

DIGITALIZACIÓN AUTOMÁTICA DE SUPERFICIES EMPLEANDO ESCÁNERES ÓPTICOS

Fernando A. Rodrigues Martins
Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, Portugal
Morro do Lena, Alto Vieiro, Apart. 4163, 2401-951 Leiria, Portugal, fmartins@estg.iplei.pt

Pedro Martín Lerones
Centro Tecnológico CARTIF
Parque Tecnológico de Castilla y León, P.205
47151-Boecillo (Valladolid), España, pedler@cartif.es

Jaime Gómez García-Bermejo, E. Zalama Casanova, J. R. Perán González
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid
Paseo del Cauce, s/n, 47011 Valladolid, España, {jaigom, eduzal, peran}@eis.uva.es

Resumen

El desarrollo en la última década de escáneres ópticos basados en el principio de triangulación, ha permitido una fuerte expansión en el área del digitalizado de superficies 3D. La automatización de este proceso es, sin embargo, uno de los mayores desafíos en este campo.

En el presente artículo se expone la digitalización completa de la superficie de un objeto desconocido mediante un sistema constituido por un escáner láser amarrado al cabezal de una Máquina de Medida Tridimensional (MMT) como sistema posicionador y un cabezal rotatorio monitorizado. El conjunto conforma un sistema de 5 grados de libertad. La superficie del objeto es escaneada desde distintas perspectivas con objeto de cubrir la mayor superficie del mismo con la máxima calidad en la adquisición de datos. El modelo incremental creado al efecto, que representa la superficie del objeto, y el espacio de trabajo correspondiente, se utiliza para resolver el problema de la Mejor Próxima Vista (MPV) y definir trayectorias libres de colisiones para cada perspectiva.

Se presentan así alguno de los resultados experimentales obtenidos en laboratorio.

Palabras Clave: automatic surface digitising, optical range sensors, range images, viewpoint planning, next best viewpoint.

1. INTRODUCCIÓN

La digitalización de superficies de objetos reales es un área de investigación que ha reforzado enormemente su interés en la última década. El digitalizado 3-D se emplea en Ingeniería Inversa,

donde un modelo digital debe ser creado a partir de una pieza patrón que no posee modelo CAD asociado, o cuya forma ha sido modificada y no existe documentación de ello. La inspección y control dimensional es otra importante aplicación que requiere de una medición 3-D densa de superficies. Fuera del ámbito industrial, existe también un vasto campo de reales y potenciales aplicaciones como pueden ser: duplicado de obras de arte, museos virtuales, Medicina, multimedia y producciones cinematográficas, así como comercio electrónico.

Los sistemas convencionales de digitalización 3-D se basan en técnicas de palpado mecánico que poseen gran precisión, pero cuya velocidad de adquisición de datos es muy lenta (típicamente un punto por segundo). Además resulta muy compleja su automatización debido a la necesidad de palpar físicamente la pieza a estudio. Por ello, y dada además la posibilidad de daño a la misma, así como la imposibilidad de medir objetos deformables como gomas o espumas, se tienen grandes desventajas con el empleo de tales sistemas. El desarrollo de métodos ópticos en este sentido [1] nos permite superar estas dificultades. Su naturaleza de no-contacto y su capacidad de tomar miles de puntos por segundo (7000 puntos por segundo es algo usual) constituyen el principal motivo de interés y uso de estos métodos. La digitalización automática de superficies es un importante área de investigación, puesto que puede disminuir enormemente la intervención humana en estas tareas, que además requieren de un alto grado de especialización, reduciendo también el tiempo de digitalizado y mejorándose la calidad de los datos obtenidos.

La adquisición de la geometría completa de la superficie de un objeto real empleando un escáner óptico requiere de la toma de imágenes del mismo

desde distintas perspectivas. Ello lleva, o bien a fijar el escáner y mover el objeto con respecto al mismo, o como es el caso que se presenta, mover el escáner alrededor de la superficie del objeto con distintas orientaciones y posterior integración las imágenes obtenidas. Se debe tener especial cuidado en evitar potenciales colisiones entre las partes móviles del sistema (sensor o escáner óptico y sistema posicionador) y las partes fijas u objeto a digitalizar. Otro importante aspecto a tener en cuenta es cómo elegir adecuadamente las distintas perspectivas de escaneado, es decir, el modo en que se planifican las mismas en orden a satisfacer determinados criterios (número de imágenes, precisión, si se adquiere o no la superficie completa, etc.)

En el presente artículo se muestra el resultado del escaneado automático de la superficie completa de un objeto del que no existe un modelo computerizado previo, con una determinada calidad en los resultados. Para obtener los resultados pertinentes se amarra un escáner óptico al cabezal de una Máquina de Medida Tridimensional (MMT) cuya muñeca posee cinco grados de libertad. La adquisición de la geometría de la superficie de la pieza a estudio se lleva a cabo moviendo el sensor a lo largo del espacio de trabajo en que el objeto se considera inserto. El registro del rango de datos obtenido desde distintas perspectivas se computa directamente a través de una matriz de transformación obtenida en el proceso de calibración del sistema. Para describir el volumen del espacio de trabajo y definir trayectorias de escaneado libres de colisiones se lleva a cabo una voxelización de dicho espacio. La detección de colisiones se realiza empleando la descripción del espacio de trabajo y una modelización del sensor y el resto de partes móviles del sistema. La misma descripción del espacio mediante voxels (mapa de voxels) se emplea para originar un modelo incremental de la superficie que se pretende digitalizar, donde también se tiene en cuenta la fiabilidad de las medidas y la orientación de dicha superficie. El mapa de voxels es continuamente actualizado teniendo en cuenta los datos obtenidos por cada perspectiva en el proceso de movimiento continuo sobre la pieza. El modelo espacial de la superficie, y ciertas restricciones, tanto físicas como heurísticas, son empleadas para determinar cuál será la siguiente perspectiva en la digitalización para continuar con la adquisición de datos. La Mejor Próxima Vista (MPV) se ejecuta maximizando la función cuyos parámetros son la cantidad de regiones desconocidas y el área que debe ser reescaneada con objeto de mejorar los datos previamente adquiridos, así como las situaciones en que existe riesgo de colisión.

