nube.

En este punto se dispone de la malla que representa al objeto, encontrándose ésta en su nivel de resolución original, que es el máximo posible. Utilizando el esquema de subdivisión con *wavelets* esféricos planteado en [4], es posible reducir el nivel de resolución utilizado para representar el objeto, y regenerar posteriormente la información de la malla en el nivel de resolución original. La generación de la representación de nivel inmediatamente inferior se efectúa mediante un proceso de análisis, consistente en fusionar las facetas triangulares de 4 a 1 de acuerdo con las relaciones de vecindad presentes en la malla dual de alambre. Así será entonces posible obtener representaciones del objeto en niveles de resolución inferior hasta llegar al nivel mínimo (nivel de resolución 1), en el cual la malla estaría compuesta por 20 vértices, y la malla dual por 20 facetas triangulares. La regeneración de la representación del nivel inmediato superior, denominada síntesis, se obtiene mediante la subdivisión de las facetas de 1 a 4.

El esquema de *wavelets* esféricos empleado asegura que, si sobre una malla se efectúan únicamente operaciones de análisis y de síntesis, la representación del objeto en un determinado nivel j siempre será la misma. Es decir, las operaciones de análisis y de síntesis no destruyen la información de la malla, sino que sirven para trabajar con representaciones del objeto en distintos niveles de resolución, y siempre será posible reconstruir la información sin cambios con la resolución original y con cualquiera de las resoluciones inferiores. Éstas últimas no son sino aproximaciones groseras de la representación original, eliminando de ella una mayor cantidad de detalles a medida que desciende la resolución.

Para las operaciones de análisis y síntesis nos valdremos de la transformada de Haar, que presenta una complejidad de orden $O(n)$, lo que la constituye en una herramienta extremadamente eficiente para tratar problemas con un gran volumen de datos.

El modelo multirresolución pretende representar el objeto con un grado de detalle escogido según la voluntad del operador: un nivel de detalle mayor requerirá mayor carga computacional, mientras que los niveles de resolución menores permiten cálculos más eficientes.

Este modelo posee múltiples aplicaciones, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Visualización multirresolución: permite visualizar y mover objetos eficientemente a partir de representaciones groseras de los mismos.
- Reconocimiento automático de objetos para su posterior clasificación.
- Control de calidad industrial: comparando un objeto manufacturado con el modelo ideal perfecto que le corresponde, sería factible detectar automáticamente posibles defectos en su fabricación.
- Búsqueda de características determinadas en objetos.
- Edición y corrección de modelos: consiste en, dado un objeto de entrada, modificar interactivamente sus propiedades geométricas o no geométricas con propósitos de diseño.

3 Herramientas de modelado de objetos 3D: `SAI` y `Xwave`

En este apartado se presentan las dos herramientas de modelado desarrolladas en este trabajo: `SAI` y `Xwave`.

La herramienta `SAI` parte de la nube de puntos original y del icosaedro modelo y, después de subdividir el mismo repetidas veces, efectúa la aproximación de la malla de hexágonos a la nube mediante una versión mejorada del método propuesto por Ikeuchi. Como resultado, `SAI` obtiene la malla que representa al objeto 3D y la almacena en un fichero con un formato específico definido para la herramienta (fichero `.difa`). `SAI` recibe sus argumentos desde el *shell*, incluyendo los nombres de los archivos de la nube de puntos de entrada y de la malla de salida, así como el número de iteraciones del proceso de ajuste.

La herramienta `Xwave` es capaz de procesar las mallas `.difa` proporcionadas por `SAI` de diversas maneras, y cuenta con un interfaz gráfico a través del cual es posible realizar las siguientes operaciones:

Análisis: Disminución de un nivel de resolución en la representación. Implica una reducción del número de facetas y nodos de las mallas.

Fusión: Consiste en reducir la resolución únicamente en las zonas más planas del objeto. Esta operación se efectúa mediante un estudio local de la curvatura de la superficie, tras el cual se fusionan aquellas facetas cuya curvatura no supere cierto umbral.

