

# Sistema Integrado de Posicionado, Visualización y Acotamiento de Áreas de Trabajo en Cirugía Ortopédica

Alicia Casals, Joan Basomba, Eduard Bergès, Manel Frigola, Josep Amat

**Resumen**—La percepción que el cirujano tiene de la intervención que está realizando es esencial para garantizar una operación segura y eficiente. En cirugía robotizada los sistemas de percepción disponibles son muy limitados, lo que puede paliarse generando información visual a proyectar sobre el paciente. El trabajo describe el modo de generar y proyectar la imagen 3D obtenida por TAC, así como trayectorias previamente planificadas, que serán de ayuda al guiado. Esta información es también utilizada para el guiado del robot que trabaja en cooperación con el cirujano, en modo comanipulación, evitando situaciones de riesgo y ayudando al cirujano en el guiado de los instrumentos quirúrgicos.

## I. INTRODUCCIÓN

LOS distintos ámbitos de la cirugía son, por sus características, susceptibles a poder beneficiarse de la asistencia de tecnologías robóticas en muy distinto grado. Ello es debido a la tipología de los tejidos sobre los que hay que actuar, blandos o rígidos, y también a si la intervención se efectúa sobre partes que pueden ser fijadas en una posición y orientación invariante durante la intervención o si, por el contrario, este requisito no puede garantizarse. Las intervenciones sobre tejidos blandos, órganos que son deformables y sufren movimientos al manipularlos, solamente pueden robotizarse si se consiguen modelos suficientemente fiables del comportamiento de las partes que intervienen en la cirugía frente a la interacción con los instrumentos quirúrgicos. La dificultades en esta modelización hacen que actualmente solo se utilice la robótica en sistemas teleoperados, en que el teleoperador, el cirujano, se apoya en los sistemas de percepción y mejoran sus condiciones de trabajo y efectividad por las posibilidades de asistencia de la robótica, como cambios de escala, cambios de referencia de acceso, compensación de movimiento, utilizando técnicas de teleoperación asistida. En cambio, en cirugía ortopédica, por el hecho de trabajar sobre elementos rígidos, no deformables, el problema se reduce de forma significativa. La tipología de este tipo de intervenciones que comportan operaciones básicamente de

mecanizado como: cortar, fresar, taladrar, o la inserción de prótesis, ofrece un gran paralelismo al mecanizado industrial, altamente automatizado y robotizado. La robotización en este caso, mediante la utilización de técnicas tipo CAD/CAM es factible si puede garantizarse la inmovilización de la parte a intervenir. En caso contrario es necesario disponer de sistemas de navegación que garanticen un seguimiento suficientemente preciso del movimiento para compensarlo y que la respuesta del sistema permita limitar los errores producidos por los retrasos, que en cualquier caso hacen necesario utilizar técnicas de predicción. Estas exigencias hacen que en la actualidad únicamente existan robots operando en cirugía ortopédica con la parte o miembro inmovilizado [1], siendo todavía el problema de la referenciación a un sistema de coordenadas común de todos los elementos implicados un problema no resuelto de forma general [3].

El trabajo que se presenta aborda el problema de referenciar, sobre un mismo sistema de coordenadas, las imágenes preoperatorias obtenidas por tomografía con el paciente, ya situado en la mesa de operaciones, y con el robot asistente o instrumentos quirúrgicos, según se trate de cirugía robotizada o cirugía manual con asistencia al guiado. Es decir, se trata de un navegador que mediante el registro entre las imágenes preoperatorias y unas referencias situadas sobre el paciente, permite proyectar superficies de imágenes anatómicas obtenidas por segmentación de imágenes tomográficas sobre la superficie del paciente, de manera que el cirujano puede “ver” el interior en tiempo real y los instrumentos que el mismo está utilizando. El navegador no se limita a visualizar los elementos de interés, también proporciona la ayuda consistente en facilitar, dificultar o impedir el movimiento al guiado manual o robótico, en función de paredes virtuales que el cirujano ha definido previamente en la fase preoperatoria.