Algunos trabajos de investigación ya han surgido en el área del escaneado óptico automático de

superficies [5,6,7,8,9]. Las soluciones propuestas varían con el tipo de escáner empleado, la representación del espacio de trabajo, el modelo de representación de la superficie y cómo evitar las potenciales colisiones. Con referencia al tipo de sistema posicionador empleado, algunos trabajos recientes emplean sistemas de pocos grados de libertad, donde las distintas perspectivas se consiguen mediante una mesa giratoria sobre la que reposa y empleada para rotar el mismo [6,7,8]. Lamb *et al* [5] utilizan un sistema posicionador muy similar al que aquí se describe. El empleo de un robot de 6 ejes como sistema posicionador también ha sido objeto de estudio [9,12]. En el trabajo de Zha *et al* [12] el objeto se amarra a la muñeca de un robot en lugar de ser un escáner óptico quien está sujeto a la misma. Exclusivamente [6,7,10] citan el problema de la detección de colisiones. De todos modos, sólo Papadopoulos y Schmitt [6] automatizan el proceso de escaneado para una perspectiva fijada, aunque no se aborda el problema de la MPV. Lamb *et al* [5] y Soucy *et al* [9] emplean también un mapa de voxels del entorno, pero sin tener en cuenta la fiabilidad y grado de precisión en las medidas, tema que es tratado por Pito [7], que emplea este hecho para evaluar la MPV, aunque el sistema posicionador que emplea sólo posee dos grados de libertad. Como puede notarse, algunos de los aspectos que se presentan en el artículo que nos ocupa ya han sido estudiados en las anteriores referencias, pero normalmente se emplean sistemas posicionadores muy simples o algunos de los temas fundamentales para la automatización completa del proceso no son abordados, como son la posibilidad de colisiones, la fiabilidad de las medidas, o la MPV.

El artículo que nos ocupa se estructura como sigue: en la sección 2 se presenta la configuración del sistema empleado. En la sección 3 se dan los detalles fundamentales sobre la automatización del proceso de digitalización, tras lo que se muestran una serie de resultados experimentales en la sección 4. Por último, en la sección 5 se muestran las conclusiones y futuras líneas de investigación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El conjunto físico del sistema empleado consiste en un escaner óptico *Reversa25H* de *3D Scanners* [11], que se amarra a un sistema posicionador que es una MMT *DEA Swift A0.01*, que posee un cabezal rotatorio monitorizado *PH10* de *Renishaw*. El sistema posicionador tiene cinco grados de libertad, tres de los cuales son propios de la MMT, y los dos restantes son dos rotaciones que confiere el cabezal rotatorio. La MMT se utiliza para trasladar el sensor, y el cabezal rotatorio con objeto de seleccionar la orientación del sensor. El sistema en conjunto posee

la suficiente flexibilidad como para adquirir la superficie de objetos de geometría compleja. La fig.1 nos muestra el sistema que hemos descrito. El escáner óptico (fig.2) está constituido por una fuente láser de haz plano, y dos cámaras CCD que operan de acuerdo al principio de triangulación. Las señales de las cámaras son llevadas a una tarjeta de adquisición (*framegrabber*) y posteriormente procesadas en el computador principal en lugar de en la propia tarjeta, lo que nos ofrece un sistema libre de ser empleado con cualquier otro escáner. Nuestro sensor posee un “pequeño” campo de medida (25mmx25mm) y una distancia media al objeto de 100mm. Debido a estos parámetros, el sensor se mueve alrededor del objeto muy próximo a él, por lo que la previsión y evitado de colisiones es un hecho de capital importancia.



Figura 1: Sistema experimental empleado.

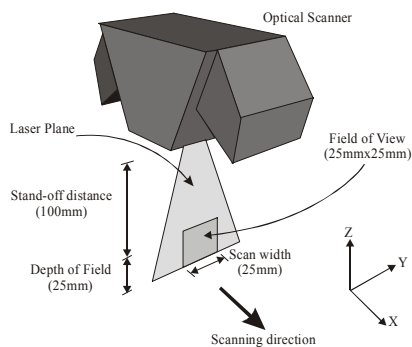


Figura 2: Parametrización del escáner en uso.

El potencial conjunto de perspectivas desde las que puede digitalizarse el objeto quedan definidas por el tipo de sistema posicionador empleado. En nuestro caso, cada una de ellas queda definida por la orientación del sensor (*Reversa 25H*). El cabezal rotatorio a que dicho sensor se amarra (*PH10*) se emplea para elegir tales orientaciones por medio de sus dos ejes de rotación: A y B (fig.3), cuyo rango es de 0 a 90°, y de -180° a 180° respectivamente, con un posible incremento de 7,5° en ambos casos. Debido a las limitaciones físicas que posee el sistema, sólo serán empleadas parte de las potenciales orientaciones que pueden tomarse sobre el objeto a digitalizar.