Síntesis: Incremento de un nivel de resolución en la representación. Conlleva un aumento en el número de facetas y nodos de las mallas.

Filtrado: Operación que realiza un suavizado de la forma del objeto en un nivel de resolución determinado. El filtrado permite eliminar ciertos efectos no deseados en la malla que pueden considerarse consecuencia de errores producidos durante la captura del objeto. Tras realizar esta operación no será posible recuperar la información original de la malla, puesto que se habrá eliminado la información ruidosa presente en el nivel de resolución en que se ha realizado el filtrado.

Visualización: En ella se realiza una proyección de las mallas tridimensionales sobre un plano en 2D. Esta acción requiere efectuar una serie de operaciones elementales sobre los vértices de la malla de alambre, en el caso de rotaciones o translaciones, y sobre las facetas triangulares, como por ejemplo la determinación de las facetas y de las aristas ocultas para la vista actual [8].

La visualización implica realizar sobre la malla operaciones espaciales afines (que no modifican su topología, sino las coordenadas XYZ de los nodos) como rotaciones y translaciones respecto del origen de coordenadas, con objeto de permitir su observación desde cualquier punto de vista. Se permite visualizar tanto la malla de facetas triangulares como la malla dual formada por celdas hexagonales, si bien esta última sólo en formato de armazón alámbrico, sin ocultación de aristas. Además, es posible efectuar operaciones de acercamiento y alejamiento del observador (*zoom*) para facilitarle el análisis de los detalles presentes en mallas de gran resolución. Todas estas operaciones se realizan mediante el producto de las coordenadas de los vértices por una única matriz, reduciéndose así notablemente la cantidad de cálculos efectuados. La ocultación de aristas y facetas en la malla triangular se efectúa determinando la orientación de sus vértices, lo que requiere el cálculo de un determinante de 3x3 en cada faceta, y reordenándolas según la coordenada Z de su centro.

`Xwave` permite exportar las mallas a un formato reconocible por `Geomview`, herramienta de visualización desarrollada por el Geometry Center de la universidad de Minnesota [10]. De este modo es posible explotar las enormes capacidades de dicha herramienta en cuanto a la incorporación de fuentes de iluminación, colores, movimiento, etc.

El interfaz de `Xwave` consta de una ventana de trabajo para visualización, donde se representan las mallas 3D, y de un panel de control externo, desde el cual el usuario puede modificar los parámetros de visualización y aumentar o disminuir la resolución del objeto representado, así como guardar los datos de la malla con la resolución actual en el formato del propio `Xwave` o en el de `Geomview`. Ambas ventanas se muestran en la figura 1. La ventana de visualización contiene además una barra de menú a través de la cual es posible cargar o guardar las mallas en varios formatos, y seleccionar el modo de visualización del objeto, bien mediante la malla de facetas triangulares, bien mediante la de alambre, bien superponiendo las dos juntas.