## II. LOCALIZACIÓN Y GUIADO A PARTIR DE IMÁGENES

El guiado de útiles o instrumentos radica en disponer de dispositivos que permitan localizar en el espacio los objetos de interés en cada caso. Los localizadores o navegadores utilizados en cirugía se basan normalmente en un conjunto de marcadores que pueden ir incorporados, o no, sobre los instrumentos quirúrgicos. Las técnicas para poder localizar estos marcadores incorporados en los instrumentos o sobre partes del paciente, suelen basarse en sistemas de visión

Este trabajo está desarrollado en el marco del proyecto **DPI2008-06857-C02-0**, Estudio y Desarrollo de Estrategias de Cooperación Multirobot con Arquitecturas Redundantes del Plan Nacional:

A. Casals, M. Frigola. Institut de Bioenginyeria de Catalunya y Universitat Politècnica de Catalunya, BarcelonaTech. (alicia.casals@upc.edu, manel.frigola@upc.edu).

J. Basomba, E. Bergès y J. Amat. Universitat Politècnica de Catalunya, BarcelonaTech (joan.basomba@upc.edu, josep.amat@upc.edu).

estereoscópica, aunque también pueden utilizarse sistemas basados en otras tecnologías como los sensores magnéticos.

El cálculo de la posición y orientación relativa entre paciente y robot comporta una cadena de calibrados entre paciente-instrumento de medida-robot, ya que todos ellos tienen ejes de coordenadas diferentes que deben referenciarse mutuamente. Los localizadores permiten situar en el espacio referenciado por el propio instrumento de medida las marcas o elementos anatómicos relevantes del paciente. Por otro lado, los mismos localizadores pueden obtener un cierto número de puntos, correspondientes a posiciones en el espacio del robot, lo que permite obtener los ejes de referencia del robot en relación con el sistema de localización. De esta forma el sistema de localización permite registrar los ejes correspondientes a la anatomía del paciente con los ejes de coordenadas del robot. La figura 1 muestra los diferentes sistemas de coordenadas y la figura 2, la localización manual de un elemento anatómico utilizando un localizador óptico. Para poder realizar la operación quirúrgica a partir de la información obtenida previamente por tomografía, hace falta también el registro entre los ejes de las imágenes 3D reconstruidas en la tomografía y los ejes del paciente en el quirófano, cuya posición no es coincidente (Figura 3).

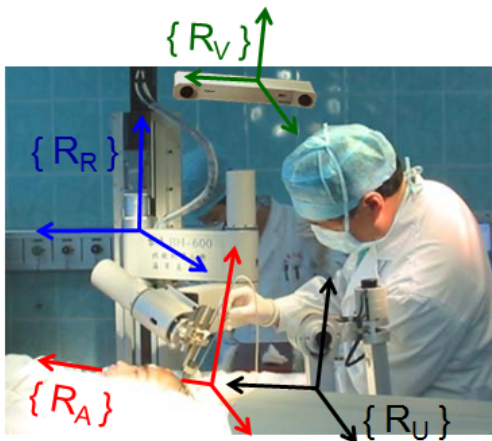


Figura 1. Sistemas de referencia que intervienen en la robotización de tareas quirúrgicas

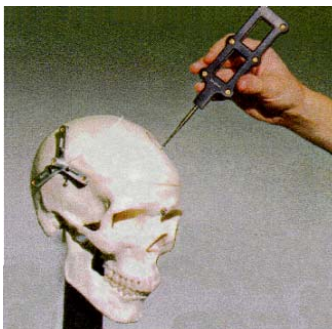


Figura 2. Utilización de un localizador óptico

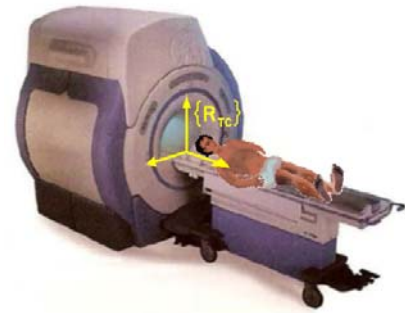


Figura 3. Referenciado de la anatomía del paciente sobre el tomógrafo

Para poder obtener unos ejes de referencia de la anatomía del paciente que puedan ser determinados en la etapa de reconstrucción tridimensional de las imágenes obtenidas por tomografía, se recurre a la implantación de marcadores antes de realizar la adquisición. Si estos marcadores se conservan implantados hasta el acto quirúrgico, los localizadores permiten obtener de una forma más precisa el registro de los datos memorizados del modelo 3D utilizado para la planificación de la intervención, con la misma anatomía del paciente, aunque hayan sido tomados en posición distinta sobre la mesa de operaciones.