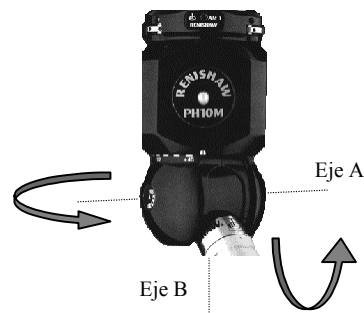


Figura 3: Movimientos del cabezal rotatorio

3. DIGITALIZACIÓN AUTOMÁTICA

3.1. GENERALIDADES

Ya hemos comentado que la digitalización completa de la superficie de un objeto requiere de su adquisición de imágenes desde distintas perspectivas. Más allá de este hecho, como generalmente el objeto a digitalizar no está predefinido, el escáner ha de moverse a su derredor, con el peligro que supone para el proceso el que se produzca un choque entre ambos. De hecho, han de considerarse dos problemas distintos en la automatización del sistema. A bajo nivel, el problema es cómo definir trayectorias de escaneado libres de colisiones para adquirir un determinado rango de imágenes desde una perspectiva dada. Esto constituye el problema de planificación de trayectorias. A alto nivel, el problema es cómo determinar la MPV, que constituye el problema del mismo nombre. Un modelo incremental del espacio de trabajo y de la representación de la superficie a digitalizar es actualizado para cada nueva adquisición y asimismo empleado para determinar la MPV y consiguientemente solucionar el problema de las eventuales colisiones. El proceso global de automatización del digitalizado de un objeto en sus pasos fundamentales está reflejado en el diagrama de la fig.4.

3.2. PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS

Como establecimos en la sección precedente, a bajo nivel deben definirse trayectorias de escaneado libres de colisiones para poder adquirir un rango de imágenes adecuado. Debido a que el escáner ha de penetrar en el espacio de trabajo, es necesario establecer una continua descripción del mismo en orden a adquirir ese rango de imágenes. Con este fin, el volumen inicial desconocido (el espacio de trabajo), que engloba completamente el objeto que va a ser digitalizado, se describe empleando un mapa de voxels de un modo similar a [6]. Dicho espacio de trabajo es inicialmente nombrado como UNKNOWN

y adecuadamente actualizado durante el proceso de escaneado de la superficie mediante la “navegación” alrededor del objeto. Según este proceso, los voxels se actualizan como SURFACE o EMPTY. La parametrización del sensor óptico (fig.5, para el caso en que sólo se considera una de las cámaras) se emplea para identificar y clasificar el espacio de trabajo durante la adquisición de imágenes. Con arreglo a tal parametrización, el campo de medida M es el área resultado de la intersección entre el plano láser L y el campo de visión de la cámara C . Sólo los puntos de la superficie a escanear, $S \in M$, pueden ser adquiridos por el escáner, y ello siempre y cuando sean iluminados por la fuente láser y vistos por la cámara. Los puntos de la superficie en el campo de medida que no resultan iluminados por el láser, se encuentran en la sombra de otros puntos. Asimismo, los puntos no captados por la cámara se consideran ocluidos por otros.

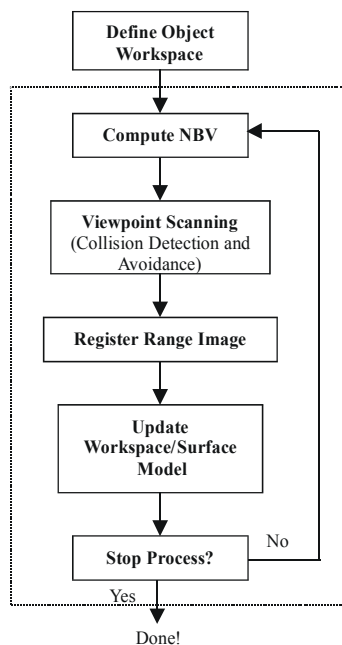


Figura 4: Pasos fundamentales del proceso de automatización del escaneado.

Los puntos de la superficie adquiridos serán empleados para modificar el estatus de los voxels a SURFACE, e igualmente para identificar el espacio complementario EMPTY. Debido a que dichos puntos deben estar iluminados por el haz láser, los rayos constitutivos del mismo deben encontrarse en el espacio libre. Las cámaras deben también ser capaces de captar la superficie adquirida, hecho que se utilizará para definir aún mejor el espacio EMPTY. Por el momento, nuestro sistema sólo emplea el barrido del láser para definir el espacio vacío. Posteriormente veremos cómo emplear ambos factores para extraer más información de los datos tomados de la superficie. Para los casos en que no

existe adquisición de datos de la superficie, es decir, pertenecen al espacio vacío, los voxels respectivos serán catalogados como EMPTY siempre que se tenga la certeza de que no aparecen situaciones de sombra u oclusión.

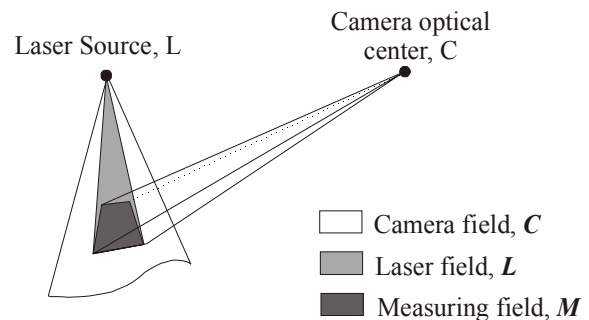


Figura 5: Geometría del sensor óptico (Tomado de [6])