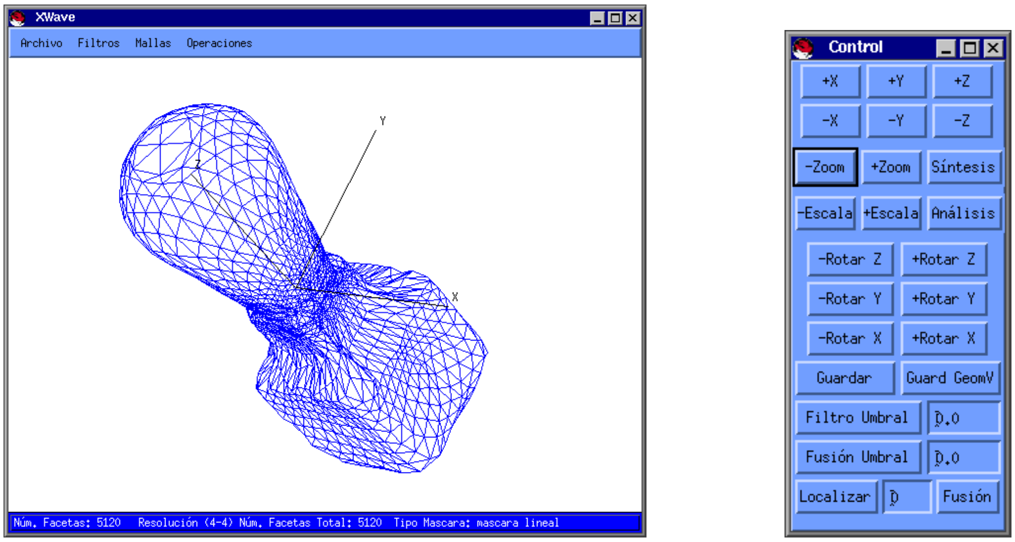


Figura 1: El interfaz gráfico de `Xwave`.

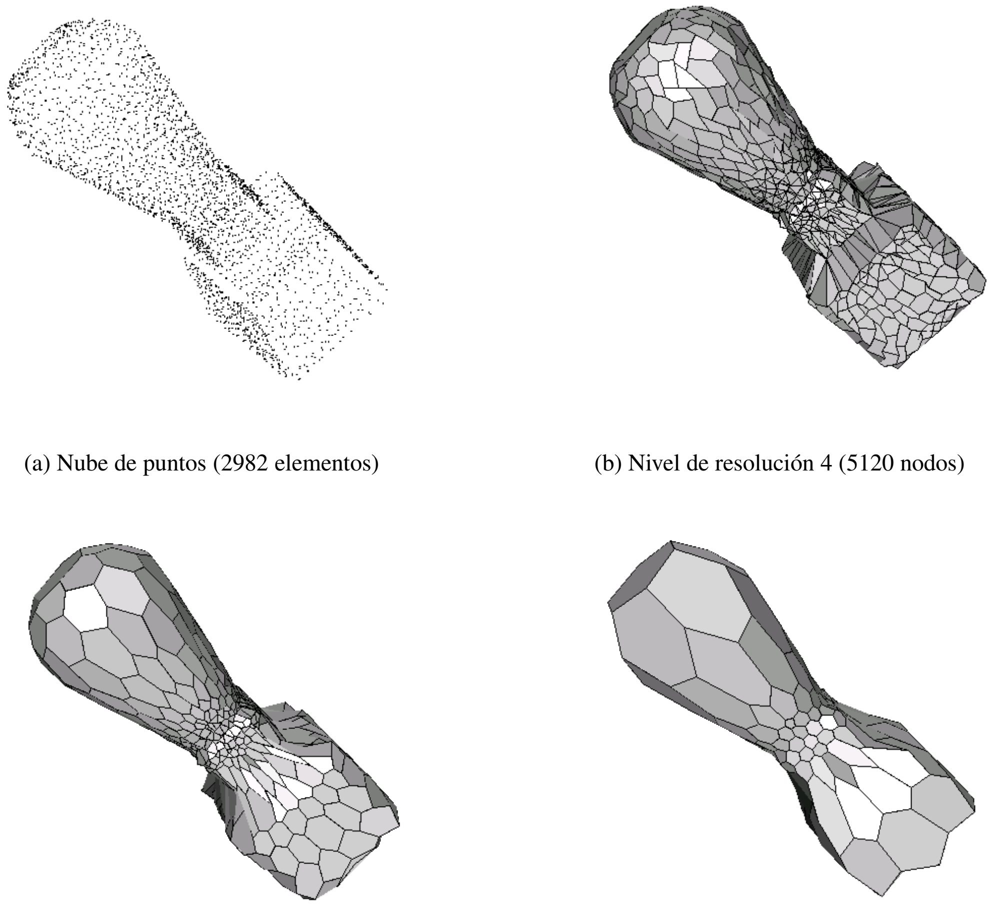
4 Ejemplos de modelado con `SAI` y `Xwave`