La exactitud conseguida en este proceso de calibración 6D (tres dimensiones para la posición y tres dimensiones para la orientación) determinará la precisión con la que se localizarán los diferentes elementos en la escena de trabajo (herramientas, marcos de estereotaxia, imágenes tomográficas, robot, etc.).

### III. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El sistema está concebido especialmente para la operación cooperativa cirujano-robot, en modo comanipulación. Es decir, tanto el cirujano como el robot sujetan el instrumento simultáneamente, de modo que según la posición y orientación del instrumento, el robot se comporta de forma acomodativa, dejándose llevar por el movimiento realizado por el cirujano. En cambio, en situaciones de riesgo, el robot limita, desvía o impide estos movimientos o por el contrario atrae el instrumento hacia la zona previamente programada. La figura Fig. 4 muestra este principio en que a partir de las medidas de los esfuerzos aplicados sobre el elemento terminal, se planifica una estrategia de control con una consigna que es función de la zona de trabajo.

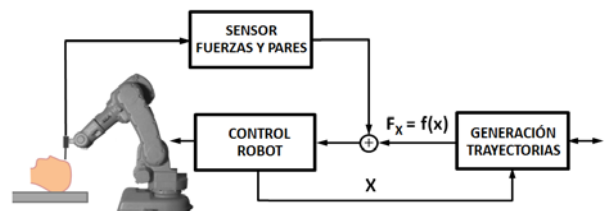


Fig. 4 Estrategia de control cooperativo considerando condiciones de entorno

En este modo de operación, y para facilitar la tarea del cirujano, éste también puede observar la posición del instrumento en el interior del paciente, al proyectarse sobre el mismo la información adecuada en cada momento. La figura 5 muestra la arquitectura del sistema donde se observa que se proyecta la información sobre el paciente a partir de las imágenes tomográficas registradas con la información visual adquirida con las cámaras. Este registro hace posible también el control del robot para adaptarse a la posición del paciente y considerar posibles restricciones o condicionantes del entorno. A continuación se describen los distintos módulos que integran el sistema.

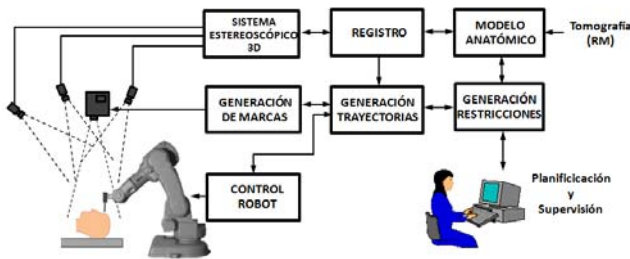


Fig. 5. Arquitectura del sistema

#### A. Generación de restricciones

A partir de la tomografía axial computerizada (TAC) de la parte del paciente a intervenir se genera el modelo 3D. Para ello, se utiliza una interfaz que permite escoger en las imágenes de la tomografía los tejidos, órganos, huesos de los que se va a generar el modelo 3D.

Sobre el modelo 3D generado el cirujano planifica la intervención definiendo las posibles trayectorias a seguir y delimitando las zonas en las que de ninguna manera se debe poder acceder. El sistema genera una protección virtual que permite únicamente el acceso a la zona de intervención a través de las trayectorias definidas y garantiza una navegación suave por la superficie de la protección, pudiendo el cirujano usarla como herramienta de guiado. La figura 6 muestra la interfaz visual donde se muestra la superficie de protección generada.

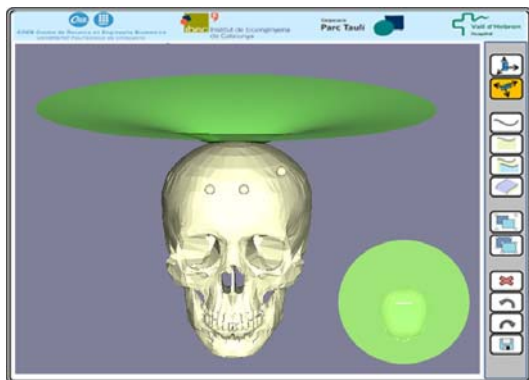


Fig. 6. Imagen de la superficie de protección generada a partir de una trayectoria de trabajo

Para la generación de las restricciones se han desarrollado unas herramientas simplificadas de generación de gráficos 3D, de forma que el cirujano puede definir para cada trayectoria prevista, una zona de acceso limitada por el tamaño de la herramienta a utilizar y la profundidad hasta la que se le permite llegar, para evitar posibles lesiones al paciente. A partir de esta zona se genera una superficie perpendicular a la media de las normales de la trayectoria donde  $S(x, y)$  es el mínimo entre la distancia al punto de la trayectoria más próximo y la altura máxima de la protección.

