

APLICACIÓN DE UN ESCÁNER 3D A FINES DIDÁCTICOS

Alberto Mateos Quintanilla*
fasu@alumnos.uva.es

Pedro Martín Leronés[§]
pedler@cartif.es

Jaime Gómez García-Bermejo*
jaigom@eis.uva.es

Eduardo Zalama Casanova*
eduzal@eis.uva.es

* Universidad de Valladolid- ETSII
Paseo del Cauce, s/n
47011-Valladolid (España)

[§]Centro Tecnológico CARTIF
Dpto. de Visión Artificial
Parque Tecnológico de Boecillo, Parcela 205
47151-Boecillo (Valladolid)-España

Resumen

En el presente artículo se exponen los fundamentos en los que se basa el prototipo de escáner 3D desarrollado por la ETSII de la Universidad de Valladolid en colaboración con el Centro Tecnológico CARTIF, así como los elementos que actualmente lo componen, tanto a nivel hardware como software. Finalmente se hablará de la aplicación de este prototipo a fines didácticos.

El campo de aplicación de los escáneres 3D para medir la geometría y el color de piezas es muy grande y variado, ya que va desde el control de calidad hasta la creación de prótesis en Medicina, pasando por el comercio electrónico o los museos virtuales. Este gran número de aplicaciones ha hecho que se desarrollaran muchos y diversos escáneres 3D comerciales de alto precio en general.

En este artículo se presenta el escáner 3D desarrollado como una herramienta válida para su uso con fines didácticos y en este sentido con claras ventajas respecto a los escáneres comerciales de precio mucho más elevado.

La utilización de los alumnos de dicho escáner 3D les conferirá una experiencia claramente positiva a la hora de manejar luego los escáneres 3D comerciales instalados en la industria y al mismo tiempo podrán comprender mejor la tecnología subyacente.

Palabras Clave: Información tridimensional, información cromática, visión 3D-color, escáner 3D.

1. INTRODUCCIÓN

El progreso tecnológico de los últimos años ha hecho posible el desarrollo de sistemas para la medición de la geometría y el color de objetos (basándose en la Visión por Computador), que tienen inestimables ventajas frente a sus predecesores (los sistemas de palpación mecánica) como es la ausencia de contacto físico, un tiempo de operación inferior en varios órdenes de magnitud y una versatilidad claramente superior.

Estos sistemas de adquisición de la geometría y el color de objetos basados en la Visión por Computador se han desarrollado rápidamente debido a la gran variedad de aplicaciones en las que estas informaciones son necesarias. Existen aplicaciones industriales como pueden ser el control de calidad o la ingeniería inversa, pero también se pueden utilizar estos sistemas en otros campos como pueden ser la Robótica (reconocimiento de marcas para el guiado de robots), la Medicina (creación de prótesis, cirugía plástica o dental), el Arte (reproducción de obras de arte para su implantación en museos virtuales) o el comercio electrónico (presentación de los artículos en venta a través de navegadores de manera que los clientes puedan verlos en 3 dimensiones, girarlos, etc.).

En este marco se ha creado en la Universidad de Valladolid un prototipo de escáner 3D para la adquisición de las informaciones tridimensional y colorimétrica de objetos. El prototipo adquiere la información basándose en un método óptico. En concreto, de entre las diferentes alternativas existentes [2,10] se ha elegido el principio de triangulación activa por proyección de luz estructurada [5] pues éste método posee gran precisión y versatilidad. Tal método se fundamenta en la proyección sobre las piezas en estudio de un patrón de iluminación (en nuestro caso un plano láser), de forma que se obtienen las coordenadas tridimensionales absolutas de los puntos de la superficie de la pieza a partir de la imagen proporcionada por un sensor de vídeo mediante una simple triangulación.

El prototipo se ha ido desarrollando en sucesivas etapas y se le han ido incorporando nuevas utilidades. En la actualidad el escáner 3D es capaz de obtener la geometría y el color de las piezas que se desee examinar. Para esta tarea se disponen de módulos *software* de adquisición de la geometría y el color, de calibración de las cámaras [6,9] y de filtrado y remuestreo para la mejora de los datos obtenidos. Además se dispone de varias herramientas para la reconstrucción tridimensional (por diferentes métodos como pueden ser Marching Cubes [8,11,12] o Delaunay [4]) de los objetos escaneados, de manera que estos pueden ser visualizados en 3 dimensiones a través de un navegador (como pueden ser *Explorer* o el *Netscape*). También incorpora un módulo para la simplificación [3,7] de los modelos tridimensionales obtenidos, de manera que estos puedan ser transmitidos y visualizados con más rapidez. Por último, el prototipo dispone de un módulo que permite tanto la alineación de diferentes vistas de una pieza [1] (utilidad que posibilita la reconstrucción de un objeto a partir de diferentes vistas parciales del mismo), como la comparación de una pieza con un patrón, lo cual es de gran utilidad en control de calidad.

Todas estas opciones hacen del prototipo en cuestión una herramienta de gran utilidad para numerosas aplicaciones tanto industriales como de otros campos, pero además el escáner se presenta como un producto útil para la docencia de Ingeniería Industrial. Su facilidad de manejo, su concepción tanto a nivel de *software* (que hace que el alumno sepa en cada momento lo que está haciendo), como a nivel de *hardware* (que posibilita que el alumno tenga a la vista cada uno de los elementos que componen el prototipo) y su bajo coste económico en comparación con los escáneres comerciales que se emplean en la industria hacen que este escáner sea un producto muy útil para ser empleado con fines didácticos.

Este artículo ha sido estructurado en 6 secciones: en la sección 2 se habla de los fundamentos teóricos de la adquisición de la geometría y el color, en la sección 3 se hace una especificación del *hardware* utilizado en el prototipo, en la sección 4 se describe el *software* empleado y en la sección 5 se aborda la manera en que el prototipo es utilizado para el aprendizaje de los alumnos, así como los resultados que éstos deberían obtener. Por último en la sección 6 se presentan las conclusiones.