La adquisición de datos de la superficie a digitalizar para cada perspectiva, se obtienen moviendo el escáner óptico a lo largo del espacio de trabajo donde se sitúa el objeto no-predefinido, llevándose a cabo un recorrido alrededor de la superficie del mismo. Se emplea una trayectoria de zig-zag para explorar el espacio de trabajo tras obtener un rango de imágenes para una determinada perspectiva. Este movimiento se caracteriza por el plano en que se realiza el zig-zag y tres direcciones más: avance, desplazamiento lateral y profundidad, que se ejecutan por pasos. El plano de zig-zag es perpendicular al plano láser y tal movimiento se emplea para captar tantos datos de la superficie como sean posibles para la perspectiva que se tiene en ese momento. Así se minimiza el número de perspectivas necesarias para adquirir la totalidad de la superficie. El tamaño del rango de las imágenes adquiridas, para una perspectiva dada, viene determinado por la proyección del volumen desconocido en el plano perpendicular al plano láser. El rectángulo más pequeño en que se enmarque el área correspondiente, define el rango de las imágenes (fig.6). Tal rango se actualiza durante el proceso de escaneado (para cada perspectiva) y es empleado para actualizar a su vez la representación del espacio de trabajo y controlar la trayectoria de escaneado (por ej. se evitan muestreos de zonas ya digitalizadas cuando se requieren distintos movimientos del sistema en profundidad para adquirir tal zona de la superficie).

Para detectar las posibles colisiones que pudieran producirse estando en una determinada perspectiva, se emplea una descripción del espacio de trabajo junto con un modelo del sensor óptico y resto de partes móviles del sistema. En concreto, tal modelo para las partes móviles, está constituido por un conjunto de esferas que engloban completamente las mismas. Así, se estudia la intersección de dichas

esferas con el espacio de trabajo para cada orientación del sensor, antes de que se ejecute el movimiento de zig-zag previamente descrito. En caso de que se diera lugar a una colisión, el sensor se movería a una mayor cota en altura y ejecutaría de nuevo, si procede, el movimiento de zig-zag. De este modo puede detectarse y evitarse cualquier eventual situación de colisión. La fig.7 muestra el conjunto de esferas descrito para modelizar las partes móviles del sistema.

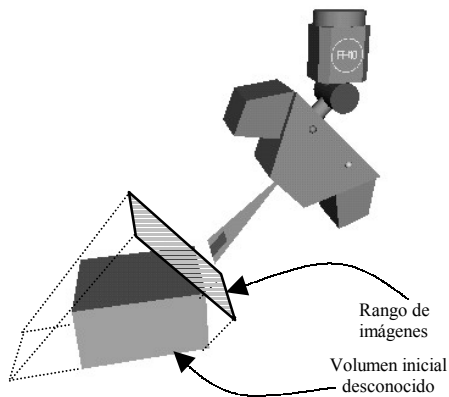


Figura 6: Definición del tamaño del rango de imágenes

Empleando este método de escaneo de la superficie del objeto mediante el movimiento en zig-zag, se obtiene un determinado rango de imágenes por perspectiva. Se crea así lo que denominamos mapa de profundidad. Como, generalmente, son posibles varios planos en los que puede ejecutarse el movimiento de zig-zag, cada uno de ellos a distintas profundidades, este hecho se emplea para optimizar la trayectoria de escaneo en orden a evitar la digitalización de zonas de las que ya se han adquirido datos. Como veremos más adelante, este mapa se empleará también para actualizar el modelo de la superficie del objeto a examen.

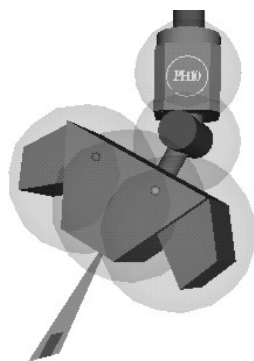


Figura 7: Conjunto de esferas para modelizar las partes móviles del sistema

De modo esquemático, la adquisición de un determinado rango de imágenes para una perspectiva dada, sigue los siguientes pasos:

Partiendo de una posición de escaneo válida:

Leer los datos obtenidos por el sensor óptico

Actualizar el espacio de trabajo y la representación superficial

Establecer la siguiente posición admisible para el sensor óptico

Evaluar las posibles colisiones

Situar el escáner en la siguiente posición libre de colisiones

3.3. ACTUALIZACIÓN DEL MODELO SUPERFICIAL

Es necesaria una constante actualización del modelo de la superficie del objeto que está siendo escaneado para seleccionar la MPV. Se persigue con ello cubrir la máxima superficie a digitalizar con el mínimo de parámetros a considerar al respecto, con una adecuada fiabilidad en los resultados. Denominemos C al grado de fiabilidad en los datos adquiridos. Dicho parámetro nos da cuenta de la calidad de los datos que se obtienen ($0 \leq C \leq 1$) y lo definimos en función del ángulo que conforman la dirección de la perspectiva en la que se encuentra el escáner (S_D), y la normal a la superficie (N_S), esto es:

$$C = (-S_D) \cdot N_S \quad (1)$$

Con ello observamos que la mayor precisión se alcanza cuando el sensor óptico “mira” perpendicularmente a la superficie a escanear. En nuestro caso, la dirección de la perspectiva la marca el haz láser. El modelo de la superficie debe mantener la información local referente a este grado de fiabilidad en la adquisición de datos, así como de la normal a la superficie del objeto para cada perspectiva.