Finalmente se aplica una función de modulación para suavizar la superficie y ajustarla a las necesidades del cirujano, el cual puede escoger el diámetro de la protección, la altura máxima y la pendiente de acceso a las trayectorias. Una vez obtenida esta superficie, o sea, un conjunto de puntos 3D en coordenadas del modelo 3D, se triangula y se genera una malla de triángulos. Ésta será la que se utilizará posteriormente para la navegación del robot.

El sistema también permite definir otro tipo de restricciones diferentes a las correspondientes a las trayectorias. Consisten en las protecciones de elementos concretos del modelo 3D. A través de la interfaz se puede seleccionar el elemento a proteger, se realiza una segmentación, se obtiene la envolvente convexa y se incorpora a la malla de triángulos de las protecciones. Este modo es especialmente útil, por ejemplo, si se pretende proteger venas generando una restricción que impida llegar hasta ellas y dañarlas.

#### B. Proyección de imágenes y/o restricciones

Las imágenes tomográficas serán proyectadas sobre el paciente así como las restricciones y trayectorias definidas a priori. Para la proyección de las imágenes se ha modelado el proyector como si fuera una cámara. A partir de la calibración del proyector utilizando el modelo *pinhole*, se han obtenido las matrices de transformación que nos permiten transformar coordenadas del sistema de referencia a coordenadas del plano del proyector, de tal manera que un punto en el plano del proyector corresponde a una recta en el espacio del sistema de referencia.

Para proyectar imágenes y/o restricciones al escenario en primer lugar se debe conocer la superficie sobre la que proyectar. A continuación, se calcula para la recta del punto a proyectar su intersección con la superficie donde se proyectará obteniendo el punto 3D en el espacio de referencia donde realmente debemos proyectar. De esta forma, la proyección de la trayectoria o de cualquier otro objeto sobre una superficie consistirá en obtener la intersección de las rectas generadas a partir de los puntos 3D sobre la superficie donde se requiere proyectar. Así, por ejemplo, si se desea proyectar una trayectoria definida directamente sobre una superficie, bastará con proyectar los puntos de la trayectoria.

### C. Control

El sistema permite el guiado manual del robot teniendo en cuenta las restricciones definidas por el cirujano. Para ello se incorpora un sensor de fuerza de 6 grados de libertad que sensa las fuerzas y pares que realiza el usuario en el elemento terminal. Esto permite enviarle consignas de posición al robot a partir de las fuerzas sensadas y moverlo acorde a ellas.

Cuando la navegación se realiza sin restricciones, la velocidad a la que se mueve el robot es la que garantiza que la respuesta ante un cambio de dirección por parte del usuario es inferior al tiempo del ciclo de control. Esto permite una navegación intuitiva gracias a que el tiempo de respuesta ante la fuerza realizada por el usuario es muy pequeño, prácticamente inapreciable. Cuando la navegación se realiza con restricciones, la velocidad se adapta en función de la distancia a la que se encuentra el elemento terminal de las restricciones definidas, de manera que va disminuyendo gradualmente al acercarse a las trayectorias definidas. Se ha utilizado la función “*Five Parameter Logistic*”[4] que permite parametrizar según las necesidades y limitaciones la velocidad del robot. Para navegar por la superficie generada se ha modelado el elemento terminal y en función de las colisiones que se produzcan, se va a poder modificar su trayectoria. Para ello se han utilizado las librerías RPQ [5], que dados dos modelos formados por mallas de triángulos y las transformaciones homogéneas respecto al sistema de referencia, permiten obtener el conjunto de triángulos de la intersección de los dos modelos. La principal ventaja de utilizar estas librerías es el funcionamiento en tiempo real, principal requisito de nuestro sistema de navegación.