2. FUNDAMENTOS DE LA ADQUISICIÓN GEOMÉTRICA Y DEL COLOR

Vamos a describir en este apartado los fundamentos en los que se basa el escáner a la hora de adquirir la información geométrica (subsección 2.1) y cromática (subsección 2.2), ambas informaciones se recogen secuencialmente. Primero se obtiene la geometría y después el color. Esto es debido a que se necesitan diferentes fuentes de iluminación para cada tipo de información. Para adquirir la geometría se emplea un plano de luz láser y para la obtención del color se emplea un foco halógeno de luz blanca (luz que abarca todo el rango de longitudes de onda del espectro visible).

2.1. FUNDAMENTOS DE LA ADQUISICIÓN GEOMÉTRICA

La adquisición geométrica se basa en el principio de triangulación espacial: “Dada la base de un triángulo, la distancia entre dos de sus vértices y los dos ángulos correspondientes, la posición absoluta del tercer vértice puede determinarse absolutamente”. Según este principio, y como se puede observar en la figura 1, se puede conocer la posición absoluta del punto P si se conoce la distancia D y los ángulos α y β :

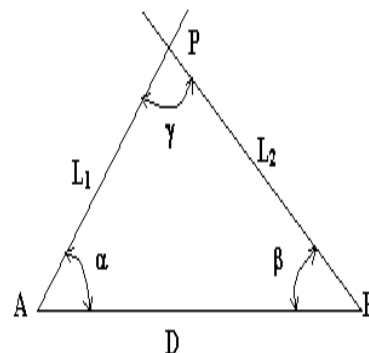


Figura 1: Principio de la triangulación espacial

La aplicación práctica de este principio matemático para la obtención de la información geométrica

mediante triangulación activa por proyección de luz estructurada [5], consistente en situar una fuente de iluminación en el pto. A, en concreto un haz láser plano, y en el punto B colocaremos una cámara. La forma del sistema se puede apreciar en la figura 2:

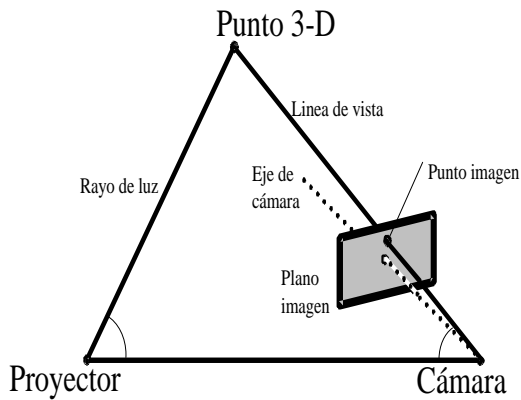


Figura 2: Principio de triangulación activa por proyección de luz estructurada.

Para que el punto 3D exista debe ser visible tanto desde el láser como la cámara (observadores). Esta condición no se cumplirá cuando algún punto de la escena se interponga entre el láser y/o la cámara y el punto en cuestión, lo que dará lugar a regiones desconocidas. Para reducir el tamaño de las regiones desconocidas se debe reducir la distancia láser-cámara, pero esto da lugar a una mayor imprecisión en el conocimiento de los ángulos de observación (α y β de la figura 1), con lo cual se debe llegar a una solución de compromiso entre precisión y tamaño de las regiones desconocidas. Otra forma de solucionar el problema de las regiones desconocidas es aumentar el número de observadores, que es la solución adoptada por nuestro prototipo, ya que disponemos de un observador pasivo (el láser) y dos observadores activos (dos cámaras).

Con estos elementos, la adquisición de la geometría de la pieza se realiza de la siguiente manera: se ilumina con el láser en forma de plano la pieza, como se puede apreciar en la figura 3:

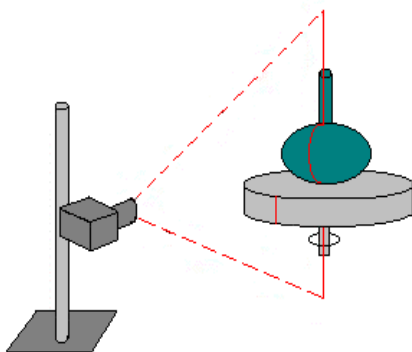


Figura 3: Proyección de plano láser sobre pieza.

Después se recoge la traza del láser sobre la pieza en la imagen dada por las cámaras. Las coordenadas tridimensionales de cada punto de la traza se obtienen resolviendo la intersección entre el plano de luz y las líneas sobre las que dichos puntos se proyectan sobre la imagen. Para obtener la geometría del resto de la pieza se realiza un barrido del láser a través de toda ella, que se logra rotando la pieza mediante la plataforma motorizada en la que se deposita el objeto a escanear.

2.2. FUNDAMENTOS DE LA ADQUISICIÓN CROMÁTICA

La información cromática [5] es muy importante en múltiples campos científicos, en aquellas situaciones donde la apariencia constituya un aspecto determinante: por razones de estética (carrocerías de automóvil), en relación con el estado de la pieza (acabado superficial) o donde resulte una componente vital (inspecciones, catalogación de productos hortofrutícolas, etc.).

Para la adquisición del color emplearemos una fuente de iluminación distinta a la empleada para la obtención de la geometría. En este caso necesitamos una fuente que englobe todas las longitudes de onda del espectro visible (luz blanca con respecto a la que establecer un valor para cada color). Nosotros emplearemos un foco halógeno de intensidad regulable, recrearemos la trayectoria de barrido utilizada para la obtención de la geometría y capturaremos para cada posición de la pieza la información cromática en las coordenadas de la imagen donde se proyectaron los puntos iluminados por el láser en la primera etapa.

3. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

En esta sección vamos a describir todos los elementos que forman el escáner 3D. El prototipo al completo se puede observar en la figura 4:

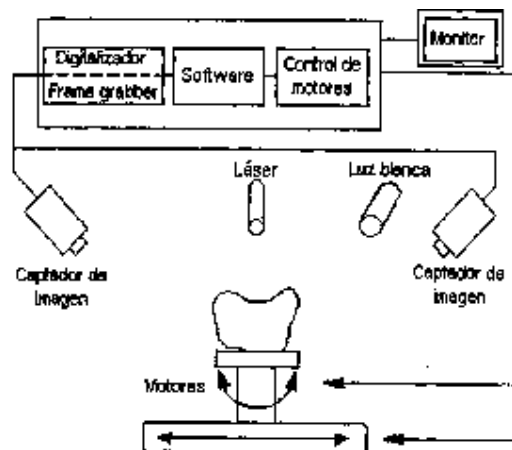


Figura 4: Vista general del escáner 3D.

Los elementos que forman el sistema son:

1. Fuente de iluminación para la adquisición tridimensional: el plano de iluminación se genera mediante un láser de semiconductor LASIRIS, de 30° de ángulo de apertura y 670nm de longitud de onda, dotado de un objetivo para la concentración del haz y una lente cilíndrica plano-convexa. El ajuste del dispositivo nos permite lograr un plano láser de 0,2mm de espesor de traza.
2. Fuente de iluminación para la adquisición colorimétrica: utilizamos un foco halógeno de intensidad regulable, 12V, 75W de potencia eléctrica y 38° de ángulo de apertura.
3. Sistema de barrido: consta de una plataforma de alta precisión (sobre la cual se colocará la pieza) dotada de un eje de rotación y otro de traslación que asegura el movimiento relativo controlado entre la pieza y el plano de luz. Para ello se emplea un sistema posicionador PHYSIK INSTRUMENTE de dos ejes, uno de traslación con una carrera de 600 mm, y otro de rotación que permite giros completos de 360°. Ambos ejes están motorizados en lazo abierto. Para permitir ciertos ajustes, pensando en el proceso de calibración geométrica, se han montado sobre la unidad de rotación cuatro plataformas goniométricas de ajuste fino manual: dos permiten el ajuste de posición en un plano paralelo al plano base y otros dos el ajuste fino de la horizontalidad.
4. Sistema de captación de imágenes: para la captación de imágenes se emplean dos cámaras color: una SONY TVCC RGB DXP-ISLAP y una CV-M70 de JAI. Las dos cámaras son capaces de captar el color aunque la segunda es mejor en este sentido por su linealidad de respuesta y es la que usaremos para la obtención del mismo.
5. Tarjeta de tratamiento de imágenes: La discretización de las señales RGB proporcionadas por los captadores corre a cargo de una tarjeta color IMAGING IC-RGB. El tamaño de imagen con el que se trabaja, medido en píxeles, resulta de 512x512 para la cámara SONY y de 480x636 para la cámara JAI.
6. Sistema informático: El prototipo utiliza un ordenador convencional, actualmente un Pentium III a 450Mhz, con conexiones vía serie hacia la controladora de los motores y que integra la tarjeta digitalizadora IC-RGB para las cámaras. Además el ordenador alberga el *software* propio del sistema.

Todos estos elementos no están unidos de manera compacta en una "caja negra", sino que están separados tal y como se muestra en la figura 4 lo cual presenta la ventaja de que hace al sistema más

intuitivo para el alumno que vaya a hacer prácticas con él ya que puede identificar fácilmente cada elemento y así asimilar mejor qué función realiza.

Por otro lado, el prototipo expuesto consta de una serie de elementos de diferentes fabricantes interconectados a un ordenador y con un *software* que les hace funcionar. Este esquema hace que el sistema sea fácilmente reproducible para cualquier otra empresa o universidad que quiera desarrollarlo. Otra ventaja de este prototipo es su bajo coste económico en comparación con los escáneres comerciales de los que se dispone hoy en día en el mercado (una quinta parte menor), tanto en la inversión inicial como en coste de mantenimiento, ya que al estar sus elementos constitutivos separados entre sí, se puede detectar o intuir fácilmente el elemento que se haya podido estropear, procediendo a su cambio o reparación de manera individual.

4. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Todo el conjunto de elementos físicos descritos en la sección 3 no podría funcionar sin una serie de programas que los controlen y coordinen. En esta sección vamos a describir tanto la arquitectura lógica a escala general, como cada uno de los módulos a nivel particular, dedicando subsecciones específicas a los módulos más importantes.

La arquitectura lógica del sistema se ha desarrollado basándose en una serie de módulos lo más independientes posibles. De esta manera se facilita la puesta a punto, el mantenimiento y la mejora del sistema. El esquema de la arquitectura lógica se aprecia en el siguiente gráfico:

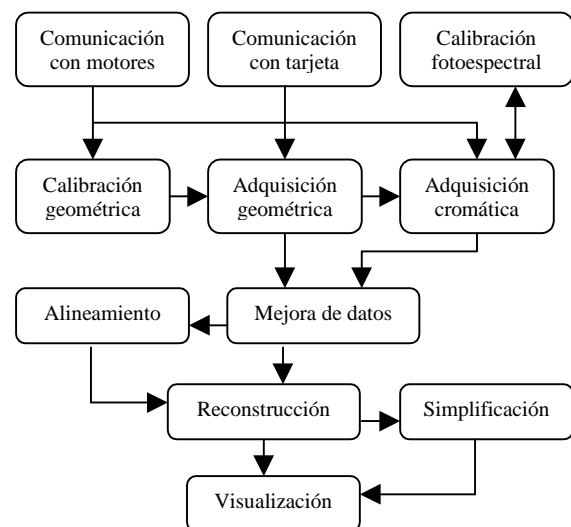


Figura 5: Esquema de la arquitectura lógica del sistema.