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras aplicar el proceso de modelado explicado en la sección 2 a varias nubes de puntos de diversa procedencia. La figura 2 muestra la nube de puntos de un objeto adquirido mediante un palpador manual y sus representaciones con mallas de hexágonos de varios niveles de resolución. La figura 3 presenta un objeto adquirido con un sensor de rango láser, lo que permite conseguir nubes de puntos mucho más densas que las obtenidas mediante el sensor manual, mientras que la figura 4 muestra un cráneo cuya nube de puntos se ha extraido a partir de una imagen médica obtenida mediante radiografía. En estos últimos dos casos, se muestran las nubes de puntos y las mallas hexagonales y triangulares correspondientes. En las representaciones de mayor orden se observa claramente la presencia de mayor cantidad de detalles de los datos originales que no están presentes en las versiones de menor nivel de resolución.

5 Implementación de `SAI` y `Xwave` empleando herramientas de libre distribución

Puesto que uno de los objetivos del proyecto es permitir que el modelo multirresolución sea empleado dentro de múltiples y diversas áreas de aplicación, como informática médica y aplicaciones industriales, se ha apostado por realizar la implementación del mismo empleando herramientas de software libre. Las principales características del software libre que determinaron esta decisión fueron las siguientes:

- El software libre puede proporcionar las herramientas adecuadas para la implementación del modelo, desde el completo entorno de desarrollo de GNU (`gcc`, `gmake`, `ddd`, `gprof`) hasta las herramientas auxiliares implicadas en el proyecto, como visualizadores y editores 3D (`Geomview`) o facilidades para realizar conversiones entre diversos formatos de datos de entrada (`awk`, `flex`).



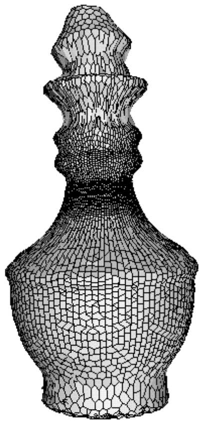
(a) Nube de puntos (2982 elementos)

(b) Nivel de resolución 4 (5120 nodos)

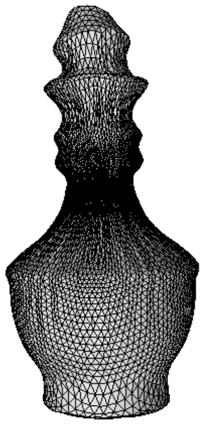
(c) Nivel de resolución 3 (1280 nodos)

(d) Nivel de resolución 2 (320 nodos)

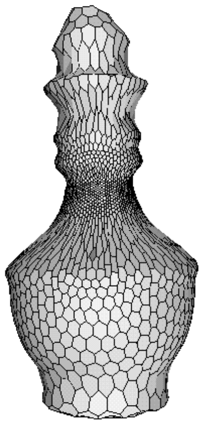
Figura 2: Malla obtenida a partir de un sensor de rango manual.



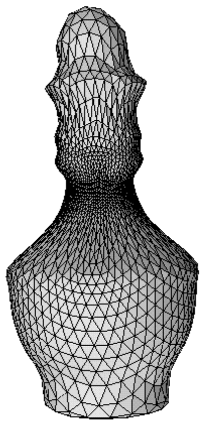
(a) Malla de resolución 5 (20480 nodos)



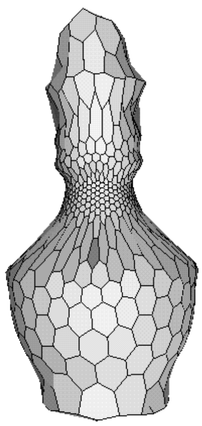
(b) Malla triangular de resolución 5 (20480 triángulos)



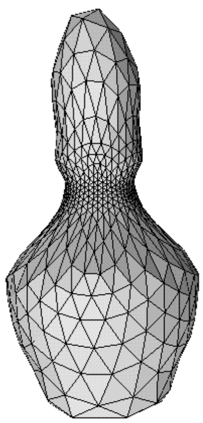
(c) Malla de resolución 4 (5120 nodos)