Para generar las restricciones que harán que el elemento terminal se deslice por la superficie generada, un punto muy importante será la detección y el tratamiento de las colisiones entre estos dos elementos. El problema de trabajar controlando la colisión entre modelos es que no se puede detectar una colisión hasta que ésta se ha producido, por lo que el elemento terminal siempre traspasará la coraza en el momento del contacto. Para poder utilizar este método en nuestro sistema necesitamos hacer acotable este error y para ello necesitamos controlar la velocidad a la que se desplaza el elemento terminal en el momento de la colisión. Las librerías utilizadas también permiten calcular la distancia mínima entre los modelos implicados, de esta forma, utilizando esta funcionalidad, se genera un área de seguridad alrededor de la coraza en la cual limitamos la velocidad a la que se desplaza el elemento terminal (ET) con lo que se puede asegurar que el error (profundidad a la que la herramienta penetra dentro de la superficie de protección generada) es acotable, como se deduce de la ecuación 1.

$$\Delta X_{et} = v_{et} \cdot t_{it} \quad (1)$$

Donde  $\Delta X_{et}$  es el incremento cartesiano en la posición del ET,  $v_{et}$  es la velocidad a la que se desplaza el elemento terminal y  $t_{it}$  es el tiempo que tarda en procesarse una iteración de nuestro programa. Por lo tanto, la distancia máxima que vamos a penetrar la coraza es  $\Delta X_{et}$ . Dado que no podemos asegurar que el tiempo de una iteración sea constante, acotamos  $\Delta X_{et}$  de forma que sea igual al error máximo permitido y como consecuencia  $v_{et}$  se reduce para satisfacer esta premisa.

Para simplificar el problema y poder navegar en tiempo real, se ha optado por resumir todas las zonas de contacto entre el elemento terminal y la superficie en dos únicas zonas tal y como se puede ver en la figura 7. Para ello seleccionamos como zona alta la zona más alejada del extremo del elemento terminal y como zona baja la zona más cercana a él.

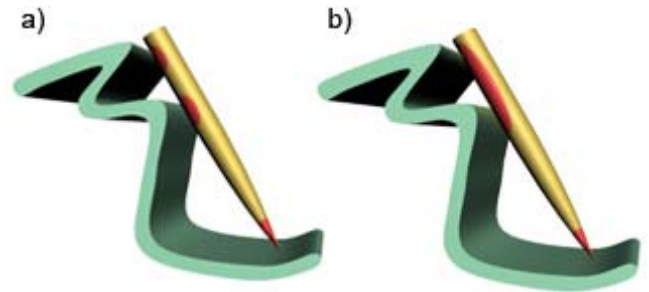


Fig. 7: Ejemplo de resumen de zonas de contacto. a) el elemento terminal con todas las zonas de contacto. b) el mismo elemento terminal con las zonas resumidas.

Una vez definidas las zonas de contacto que serán utilizadas en el cálculo de restricciones, se pretende evitar que el elemento terminal pueda entrar en la superficie como respuesta a una orden del usuario. El elemento terminal deberá comportarse como si la superficie fuera real y deberá deslizarse por ella, emulando el comportamiento que tendría si lo fuese.

La idea básica de funcionamiento en cuanto a las restricciones de fuerzas del método propuesto, consiste en añadir fuerzas virtuales que sumadas al vector de fuerza sensado, generan un vector de fuerza final que derivará en el desplazamiento de la herramienta sujeto a las restricciones de fuerza que impone la superficie de protección.

Estas fuerzas virtuales se generan en base a la física más básica, de forma que la fuerza que ejerce la herramienta sobre la coraza, genera una fuerza normal que evita que el elemento terminal la penetre. La fuerza resultante de sumar todas las componentes implicadas hace que el elemento terminal se deslice sobre la superficie como ocurriría en el mundo real, consiguiendo de este modo la realimentación realística que se pretendía. La figura 8 ilustra este procedimiento.



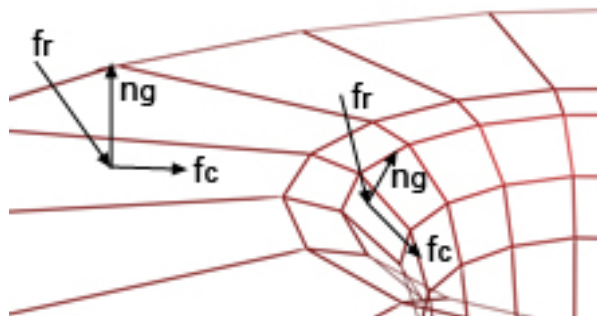


Fig. 8: Varios ejemplos de las fuerzas implicadas en un contacto.  $f_r$  es la fuerza real de entrada,  $n_g$  la fuerza normal generada y  $f_c$  la fuerza resultante calculada

#### D. Calibrado y registro

El proceso de calibrado del sistema es el que permitirá que los distintos elementos que intervienen en la operación tengan sus respectivos sistemas de coordenadas referidos a un sistema de referencia común. Para ello, el sistema de visión debe reconocer, mediante la segmentación de imágenes, los marcadores utilizados para cada sistema a referenciar y, por otro lado, hacer uso de algoritmos de cálculo que determinen las matrices de transformación entre sistemas.