Los datos obtenidos por este procedimiento nos permiten voxelizar el espacio de trabajo (hecho que empleamos para la detección y evitado de colisiones), obtener información local de la superficie y simplificar el proceso de actualización del modelo del sistema. Por ello, en la representación del espacio de trabajo, cada voxel contiene, además de su *status* (*Surface*, *Empty*, o *Unknown*), información local sobre el grado de fiabilidad en la adquisición de datos y la normal a la superficie. Dicho grado de fiabilidad nos permite verificar si el voxel en que nos encontramos requiere de un nuevo escaneo para mejorar ese grado de fiabilidad, y si ese es el caso, la información de la normal a la superficie nos permitirá determinar el grado de fiabilidad esperado, para cada una de las potenciales perspectivas posibles. La adecuada actualización de los voxel del espacio de trabajo se producirá si el grado de fiabilidad obtenido mejora el anterior para una nueva perspectiva de escaneo dada. La estructura de

datos de este proceso se recoge de la siguiente manera:

```
Struct Voxel {
    Status;
    Grado de Fiabilidad
    Normal a la Superficie (nx,ny,nz)
}
```

Se emplea un byte simple para registrar el rango de la fiabilidad en la adquisición (de 0,0 a 1,0) así como el correspondiente rango de cada una de las componentes de la normal a la superficie a digitalizar (de -1.0 a +1.0). Esta aproximación es suficiente para nuestros propósitos, y la actualización continua del mapa de voxels que configura el espacio de trabajo no requiere de grandes recursos de memoria.

El proceso de actualización del mapa de voxels se lleva a cabo después del proceso de escaneado para cada perspectiva. Después del registro del rango de imágenes que en ese momento nos ocupa, se origina la lista actualizada momentánea de voxels correspondiente. Cada elemento de la lista contiene un valor medio del grado de fiabilidad en las medidas y de la normal a la superficie de los datos adquiridos. El mapa de voxels que conforma el espacio de trabajo será actualizado si sus elementos constitutivos asociados del actual rango de imágenes, poseen un grado de fiabilidad superior.

Empleando esta estructura en voxels para crear un modelo incremental de la superficie a examen, se simplifica el proceso de actualización del modelo cuando se compara con una superficie mallada del objeto. Los modelos hasta ahora considerados para la integración de un rango de datos y actualización incremental, *Zippering* [10] y *Marching Triangles* [4], no abordan adecuadamente el aspecto de llevar asociado una fiabilidad en la adquisición de datos. La razón de ello estriba en que algunos de los triángulos obtenidos en el modelo superficial previo, pueden ser eliminados si se obtiene un rango de datos con un grado de fiabilidad superior. Por esta razón, de hecho, se ha de configurar un modelo completamente renovado tras cada nueva perspectiva de escaneado, con objeto de mantener un modelo superficial con la óptima calidad para el rango de datos adquirido. Esto, por supuesto, tiene un coste temporal, pero, por el contrario, disponemos continuamente de un modelo de la superficie digitalizada durante el proceso automático de escaneado. Al final del mismo, se genera una superficie muy realista y fiable teniendo en cuenta los puntos que han resultado poseer un mejor grado de fiabilidad. El modelo expuesto, y el proceso que lo acompaña, puede también ser empleado para localizar pequeñas regiones que requieren de un reescaneado a posteriori, por ej. rellenado de agujeros, o afinar la adquisición local obtenida.

3.4. DETERMINACIÓN DE LA MPV

La ya entendida necesidad de tomar distintos rangos de imágenes desde diferentes puntos de vista para digitalizar completamente la superficie del objeto a examen, nos lleva a considerar el problema de cómo definir la MPV. De hecho, es un problema inherente a la planificación de perspectivas. En esta tarea se deben tener en cuenta las restricciones físicas asociadas al sistema empleado, y los criterios a tener en cuenta para efectuar una digitalización determinada. En nuestro caso se persigue escanear la mayor superficie posible de un objeto con un grado de fiabilidad (véase sección 3.3) por encima de un umbral mínimo establecido. Por ello el número de perspectivas posibles para proceder al escaneado de un objeto debe ser el menor posible, considerando siempre la existencia de posibles colisiones. El *status* del espacio de trabajo que se posee en cada momento se emplea para resolver el problema de la planificación de trayectorias. En nuestro sistema, el conjunto potencial de posibles perspectivas queda definido por el número finito de posibles orientaciones del sensor óptico que son permitidas por el cabezal rotatorio a que se encuentra amarrado. De entre estas perspectivas, se selecciona la MPV correspondiéndose con la mayor de ellas, es decir, la que optimiza una determinada función objetivo. Tal función tiene en cuenta la cantidad de regiones desconocidas, la cantidad de zonas que deben ser reescaneadas para optimizar la calidad de los datos (grado de fiabilidad) así como las potenciales situaciones de colisión. Esta función se evalúa para cada una de las potenciales perspectivas posibles, siendo la MPV la que cubre una mayor área de digitalizado. Osea, dicha función se evalúa para cada orientación, hasta que haya una de ellas que satisfaga unos requisitos mínimos fijados por el usuario (por ej. escanear el mínimo área desconocida, o el área de grado mínimo de fiabilidad). Con objeto de determinar la adecuación de cada potencial perspectiva, v_i , se emplea la siguiente función:

$$G(v_i) = w_u \cdot G_u(v_i) + w_s \cdot G_s(v_i) \quad (2)$$

Donde, a su vez, G_u y G_s son funciones que dan cuenta del volumen desconocido y área conocida respectivamente (con bajo grado de fiabilidad para cada perspectiva potencial). w_u y w_s son los pesos asociados correspondientes.

El volumen desconocido, para cada orientación, se define como el número de voxels catalogados como UNKNOWN de la representación del espacio de trabajo, y que son captados y registrados desde la perspectiva dada. Consideramos que un voxel es captado si no hay ningún obstáculo entre la fuente láser y el propio voxel, es decir, sólo hay voxels EMPTY en la trayectoria de iluminación.

Consideramos que un voxel es registrado o captado, cuando el escáner puede posicionarse libre de colisiones de tal modo que ese voxel es observado. El cómputo indicado se lleva a cabo considerando el voxel reducido a su punto central. Esta aproximación es correcta siempre que el tamaño del voxel sea muy inferior al campo de medida del sensor óptico.