(d) Malla triangular de resolución 4



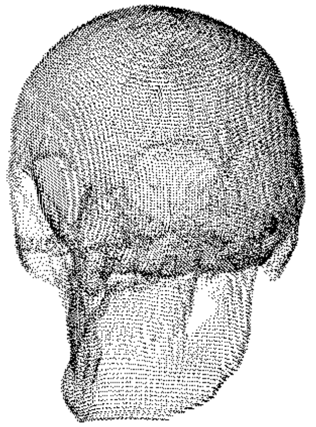
(e) Malla de resolución 3 (1280 nodos)



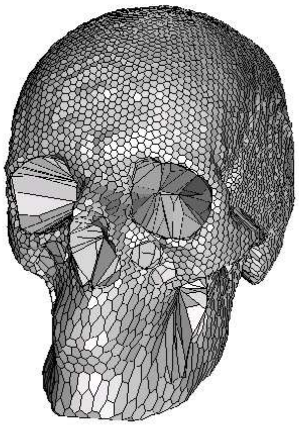
(f) Malla triangular de resolución 3

Figura 3: Malla obtenida a partir de un sensor de rango láser.

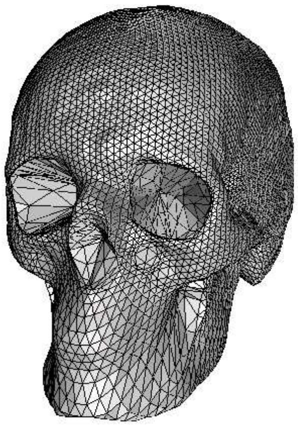
(a) Imagen sintetizada a partir de los datos originales.



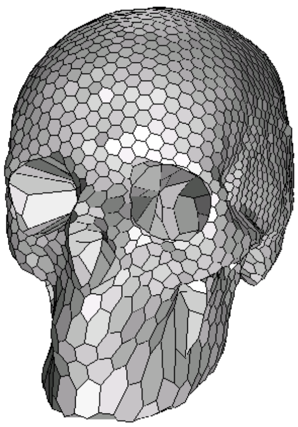
(b) Nube de puntos superficial extraida (36832 puntos)



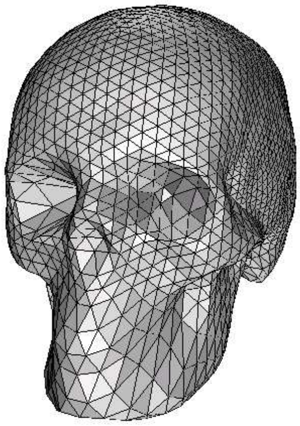
(c) Malla de resolución 5



(d) Malla triangular de resolución 5



(e) Malla de resolución 4



(f) Malla triangular de resolución 4

Figura 4: Malla obtenida a partir de imágenes capturadas mediante radiografía.

- La mayoría de las aplicaciones de libre distribución implicadas en el desarrollo están disponibles en multitud de plataformas diferentes, lo que permite que el resultado sea transportable a multiples plataformas sin invertir apenas esfuerzo.

- Las herramientas de libre distribución utilizadas se consideran robustas por tener una larga historia, lo que implica que ya han sido probadas en multitud de proyectos, y por tanto se considera que seguirán disponibles en el futuro y trasladándose a nuevas plataformas, lo cual permite pensar que las herramientas desarrolladas no se verán en compromiso debido a causas externas.

Producto	Versión
Linux	Red Hat 5.2
gcc[1]	2.7.2.3
gdb	4.17.0.4
xxgdb[2]	1.12
gprof	2.9.1
Lesstif[3]	0.87.0
Geomview	1.6.1

Tabla 1: Versiones de los productos empleados durante el desarrollo de XWave.

Las herramientas de libre distribución empleadas durante el desarrollo son las siguientes:

- Sistema operativo Linux : Prácticamente todo el desarrollo se ha realizado sobre un sistema operativo Linux Red Hat 5.2 [12] debido a su estabilidad, disponibilidad de herramientas y facilidad para relacionarse con otros SS.OO. empleados en el proyecto (Irix, MS-DOS).