El módulo de comunicación con los motores contiene una serie de funciones que realizan las diferentes operaciones sobre los mismos (girar una serie de grados, trasladar los mm deseados, etc.). El módulo de comunicación con la tarjeta digitalizadora contiene las funciones que realizan las operaciones sobre la misma (adquirir imagen, inicializar tarjeta, etc.). Las funciones de estos dos módulos son utilizadas a su vez en los módulos de calibración geométrica y de adquisición geométrica y del color. El módulo de visualización simplemente contiene el visualizador en formato VRML (que en nuestro caso es el COSMOPLAYER 2.1 de SGI).

4.1. MÓDULOS DE CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA Y FOTOESPECTRAL

El módulo de calibración geométrica es sumamente importante, ya que es el que establece la correspondencia entre las coordenadas de los puntos en la imagen (en píxeles) y sus coordenadas tridimensionales reales [6,9]. Para lograr este objetivo se utiliza una mira geométrica (un papel con cuadrados negros sobre fondo blanco fijado a una chapa metálica) con una serie de puntos de control (que son los vértices de los cuadrados), de los que se conocen sus coordenadas tridimensionales. El programa de calibración capta la imagen de la mira (con la cámara que va a ser calibrada) y realiza una segmentación de ésta para obtener las coordenadas de los vértices de los cuadrados. Sabiendo las coordenadas en píxeles de la imagen de los puntos de control y sus coordenadas tridimensionales, se calculan los parámetros que las relacionan, es decir, se obtiene la relación entre las coordenadas (r, c) de los puntos de la imagen y las coordenadas (x_p, y_p, z_p) de los puntos de la pieza, estos sistemas de coordenadas se pueden apreciar en la figura 5:

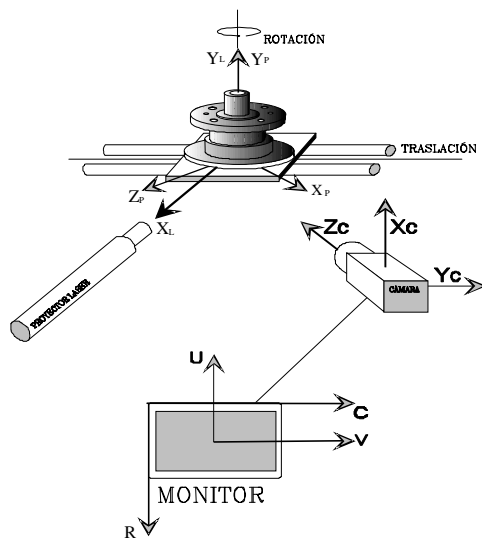


Figura 6: Sistemas de referencia empleados en el módulo de calibración.

El módulo de calibración fotoespectral [5] se encarga del cálculo de la corriente de oscuridad de las cámaras. Este cálculo se realiza tapando al visor de la cámara. El programa calcula el nivel medio de color para cada uno de los canales (rojo, verde y azul) y aplica este nivel (corriente de oscuridad) para corregir las futuras adquisiciones de color, ya que con el visor tapado el nivel de color teórico debería ser nulo.

4.2. MÓDULOS DE ADQUISICIÓN GEOMÉTRICA Y CROMÁTICA

Este conjunto de programas son los que se encargan de la adquisición de datos tridimensionales y de color. El proceso a seguir para la adquisición de estas informaciones se puede apreciar en el siguiente diagrama de flujo:

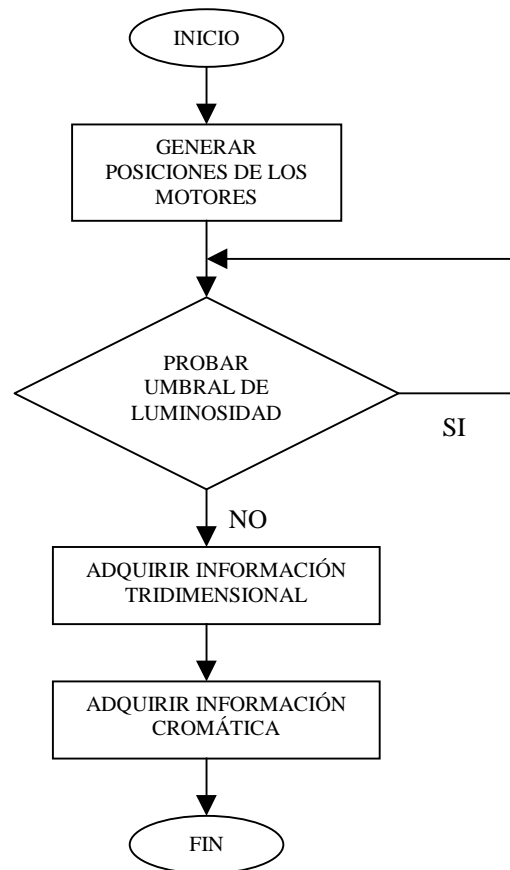


Figura 7: Proceso a seguir para la adquisición de las informaciones tridimensional y cromática.

Primero hay que generar las posiciones de los motores. Este paso consiste en especificar el número de posiciones para las cuales se adquirirá información y cuántos grados sexagesimales (en el caso de la rotación) o mm de desplazamiento lineal (en el caso de la traslación) están separadas esas posiciones. Después se puede probar el umbral de luminosidad. Este es un parámetro que deberemos

regular según la cantidad de luz ambiental. Por debajo de dicho umbral la luminosidad de la traza láser se confunde con la ambiental. Cuando hallamos el valor correcto, probando con la escala que se nos ofrece, pasaremos a adquirir la información geométrica y, posteriormente, con un nuevo barrido idéntico al anterior, la información cromática. Todo este proceso se puede hacer para una de las cámaras o para las dos a la vez.