De modo análogo, la superficie a digitalizar se cuantifica mediante el conteo de voxels catalogados como SURFACE, y que pueden ser escaneados (captados y registrados) con un grado de fiabilidad por encima de un valor predefinido. La superficie normal asociada a los voxels de bajo grado de fiabilidad se emplea para computar el mismo en cada perspectiva. De nuevo los voxels son considerados como equivalentes a su punto central a efectos de ser iluminados por la fuente láser.

El área que puede ser vista para cada perspectiva v_i con al menos un mínimo grado de fiabilidad C_{min} viene dada por:

$$G_s(v_i) = \sum_{vox_i} \frac{C_{min} - C_{vox_i}}{C_{min}}, \text{ con: } (-S_D) \cdot N_{vox_i} \geq C_{min} \quad (3)$$

donde S_D es la dirección de la perspectiva en cuestión. N_{vox_i} es la normal a la superficie asociada a los voxel SURFACE, C_{vox_i} el grado de fiabilidad asociado a tales voxels y C_{min} el mínimo grado de fiabilidad permitido, que está predefinido. La función $G_s(v_i)$ ha de ser dividida por la suma de los voxels SURFACE de bajo grado de fiabilidad con objeto de ser normalizada.

Pueden emplearse los pesos pertinentes (ec.2) para dar mayor o menor importancia a cada factor en la determinación de la MPV. Las funciones constitutivas de la ec.2 deben estar normalizadas. Es ahora cuando puede comprenderse de una manera clara por qué es preferible una representación continuamente actualizada de la superficie a digitalizar (voxels), que una representación de la misma en malla de triángulos: el número de elementos que es necesario procesar con objeto de determinar la MPV es bastante más pequeño. Además se emplea el mismo mapa de voxels para describir el espacio de trabajo con objeto de detectar y evitar colisiones (voxelización del mismo y representación de la superficie a escanear). Otro aspecto destacable es que dicha estructuración en voxels conduce a un procedimiento más simple de actualización. La desventaja reside en el hecho de que el empleo de voxels puede ocasionar que se pierdan pequeños detalles de la superficie del objeto a examen. Por ello, es a veces necesario un

reescaneado, con el propósito de afinar ciertos aspectos superficiales que pueden ser detectados mediante un mallado de triángulos a partir de los datos adquiridos en la digitalización

El proceso automático de escaneado finaliza si en la determinación de la MPV no se logra alcanzar una orientación capaz de adquirir un volumen UNKNOWNM mínimo, o si el área cuyos datos se están adquiriendo presenta un grado de fiabilidad por debajo del umbral predeterminado.

3.5. REGISTRO DE DATOS

La digitalización de un objeto desde distintas perspectivas implica la consideración del adecuado registro de los datos que se obtienen. Pueden tenerse en cuenta dos métodos distintos para lograr que dichos datos se refieran a un mismo sistema de referencia: el uso de métodos matemáticos basados en el algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) [13], o realizar una calibración individual por punto obtenido. En nuestro caso el registro de datos se lleva a cabo a través de una matriz de transformación originada tras calibrar el sistema, y que establece la posición y orientación relativas del sensor óptico con respecto a la MMT en el punto de amarre. Esto nos permite enmarcar los datos obtenidos en un sistema de referencia común.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la sección que nos ocupa presentamos algunos de los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de laboratorio, tras implementar el sistema automático de digitalización. Tomando un conjunto determinado de perspectivas previas, se obtuvo la matriz de transformación que nos permite el adecuado registro de los datos que se adquieren. Los objetos empleados en los experimentos se muestran en la fig.8.

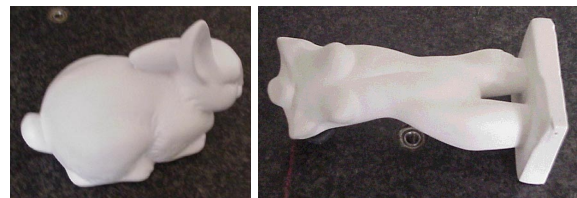


Figura 8: Objetos empleados en los experimentos

En el caso de la primera pieza (el conejo), la superficie fue digitalizada a pasos de 2,5 mm de separación entre líneas de iluminación láser consecutivas (en la dirección principal de escaneado). Se han empleado voxels de 4 mm de lado para representar el espacio de trabajo (165×100×120mm).

El mínimo grado de fiabilidad en la adquisición de datos, se corresponde con el máximo ángulo de perspectiva para el escáner, que experimentalmente se tomó como $50,0^\circ$. Los resultados de la digitalización automática de este primer objeto se muestran en las fig.9 a 11. En la primera de ellas podemos observar la actualización del modelo superficial tras cada perspectiva considerada. Las regiones de bajo grado de fiabilidad, por debajo del valor preestablecido, presentan voxels más oscuros.