- Entorno de desarrollo de GNU : La implementación se realizó empleando las herramientas clásicas de desarrollo de GNU [11] debido a su disponibilidad en prácticamente todas las plataformas del mercado. La plataforma de desarrollo está formada por el compilador `gcc`, el depurador `xxgdb` y el analizador de código `gprof`. Para la compilación sobre el sistema operativo Irix se emplearon el compilador `egcs` y el depurador `ddd`.

- Librería gráfica Lesstif : Lesstif [13] es una librería de libre distribución que sustituye al estándar de generación de interfaces gráficos Motif, disponible en varios sistemas operativos propietarios. El desarrollo empleando Lesstif permite recompilar los programas en aquellas plataformas que disponen de Motif, como Irix, sin nece idad de realizar ningún cambio. Actualmente se está trabajando en la modificación del código para emplear la librería Mesa [14], la versión de libre distribución de la potente librería OpenGL, desarrollada por Silicon Graphics.

- `Geomview` : Excelente visualizador 3D que permite obtener buenas representaciones de cualquier objeto empleando un formato de datos que además puede ser importado por muchos programas de CAD comerciales. El empleo de Geomview [10] ha permitido aprovechar todas las funcionalidades que ya incorpora, lo que ha eliminado la necesidad de implementar un sistema de visualización complejo. En estos momentos se está considerando la incorporación de opciones a `Xwave` que conviertan a éste en un *front-end* de `Geomview`, permitiéndole así utilizar directamente las opciones de visualización más avanzadas del mismo.

[2] En las estaciones SGI se sustituye gcc por egcs 2.91.60
[3] En las estaciones SGI se sustituye xxgdb por ddd 3.1.3
[3] Las estaciones SGI contienen OSF/Motif

Referencias

[1] D. Marr y E. Hildreth: Theory of Edge Detection, *Proceedings of the Royal Society*, (London), ser. B, vol. 207, pág. 187–217, 1980.

[2] *Multiresolution Image Processing and Analysis*, A. Rosenfeld, Ed., Springer Verlag, 1984.

[3] K. Pulli, M. Cohen, T. Duchamp, H. Hoppe, J. Mcdonald, L. Shappiro y W. Stuetzle:Surface modeling and display from range and color data, *Proc. on International Conference on Image Analysis and Processing*, September, 1997, Florencia, Italia. Publicado en *Lecture Notes in Computer Science 1310*, pág. 385-397. Springer-Verlag, Berlin, 1997.

[4] L. Pastor y A. Rodríguez: Surface approximation of 3D objects from irregularly sampled clouds of 3D points using spherical wavelets, *Proc of International Conference on Image Processing, ICIAP'99*, Venecia, Italia, Sep. 1999.

[5] A. Rodríguez y L. Pastor: Aproximación de superficies utilizando técnicas multirresolución. *Technical report, Dept. Tecnología Fotónica, Universidad Politécnica de Madrid*, 1997.
http://www.dtf.fi.upm.es/~arodri/apsumul.ps.gz

[6] J.-L. Starck, F. Murtagh y A. Bijaoul: *Image Processing and Data Analysis. The Multiscale Approach.* Cambridge University Press, 1998.

[7] Delingette H., Hebert H. e Ikeuchi.K.: A Spherical Representation for the Recognition of Curved Objects, *Proc of the ICCV*, Berlin, pág. 103–112, 1993.

[8] J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner y J.F. Hughes: *Computer Graphics: Principles and practice*, Addison-Wesley, 1996

[9] E.J. Stollnitz, T.D. DeRose y D.H. Salesin: *Wavelets for Computer Graphics*, Morgan Kauffman Publishers, 1996

[10] The Geometry Center, University of Minnesota. Home page:
http://www.geom.umn.edu/docs/software/geomview

[11] *http://www.gnu.org*

[12] *http://www.redhat.com*

[13] *http://www.lesstif.org*

[14] *ftp://iris.ssec.wisc.edu/pub/Mesa*