El primer paso consiste en calibrar el conjunto de cámaras respecto un sistema de coordenadas, el cual se va a considerar como el sistema de referencia de todo el conjunto. En este trabajo se ha utilizado como sistema de referencia el sistema de referencia del robot. Se pretende con ello, encontrar la relación entre las coordenadas espaciales de cualquier punto de la escena y las coordenadas de su proyección en el plano de la imagen. Ello requiere, por un lado, conocer donde se encuentra cada cámara y como está orientada respecto el sistema de referencia. Esta información suele expresarse mediante un vector de traslación y una matriz de rotación, cuyos valores se conocen como *parámetros extrínsecos* de la cámara.

Por otro lado, independientemente de donde esté localizada cada cámara, las características geométricas y ópticas influyen en la obtención de las imágenes. A efectos de simplificación de cálculo, utilizamos el modelo de cámara Pinhole para caracterizar sus parámetros. Básicamente, este modelo sustituye la lente por un punto (punto principal) y desplaza el foco imagen hasta el plano imagen (sensor de la cámara). A partir del modelo, se obtienen la distancia focal y el desplazamiento del centro óptico del sensor, denominados *parámetros intrínsecos* de la cámara.

La matriz homogénea de parámetros extrínsecos permite transformar un punto del sistema de coordenadas de referencia al sistema de referencia de la cámara, ambos en unidades métricas. Luego, previa corrección del efecto de la distorsión, provocado por la curvatura de la lente y

errores de paralelismo entre ésta y el sensor, la matriz de parámetros intrínsecos transforma el punto en una proyección sobre la imagen y la referencia en coordenadas de la imagen (en unidades de píxeles).

La ventaja de utilizar múltiples cámaras en el sistema de visión es la posibilidad de realizar el proceso inverso, denominado proceso de *reconstrucción*. Partiendo de las coordenadas de un punto en la imagen y, conocidos los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, se deduce la ecuación de la recta que tiene como origen el centro de coordenadas de la cámara y pasa por el punto objeto. Repitiendo la misma operación con el resto de cámaras, se obtiene un conjunto de rectas, cuya intersección es, justamente, el punto en coordenadas métricas del objeto en el sistema de referencia. Teóricamente, dos cámaras serían suficientes para conseguir la reconstrucción de un punto, pero es preferible utilizar un mayor número. No sólo por motivos obvios de ocultación, cuando un objeto intermedio impide la visión del punto en una cámara, sino también para conseguir mayor precisión en los resultados (por alta que sea la resolución de las cámaras y precisos los cálculos, siempre hay un cierto error y las rectas no intersecan exactamente. Este error disminuye al aumentar el número de rectas).

Una vez calibrado el sistema de visión respecto al de referencia, mediante reconstrucción se pueden obtener las coordenadas de cualquier punto de la escena. Para la detección de los puntos a reconstruir se utiliza la segmentación de imágenes. En nuestra aplicación hemos escogido trabajar en la banda infrarroja del espectro utilizando como marcadores leds infrarrojos. De esta forma, añadiendo un filtro pasainfrarrojo a las cámaras, conseguimos que en las imágenes capturadas únicamente se vean los marcadores, simplificando en gran medida su segmentación.

En la reconstrucción es necesario realizar la correspondencia entre los marcadores de cada imagen. Para ello se utiliza la información de la calibración de cada cámara y se obtiene para cada marcador su posición en cada una de las imágenes. Utilizando la reconstrucción se calculan los puntos en tres dimensiones en coordenadas del sistema de referencia para las cámaras que han detectado el marcador aproximándolos a la intersección de las rectas.