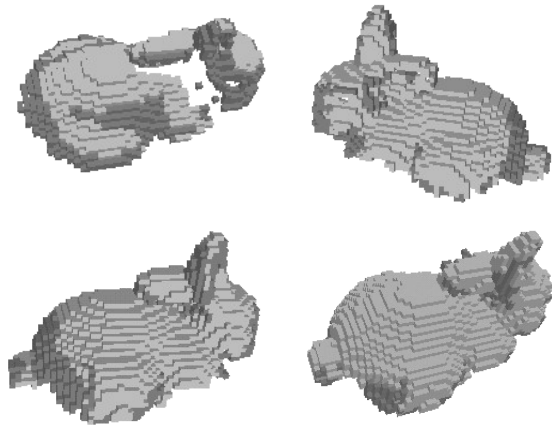


Figura 9: Representación de la actualización del modelo de superficie para cada perspectiva

El mapa final de voxels contiene casi un 20% de voxels de este tipo, considerando que el sistema automático ha tomado cinco perspectivas distintas del objeto. En el caso de este primer objeto, los resultados muestran que es necesario un reescaneado en determinadas zonas, empleando otras perspectivas si se desea satisfacer el grado de fiabilidad marcado para toda la superficie. Debe ser también tenido en cuenta que habrá zonas que no podrán ser digitalizadas adecuadamente debido a las limitaciones físicas del sistema y al posicionamiento del objeto. En la fig.10-a se muestra el objeto escaneado vía su mallado mediante triángulos en la perspectiva correspondiente. Este es el caso más desfavorable y del mismo modo podría procederse con el resto de perspectivas de la fig.9. Debido al hecho de que el rango de imágenes obtenido mantiene la relación de vecindad entre los puntos 3-D obtenidos, el mallado indicado se realiza formando triángulos entre puntos cuya distancia entre sí es inferior a un cierto umbral. El vector normal a la superficie para cada punto, se computa también a partir del rango de imágenes adquirido a través de los vecinos más próximos a un punto dado. La fig.10-b ilustra la representación del espacio de trabajo (espacio "ocupado") tras un primer digitalizado. Los voxels más oscuros corresponden a los catalogados como UNKNOWN.

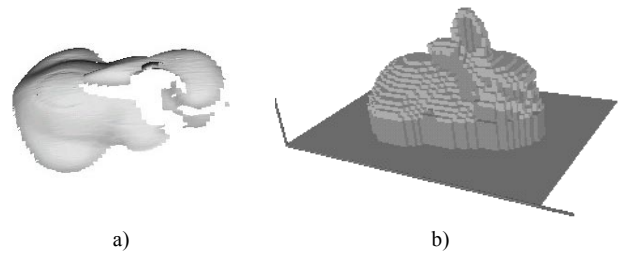


Figura 10: a) Mallado del rango de imágenes b) Espacio de trabajo

La fig.11 muestra los resultados del mallado por triangulación (b y c) mediante la nube total de puntos que se da en la fig.11-a. El primero de tales resultados muestra el solapamiento no redundante de las mallas de los escaneados parciales realizados para completar la perspectiva dada en la fig.9 (primera imagen). La fig.11-c se obtuvo mediante un mallado por triangulación de Delaunay a partir del conjunto de imágenes obtenidas.

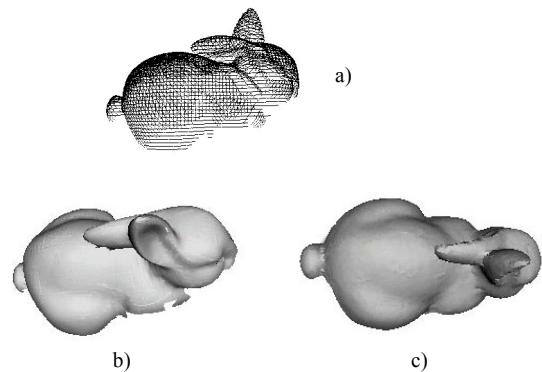


Figura 11: a) Nube de puntos b) Solapamiento c) Modelo superficial final

En las figuras 12 y 13 se muestran resultados similares empleando como figura un cuerpo femenino. En este caso la figura fue digitalizada a pasos de 1,5 mm y los voxels presentan un lado de 3 mm. La figura 12-a muestra el espacio de trabajo (los voxels más oscuros corresponden a espacio desconocido). Ello tras una digitalización automática en que se consideran cinco perspectivas distintas. El grado de fiabilidad obtenido se muestra en la figura 12-b. Sólo el 9% de todos los voxels presentan un grado de fiabilidad inferior al preestablecido y son de color más oscuro.

Teniendo en cuenta todas las perspectivas tomadas, en la fig.13 podemos observar, respectivamente, la nube de puntos adquirida, así como la reconstrucción final de la superficie empleando solapamientos parciales y triangulación de Delaunay.

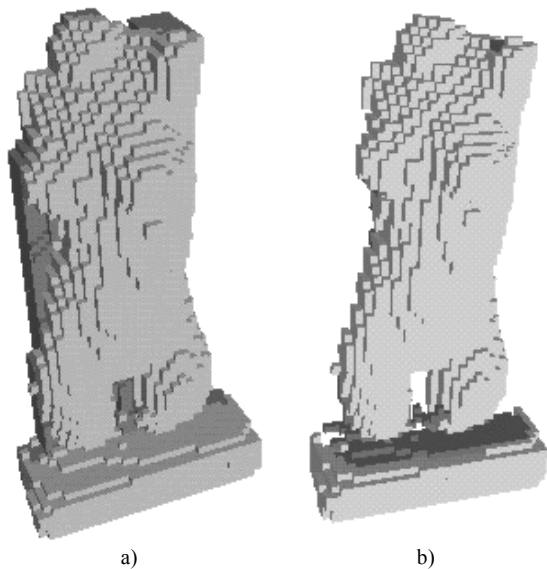


Figura 12: a) Espacio de trabajo b) Mapa de voxels de la estatua femenina

En los dos casos experimentales expuestos los pesos de la función objetivo empleada para la de terminación de la MPV, fueron: 0,6 para w_u y 0.4 para w_s , esto es, recibe una mayor ponderación el volumen desconocido (véase sección 3.4).