4.3. MÓDULO DE MEJORA DE DATOS

En este módulo se agrupan una serie de programas que sirven para mejorar los datos adquiridos anteriormente. Estos programas son:

1. Un programa para filtrar los puntos de la traza láser en cada una de las imágenes adquiridas por cada cámara. Se eliminan así todos los puntos de la traza láser que no tengan un vecino en el intervalo de vecindad especificado por el usuario. Este programa resulta muy útil para hacer desaparecer los puntos dispersos que se originan debido al ruido o la mala segmentación de la traza.
2. Un programa para filtrar el volumen de trabajo: este programa, a partir del fichero con los datos adquiridos (coordenadas pieza), nos informa de los valores máximos y mínimos de cada una de las coordenadas (x_p, y_p, z_p) para todos los puntos obtenidos. A partir de esta información podemos restringir el volumen de trabajo, eliminándose todos los puntos que no pertenezcan a la pieza, resultando muy útil para eliminar los puntos de la plataforma de desplazamiento que se obtienen al adquirir datos.
3. Un programa para el remuestreo de los datos. Se calcula el valor máximo, mínimo y el incremento medio de la coordenada Y (altura) para todos los puntos adquiridos. El resultado del remuestreo es, para cada traza, puntos equiespaciados desde Y mínimo a Y máximo con un cierto incremento dado por el usuario. Los valores de las coordenadas x_p, z_p para estos puntos se interpolan entre dos puntos vecinos a uno dado. Este remuestreo es útil tanto para la reconstrucción del objeto (para su posterior visualización), como para realizar diferentes procesos posteriores (filtrados, comparación con modelos, etc.).
4. Existe un programa de filtrado de la nube de puntos. Este filtrado se utiliza para salvar discontinuidades. El resultado será una superficie más suave, con menos cambios bruscos. El método seguido consiste en recalcular las coordenadas de cada punto en función de su coordenada propia y las de los vecinos, ponderadas con unos determinados pesos.

5. Por último, el módulo de mejora incorpora una última utilidad para tapar huecos (siempre y cuando estos no sean de un tamaño considerable). A veces en el proceso de adquisición se producen agujeros (puntos de la pieza que no se captan porque otra parte de ella se interpone entre esos puntos y el láser y/o la cámara). Esta herramienta solventa este problema interpolando con los puntos vecinos al hueco.

4.4. MÓDULO DE RECONSTRUCCIÓN

En este módulo se agrupan la serie de programas que permiten la reconstrucción de la pieza, es decir, a partir de las nubes de puntos adquiridas (con o sin el color) se obtiene un archivo en formato VRML de esa pieza conformada como una malla de triángulos. En este formato la pieza puede observarse en tres dimensiones desde cualquier perspectiva con un visualizador de VRML (en nuestro caso se ha venido utilizando el COSMOPLAYER 2.1 de SGI).

La reconstrucción se puede llevar a cabo por varios métodos:

1. Marching Cubes [8,11]: este algoritmo se estructura en varios pasos. El primero de ellos consiste en un pre-procesado de los datos que implica en el cálculo de la normal en cada punto de la nube obtenida. Posteriormente se realiza la voxelización, que no es más que dividir el espacio tridimensional en pequeñas celdas o elementos de volumen (llamados voxels) y asignar cada punto de los datos a su respectivo voxel. Después se aplica el algoritmo de Marching Cubes propiamente dicho. En esta fase se obtienen los triángulos en cada voxel según una serie de reglas, y por último se realiza un post-procesado consistente en eliminar los voxels y triángulos aislados, cerrar pequeños agujeros y simplificar la maya obtenida, ya que el método de Marching Cubes genera una excesiva cantidad de triángulos.
2. Delaunay [4]: Este algoritmo básicamente consiste en una voxelización, tras la que se calculan una serie de tetraedros cuyos vértices son los puntos dato. Acto seguido se enlazan estos tetraedros para conseguir una perfecta triangulación.
3. TriVRML: Este es un método propio desarrollado por la Universidad de Valladolid. En un primer paso, a partir de los datos tridimensionales y cromáticos obtenidos se genera un fichero de triángulos. En un segundo paso se obtiene el archivo VRML correspondiente.

El primero de los métodos indicados tiene muchos pasos y requiere un gran conocimiento de la pieza

para su aplicación. Delaunay es mucho más rápido e intuitivo, y por ello es el principalmente empleado en nuestros estudios. TriVRML consigue un adecuado completamiento de regiones mal iluminadas y agujeros, pero tiene una menor resolución.

4.5. MÓDULO DE ALINEAMIENTO

Este módulo tiene dos objetivos: uno el poder reconstruir una pieza a partir de diferentes vistas de la misma, y otro el poder comparar piezas con modelos patrón [1]. El primer objetivo surge de la necesidad de solventar el problema de las regiones desconocidas, como se comentó en la subsección 2.1, puesto que a veces una parte del objeto se interpone entre los puntos a obtener y el láser o la cámara, creando regiones desconocidas. Para salvar el problema se pueden emplear varias cámaras o también se puede obtener información del objeto en diferentes posiciones de éste y luego juntar toda esa información. Esto precisamente es lo que realiza el programa de alineamiento. Por otra parte, el segundo objetivo es más intuitivo debido a que muchas veces se hace necesaria la comparación de piezas con modelos para comprobar la validez de éstas. Esto se puede realizar de una forma fácil mediante el programa de alineamiento, complementado debidamente con el programa de comparación.

El programa de alineamiento funciona de la siguiente forma: Parte de dos nubes de puntos (que pueden ser dos vistas de la misma pieza, o dos piezas que van a ser comparadas) y calcula la traslación y rotación que se debe realizar en una de las nubes de puntos para alinearla con la otra. El usuario escoge qué parte de la segunda nube de puntos es la que se va a solapar con la primera. Después el programa toma un número de puntos de la segunda nube (este número es introducido por el usuario de manera aleatoria) y calcula la rotación y traslación a realizar para disminuir la distancia de esos puntos a la primera nube. El resultado del programa es un fichero con las dos nubes de puntos alineadas. Si lo que se pretendía era alinear dos vistas del mismo objeto, tan sólo resta reconstruir el fichero de salida para poder visualizar el resultado. Si se pretendía comparar dos piezas, se debe ejecutar posteriormente el programa de comparación con modelos. Este programa, a partir de una tolerancia introducida por el usuario, clasifica los puntos de la segunda nube de puntos de manera que cuando se visualiza el resultado, se observan en un color distinto (azul celeste) los puntos que distan de la primera nube de puntos más de la tolerancia dada por el usuario. Esto es muy útil, ya que se pueden determinar de un vistazo los puntos en los que las dos piezas se diferencian y por tanto desechar o validar las piezas y localizar dónde se producen los defectos o desviaciones.