Para realizar el *registro* del modelo 3D con el modelo real, como se ha explicado anteriormente, primeramente en el modelo real se han implantado los marcadores y posteriormente se ha realizado el TAC. Con esto se consigue obtener las coordenadas de los marcadores en el sistema de referencia del modelo 3D y a continuación, mediante el método de Horn [6], obtener la matriz homogénea de transformación que nos permite transformar los puntos de un sistema de referencia a otro.

Entonces, a partir de las coordenadas que nos

proporciona el sistema de visión para los marcadores del modelo real, obtenemos a cada ciclo la matriz que nos permite transformar las coordenadas del modelo 3D a coordenadas del sistema de referencia.

Con este tenemos la calibración del sistema de visión, del modelo 3D y del modelo real respecto al sistema de referencia que es el sistema de referencia del robot.

Finalmente, la calibración del proyector se realizará como si se tratase de una cámara. En primer lugar se realiza la calibración de los parámetros intrínsecos generando las imágenes de calibración a partir de la obtención de los puntos del patrón real en la proyección sobre él. Una vez obtenidos, utilizando el robot, se realiza el mismo procedimiento que para la calibración de las cámaras respecto al sistema de referencia. Se obtienen los parámetros extrínsecos del proyector y con ambos ya se pueden proyectar puntos en el escenario teniendo en cuenta la superficie donde se van a proyectar, tal y como se ha descrito en el apartado B.

#### IV. RESULTADOS Y APLICACIONES

Para la evaluación de la interfaz se han realizado diferentes tipos de intervenciones en el laboratorio sobre cráneos de animales, Fig. 9, habiéndose conseguido cortes muy precisos, Fig. 10.



Fig. 9 Plataforma de experimentación

Una tipología de intervenciones que puede beneficiarse de esta asistencia interactiva es la cirugía maxilofacial, en operaciones de reconstrucción de hueso en oncología. El procedimiento consiste en extraer un fragmento de la tibia para realizar un injerto en la mandíbula afectada. En este caso, la línea de corte del hueso se puede realizar de forma muy precisa. La utilización de un mismo patrón, en la tibia de donde se extrae el tejido óseo, y en la mandíbula, donde se realice el injerto, hace que el tejido extraído pueda ajustarse a la forma y dimensiones de la mandíbula afacetada.

Estas estructuras o paredes virtuales pueden ser utilizadas igualmente como una protección de seguridad sobre elementos críticos, como puede ser el nervio facial. En esta aplicación el beneficio de las estructuras de protección virtuales es básicamente la reducción del estrés del cirujano cuando se acerca a elementos de riesgo, e indirectamente, por la mayor seguridad para el paciente y la eficiencia de la operación.



Fig. 10 Detalle de una operación de corte

#### V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del Dr. Enric Laporte, Jefe del Centro de Cirugía Experimental, del Consorci Sanitari del Parc Taulí y el Dr. Juan A. Hueto, Jefe del Departamento de Cirugía Maxilofacial del Hospital de la Vall d'Hebron, por su asesoramiento y la evaluación del trabajo desarrollado.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Jakopec et al., "The hands-on orthopaedic robot Acrobot: Early clinical trials of total knee replacement surgery", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Volume 19, N 5, pp: 902 – 911, 2003
- [2] P. Kazanzides. et al., "An integrated system for cementless hip replacement", *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE* Volume 14, Issue 3, pp: 307 – 313, 1995
- [3] A. Casals, M. Frigola y J. Amat, "La Robótica, una valiosa herramienta en Cirugía", *Revista Iberoamericana de Automática y Robótica*, Vol 6, pp: 5-19, 2009
- [4] Paul G. Gottschalk, John R. Dunn, "The five-parameter logistic: A characterization and comparison with the four-parameter logistic" *Analytical Biochemistry*, Volume 343, Issue 1, 1 August 2005, Pages 54-65
- [5] X. Giralt, A. Rodriguez, A. Hernansanz, and J. Amat. "Rpq: Robotic proximity queries development and applications." In Int. Conf. On Informatics in Control, Automation and Robotics, 2007.
- [6] Berthold K. P. Horn, "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions" *J. Opt. Soc. Am.* A4, 629-642 (1987)
- [7] A. Casals, J. Campos, X. Giralt y J. Amat, "Intuitive Graphic Interface for Assisted Teleoperation in Surgical Applications", *IARP Workshop on Dependable Robots*, 2010
- [8] R. W. Lucky, "Automatic equalization for digital communication," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 44, no. 4, pp. 547-588, Apr. 1965.