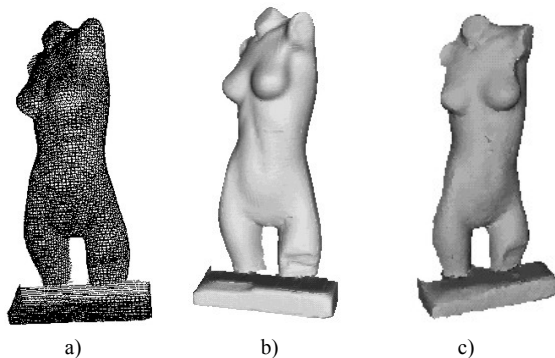


Figura 13: Resultados con la escultura femenina, a) Nube de puntos b) Solapamiento c) Triangulación de Delaunay

Por supuesto el método mostrado en la automatización del digitalizado, puede ser extrapolado a objetos de los que se dispone de un modelo CAD. Este hecho podría emplearse en tareas de inspección. La diferencia con el desarrollo descrito estriba en que el espacio de trabajo se inicializa con datos conocidos (espacio ocupado y normales a la superficie). Durante el proceso automático de escaneado, sólo se actualizaría la representación superficial, teniendo en cuenta el grado de fiabilidad de cada voxel asociado. Quizá debiera considerarse para este tipo de aplicaciones, que el modelo CAD está alineado respecto al objeto a examinar.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se ha presentado un sistema completo de escaneado automático de superficies de objetos no predefinidos. Tal sistema posee cinco grados de libertad y está dotado de un escáner óptico que se mueve alrededor de la periferia del objeto, guiado por el sistema posicionador. El sistema es capaz de definir trayectorias de escaneado libres de colisiones y, mediante un algoritmo de planificación de perspectivas, se puede computar la MPV teniendo en cuenta las restricciones físicas inherentes al sistema y el objetivo de máxima adquisición de datos de la superficie con un grado de fiabilidad en los mismos superior a un umbral definido por el usuario. Se emplea un modelo incremental, actualizado para cada nueva perspectiva, que considera un mapa de voxels tanto para la superficie escaneada, como el volumen de trabajo, y es empleado para determinar la MPV y detectar y evitar posibles colisiones. Este mismo modo de proceder puede también ser usado para adquirir datos de un objeto del que se dispone de modelo CAD, siempre que el objeto y tal modelo estén alineados. Ello sólo requiere de una inicialización del mapa de voxels.

Una desventaja del método propuesto es que, al emplearse una voxelización para caracterizar la superficie del objeto a digitalizar, detalles finos de tal superficie pueden ser perdidos. Por ello, los futuros trabajos de investigación se encaminan hacia el desarrollo de una segunda fase de digitalización que mejore las características locales. Por otra parte, el mallado final del rango de datos adquirido puede emplearse para detectar pequeños agujeros y regiones de bajo grado de fiabilidad, guiando al digitalizado en su proceso de mejora.

El método propuesto puede ser fácilmente adaptado a distintos escáneres ópticos y sistemas posicionadores.

Otra futura línea de investigación que proponemos, es el empleo de sistemas posicionadores de 6 grados de libertad y desarrollar los métodos apropiados de planificación de trayectorias para que éstas queden exentas de colisiones.

El desarrollo de nuevos tipos de trayectorias de escaneado, especialmente cuando se dispone de un modelo CAD del objeto, es otro aspecto de trabajo futuro muy interesante.

Agradecimientos

Con referencia a uno de los autores, el soporte económico de la *Fundação para a Ciência e Tecnologia* (FCT), de Portugal. También mencionar

la colaboración del Centro Tecnológico CARTIF, en Valladolid, España, así como el programa FEDER de la UE.

Referencias

- [1] Besl, J. P., (1988), "Active, optical range imaging sensors", *Machine Vision and Applications*, vol.1, nº 1, pp.127-152.
- [2] Besl, J. P., McKay, N. D. (1992), "A method for registration of 3d shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14(2), págs.239-256.
- [3] Fang, T., Piegl, A., (1995), "Delaunay Triangulation in Three Dimensions", *IEEE Computer Graphics and Applications*, págs. 62-69, September.
- [4] Hilton, A., Toddart, A., Illingworth, J., Windeatt, T., (1996) "Marching Triangles: Range Image Fusion For Complex Object Modelling", In *International Conf. On Image Processing*, págs. 381-384, Lusanne.
- [5] Lamb, D.G., Baird, D.L., Greenspan, M.A., (1999), "An Automation System for Industrial 3-D Laser Digitizing", *3DIM99 : Proceedings of the 2nd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, Ottawa, Canada, Oct. 4-8, págs. 148-157.
- [6] Papadopoulos-Orfanos, D., Schmitt, F., (1997), "Automatic 3D Digitisation Using a Laser Rangefinder with a Small Field of View", *Int. Conf. on Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modelling*, págs. 60-67.
- [7] Pito, R., (1996), "A sensor based solution to the next best view", *International Conference on Pattern Recognition*, Austria, págs. 941-945.
- [8] Reed, M. K., Allen, P.K., Stamos, I., (1997), "Automated model Acquisition from Range Images with View Planning", *Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, págs. 72-77.
- [9] Soucy, G., Callari, F.C., Ferri, F.P., (1998), "Uniform and Complete Surface Coverage with a Robot-Mounted Laser Rangefinder", In *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, págs. 1682-1688.
- [10] Turk, G., Levoy, M., (1994), "Zippered polygon meshes from range images", in *Computer Graphics (Siggraph '94)*, vol. 26, págs. 311—318.
- [11] Web Site, <http://www.3dscanners.com>
- [12] Zha, H., Morooka, K., Hasegawa, T., Nagata, T., (1997), "Active Modeling of 3-D Objects: Planning on the Next Best Pose (NBP) for acquiring Range Images", *Int. Conf. on Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modelling*, págs. 68-75.