4.6. MÓDULO DE SIMPLIFICACIÓN

Este módulo tiene por objetivo la simplificación de las mallas de triángulos de las piezas obtenidas en el módulo de reconstrucción [3,7] (subsección 4.3). Lo que se pretende es lograr una representación de la pieza con un menor número de triángulos, pero conservando en gran medida el nivel de detalle de la pieza original.

Esta simplificación es muy útil, ya que se reduce el tiempo de carga del objeto en el visualizador VRML, y por ende la cantidad de memoria que se necesita para almacenarlo y visualizarlo. También resulta muy útil si lo que se quiere es visualizar objetos a través de Internet (por ejemplo para visitar museos virtuales) ya que disminuye considerablemente el tiempo de transmisión de datos.

El algoritmo en que se basa el programa de simplificación de mallas puede apreciarse en el siguiente gráfico:

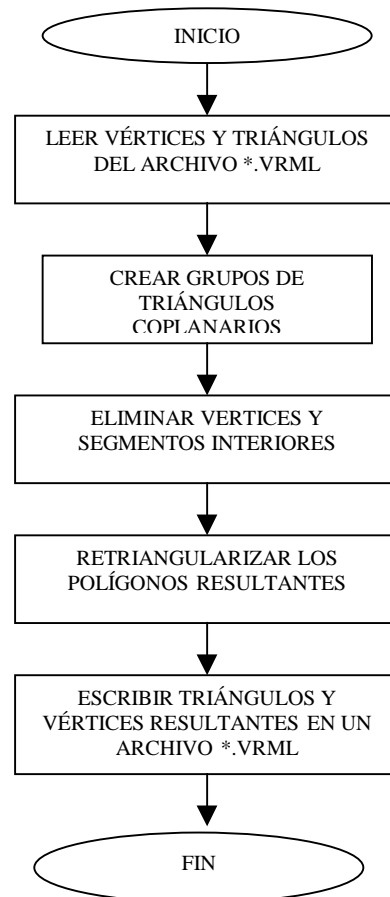


Figura 8: Algoritmo empleado en la simplificación de mallas de triángulos.

Lo primero que hace el programa es "leer" los vértices y los triángulos del archivo correspondiente al objeto reconstruido y los almacena en memoria. El siguiente paso es crear regiones casi coplanarias de

triángulos. Estas regiones van a estar compuestas por triángulos cuyas normales se diferencian entre sí un número de grados inferior a un umbral que especifica el usuario (a mayor umbral, regiones coplanarias más grandes y mayor simplificación).

Seguidamente se procede a eliminar los vértices y segmentos que queden dentro de las regiones coplanarias. Al final de este paso tendremos para cada región coplanaria una serie de aristas que delimitan la frontera de esa región. Hecho esto ya sólo resta retriangularizar cada una de las regiones creadas, para lo que se sigue el siguiente método (figura 9), donde los vértices son puntos dato: se parte de un vértice cualquiera de la frontera de la región (vértice 1), y se intenta construir un triángulo trazando una arista con el vértice 3, que se completa con un tercer vértice (el marcado como 2 de la frontera). Si el triángulo es válido (forma parte de la región y sus aristas no cortan ninguna otra de la frontera), se intenta construir otro triángulo con una arista que vaya del vértice 3 al 5. Si el triángulo no es válido, se intenta el triángulo con arista del vértice 2 al 4 y así sucesivamente. Una vez triangularizadas de este modo todas las regiones coplanarias, se escriben los vértices y triángulos resultantes en un archivo que se puede ver con cualquier visualizador VRML.

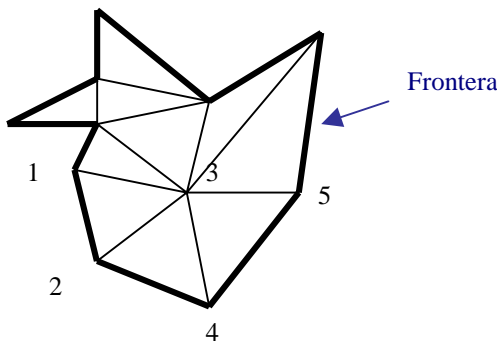


Figura 9: Retriangularización de las regiones creadas en el módulo de simplificación.

4.7. PROCESO GLOBAL DE ADQUISICIÓN

Una vez explicados de manera individual todos los módulos que componen la aplicación, se puede entender más fácilmente el proceso global de adquisición de datos. Este proceso consta de una serie de etapas, algunas de las cuáles son obligatorias y otras optativas. El procedimiento al completo se puede apreciar en el siguiente diagrama de flujo:

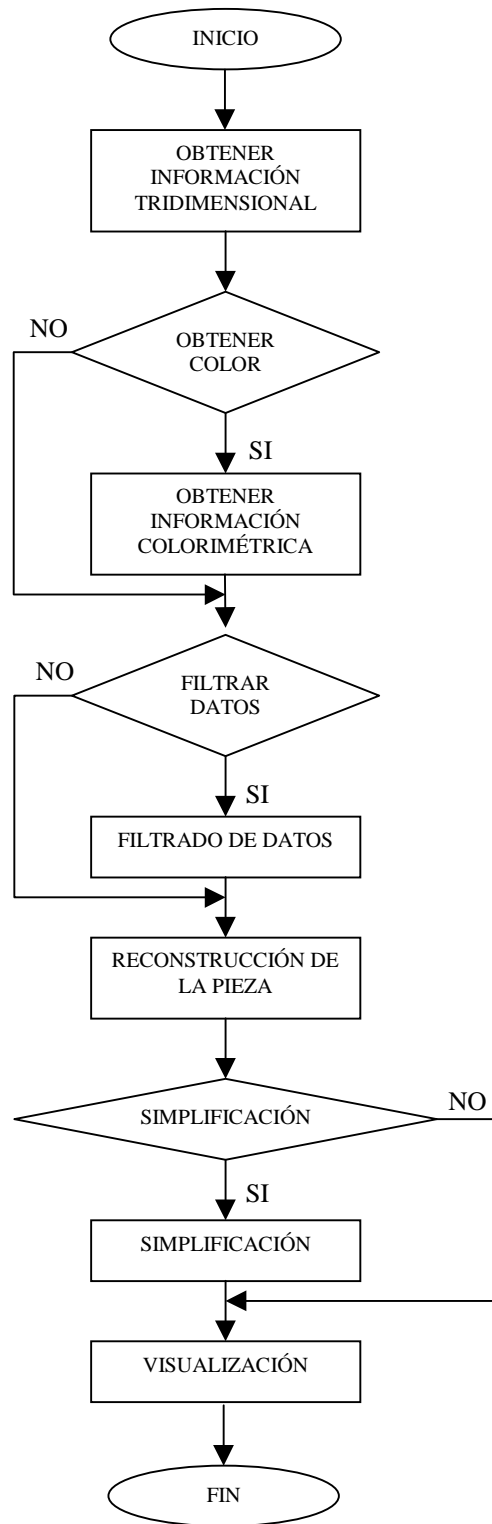


Figura10: Diagrama de flujo del proceso global de adquisición de datos.

5. METODOLOGÍA EMPLEADA

Con objeto de aplicar el prototipo a fines didácticos, se han preparado una serie prácticas que los alumnos deben realizar. Mediante estas prácticas se pretende tanto que el alumno se familiarice con el prototipo de

la Universidad como referente de los escáneres industriales tanto en *hardware* como *software*, como que comprenda y asimile los fundamentos en los que se basa la adquisición geométrica, de color y las operaciones básicas que pueden realizarse para analizar la pieza a estudio. Estos conocimientos le serán de gran utilidad dado el enorme campo de aplicación, actual y futuro, de este tipo de tecnologías.

En un primer trabajo práctico se pretende que el alumno aprenda a manejar con soltura el escáner 3D en cuanto a la adquisición de la geometría y el color de una pieza, para posteriormente reconstruirla. Así, como ejemplo, el alumno debería obtener con ello lo siguiente:



Figura 11: Jarrón reconstruido.

Una segunda práctica consiste en la adquisición de datos de dos piezas diferentes y situadas en distintas posiciones. El alumno deberá hacer uso del programa correspondiente para alinear esas dos piezas así como del programa de comparación para apreciar el grado de solapamiento entre las mismas. El resultado a modo de ejemplo que se obtendría es el siguiente:

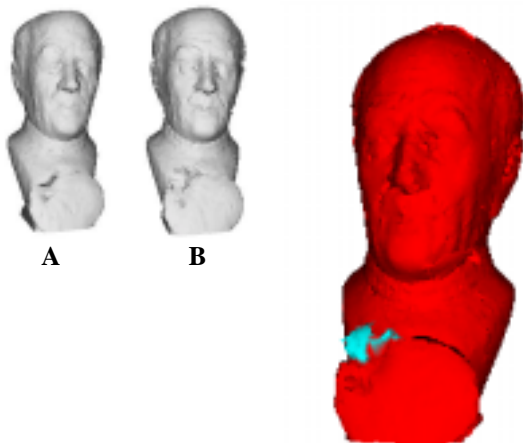


Figura 12: Resultado de la comparación de dos piezas (A y B), tomando como patrón la pieza A.

Se observa en la figura 12 en color azul celeste la zona que diferencia a la pieza a examen (B) de la pieza patrón (A).

También se han pensado otra serie de prácticas en las que el alumno, a partir de los datos provenientes de la adquisición de una pieza (coordenadas de los puntos constitutivos de la misma) debe realizar un programa para calcular diferentes parámetros como pueden ser: el volumen en el que está encuadrada la pieza, distancias medias a los ejes, radios medios de la pieza (para piezas cilíndricas), etc. Estas prácticas están enfocadas a que el alumno participe más activamente, ya que tiene que realizar el programa correspondiente, y para que queden ilustradas parte de las aplicaciones que puede tener el conocimiento de la geometría de las piezas.

También se ha de desarrollar un trabajo práctico sobre la adquisición del color. Se trata de adquirir la geometría y el color de una pieza mate a partir del color captado por la cámara o color aparente (que depende del ángulo que formen la dirección de iluminación y la normal a la superficie iluminada) y aplicando el modelo de reflexión de Phong. El alumno obtendrá así el color verdadero de la pieza. A continuación se expone el histograma comparativo de la pieza con el color aparente (en azul) y con el color verdadero (en rojo) para el canal B (*Blue*) tal y como lo obtendría el alumno:

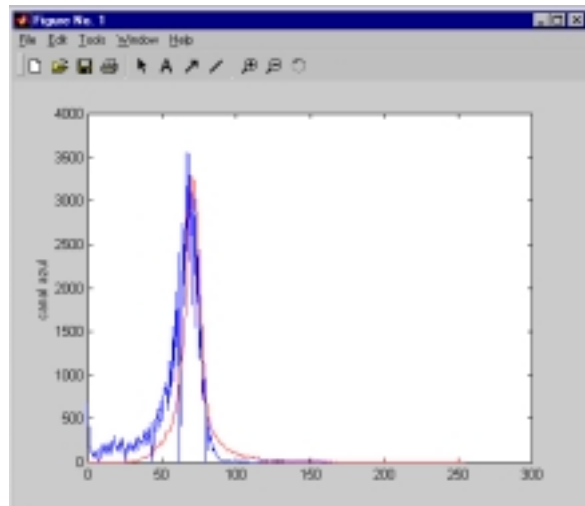


Figura 13: Histograma comparativo de la pieza con color aparente (azul) y verdadero (rojo) para el canal *Blue*.

Por último los alumnos también deberán practicar con el módulo de simplificación. Para ello partirán de la reconstrucción de un objeto e intentarán simplificarla probando con diferentes ángulos umbral, comprobando cómo se puede simplificar la malla de triángulos hasta un determinado ángulo umbral sin perder apenas detalles de la pieza, y cómo para ángulos muy elevados, si bien la simplificación

es grande, la calidad de la pieza obtenida es pobre. Presentamos a continuación un ejemplo de una pieza original (figura 14) y esa misma pieza simplificada (figura 15):



Figura 14: Jarrón reconstruido original. Posee 6904 vértices, 13435 triángulos y ocupa 740Kb de espacio en disco.



Figura 15: Jarrón simplificado. Posee 3721 vértices (se elimina el 46,1% de los vértices originales), 7070 triángulos (se eliminan el 47,4% de los triángulos originales) y ocupa 256Kb de espacio en disco (el 34,6 % del original).

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado un prototipo de escáner 3D como herramienta útil tanto para fines industriales como para su uso con fines didácticos en Ingeniería Industrial. Hemos empezado describiendo los fundamentos teóricos en los que se basa la adquisición de la geometría y el color como base para entender el funcionamiento del prototipo. Posteriormente se ha descrito el *hardware* del

sistema, incluyendo tanto la visión en el ámbito global de dicho sistema, como las características y las funciones de cada elemento. Se ha descrito ampliamente el *software* que hace funcionar al sistema, detallándose la estructura de módulos que lo conforman a nivel general, y se han reseñado tanto las funciones como los algoritmos en los que se basa cada módulo en particular. Por último se ha explicado la manera de aplicar el escáner a fines didácticos, los diferentes trabajos prácticos que los alumnos podrían realizar con él, así como los resultados que éstos obtendrían al realizarlos correctamente.

El escáner descrito posee una gran versatilidad en cuanto a sus posibles usos industriales, ya que es capaz de adquirir la geometría y el color de objetos, reconstruirlos y visualizarlos mediante un navegador, así como alinear varias vistas de una misma pieza o bien dos piezas para su posterior comparación. También permite la simplificación de modelos tridimensionales obtenidos con la reconstrucción, y obtener el color verdadero de piezas mate. Todas estas funciones le hacen ser un sistema de gran utilidad en campos de relevancia como la Industria (inspección de piezas, control de calidad), la Medicina (diseño de prótesis), el Arte (creación de museos virtuales, efectos especiales en películas), el Comercio (venta de productos a través de Internet), etc.

Además de todas las aplicaciones indicadas del escáner, en este artículo se pretende destacar sobre todo su uso con fines didácticos, ya que la estructura a nivel *hardware* y *software* lo hacen especialmente indicado para este fin. Además presenta una indudable ventaja respecto al coste económico de los escáneres comerciales equivalentes. La introducción de este tipo de sistemas para la formación de los alumnos en las Universidades es importante, ya que es necesaria una buena preparación de los estudiantes en campos tan competitivos como las nuevas tecnologías y sus aplicaciones reales.

Referencias

- [1] Baena Alonso, A., Martín Lerones, P., Gómez G.-Bermejo, J., (2000) "Alineamiento de Imágenes Tridimensionales". XXI Jornadas Nacionales de Automática.
- [2] Besl, P.J., (1988) "Active, Optical Range Imaging Sensors". Machine Vision and Applications, N°1, pp. 127-152.
- [3] Erikson, C., (1996) "Polygonal Simplification: An Overview". UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report TR96-016.
- [4] Fang, T.P., Piegl, A., (1995) "Delaunay Triangulation in Three Dimensions". IEEE

- Computer Graphics and Applications, Vol. 15, N°5, pp. 62-69.
- [5] Gómez García-Bermejo, J., Díaz Pernas, F.J., López Coronado, J., (1997) "Obtención Conjunta de las Informaciones Tridimensional y Cromática. Primera Aproximación a la Caracterización Óptica de Superficies". *Informática y Automática*, Vol. 30, N°3, pp. 19-33.
- [6] Healey, G.E., Kondepudy, R., (1994) "Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, N°3, pp. 267-276.
- [7] Hinker, P., Hansen. C., (1993) "Geometric Optimization". *Proceedings of Visualization*, pp. 189-195.
- [8] Lorensen, W.E., Cline H.E., (1987) "Marching cubes: a high-resolution 3D surface reconstruction algorithm". *Computer Graphics: Siggraph'87 Conference Proceedings*, Vol. 21 of Annual Conference Series, pp.163-169.
- [9] Masmoudi, L., López Coronado, J., Gómez García-Bermejo, J., (1995). "Calibración Precisa de Cámaras con Modelo de Distorsión y Reconstrucción Robusta de Coordenadas Tridimensionales". *Informática y Automática*, Vol. 28, N°3, pp. 34-41.
- [10] Masuda, T., Yokoya, N., (1995) "A robust method for registration and segmentation of multiple range images". *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61, N°3, pp. 295-307.
- [11] Rodrigues Martins, F.A., (1999) "A system for building geometric models, with color, from real objects". *Trabajo de Suficiencia Investigadora. Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. ETSII de la Universidad de Valladolid*.
- [12] Roth G., Wibowo E., (1997) "An Efficient Volumetric Method for Building Closed Triangular Meshes from 3D Image and Point Data". *Proceedings of Graphics Interface'97*, pp.173-180.