**Capítulo 2**

**Ultrasonido 3D a mano libre**

En este capítulo se realiza un estudio detallado de la técnica de ultrasonido 3D a mano libre y de los diferentes métodos que la componen.

**2.1 La técnica de ultrasonido 3D a mano libre**

La técnica de ultrasonido 3D a mano libre se usa para generar volúmenes de ultrasonido a partir de imágenes de ultrasonido 2D obtenidas con una sonda de ultrasonido convencional. Los sistemas más comunes de ultrasonido 3D a mano libre consisten en un rastreador de posición y orientación con un sensor montado sobre la sonda de ultrasonido 2D y un equipo de cómputo para la adquisición y procesamiento de la información como se muestra en la figura 1.

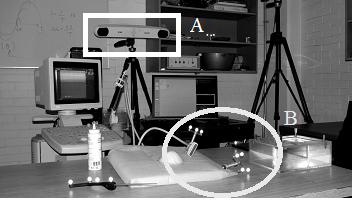


Figura 1. Sistema de ultrasonido 3D a mano libre, a) Rastreador óptico, b) sonda de ultrasonido 2D con sensor se orientación y posición.

Los pasos a seguir para la obtención de un volumen de ultrasonido con la técnica a mano libre se enlistan a continuación:

1. Calibración de la sonda.- La calibración de la sonda se refiere al proceso realizado para encontrar la matriz de transformación que relacione el sistema de coordenadas local del sensor de posición montado sobre esta y el sistema de coordenadas del plano de la imagen de ultrasonido [1].
2. Adquisición de imágenes y datos del sensor.- Se adquiere una serie de imágenes 2D de ultrasonido del volumen de interés, a su vez se obtiene la posición y orientación de cada imagen usando información obtenida del rastreador y la transformación obtenida en el proceso de calibración [2].
3. Reconstrucción del volumen.- Se utilizan las imágenes 2D adquiridas anteriormente, con su respectiva posición y orientación, para realizar el llenado de un arreglo regular de voxeles combinando la información de los pixeles de las imágenes para actualizar el valor de cada voxel en el arreglo [3].
4. Visualización.- Existen diferente técnicas de visualización de arreglos de voxeles usando técnicas de graficación computacional proyectando un set de datos multidimensional en una imagen 2D, incluyendo *multiplanar slicing*, *surface fitting* y *volume rendering* [4].

La mayoría de los sistemas de ultrasonido 3D a mano libre siguen esta metodología para la generación de volúmenes de ultrasonido, sin embargo existen diversos métodos los cuales no hacen uso de rastreadores de posición y orientación, alineando las imágenes de ultrasonido mediante métodos de procesamiento digital de imágenes [5].

A continuación se detallan los métodos de calibración, reconstrucción y visualización más comunes utilizados en las técnicas de ultrasonido 3D a mano libre.

**2.2 Calibración de la sonda de ultrasonido**

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los sistemas de ultrasonido 3D a mano libre hacen uso de la posición y orientación 3D de la sonda de ultrasonido, obtenida mediante un sensor de posición y orientación montado sobre la sonda. Entre las técnicas más comunes para determinar la posición y orientación de la sonda en estos sistemas se encuentran [6]:

* Sensores acústicos.- Reciben señales emitidas por emisores ultrasónicos y determinan la localización vía *time-of-flight*.
* Brazos mecánicos articulados.- Determinan la posición basándose en las mediciones de los ángulos en las articulaciones y la cinemática del dispositivo.
* Sensores magnéticos.- Utilizan corrientes eléctricas inducidas en tres bobinas ortogonales para determinar la posición y orientación cuando el sensor se mueve dentro de un campo magnético.
* Sensores ópticos.- Rastrean la posición y orientación usando triangulación geométrica de marcadores mediante el uso de cámaras CCD.

Los rastreadores ópticos han sido utilizados satisfactoriamente en aplicaciones médicas y de realidad aumentada ya que proveen una posición confiable y exacta para estas aplicaciones cuando existe una línea de vista entre los marcadores y las cámaras; por otro lado al no hacer uso de campos magnéticos para la determinación de los datos, esto significa que no existe ninguna deformación de los datos en presencia de estructuras metálicas las cuales son inevitables en ambientes quirúrgicos [6].

Para realizar un volumen de ultrasonido es necesario conocer la posición y orientación de las imágenes 2D, sin embargo los rastreadores no proveen esta información, en cambio proveen la posición y orientación del sensor montado sobre la sonda. Par poder obtener esta información es necesario realizar un proceso de calibración, el cual permite encontrar una matriz de transformación rígida que relacione el sistema local de coordenadas de la imagen I con respecto al sistema del sensor S, como se muestra en la figura 2. Aunque proceso se podría evitar si se tuviera la información de la construcción de la sonda, con las dimensiones y posición del arreglo de sensores dentro de esta, sin embargo esta información comúnmente no está disponible y el proceso de calibración es requerido sin importar el tipo de sensor utilizado y es preferible realizarlo cada vez que se monta el sensor sobre la sonda [7]. La ecuación 2.1 muestra la matriz homogénea de transformación que se encuentra por medio del proceso de calibración.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.1 |

donde , y son los datos de translación entre los sistemas locales I y S. Con esta transformación la rotación entre dos sistemas se realiza primero alrededor del eje x con un ángulo , después alrededor del eje y con un ángulo y finalmente en el eje z con un ángulo , este orden de rotación es significativo [7].

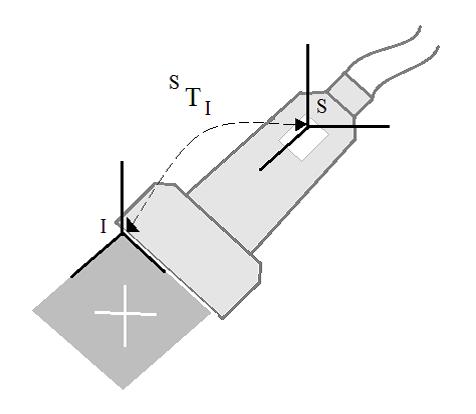


Figura 2. Sonda de ultrasonido con sensor de rastreo. Se muestran además los sistemas de coordenadas de la imagen (I) y el sistema de coordenadas del sensor (S), así como la transformación que relaciona ambos sistemas.

Existen diferentes métodos para la obtención de la matriz homogénea de transformación ; Hsu *et al*. y Prager *et al*. realizaron una comparación de diversos métodos de calibración en [2] y [7] respectivamente. En estos trabajos se estudian siete diferentes métodos de calibración basados en montajes experimentales de diferentes fantasmas con dimensiones y propiedades físicas conocidas, en cada uno de estos métodos se hace un análisis de imágenes de ultrasonido para obtener una serie de ecuaciones no lineales que se deberán de resolver para obtener la estimación de los parámetros de calibración , , , , y , así como dos factores de escalamiento de las imágenes y . Las principales diferencias entre estos métodos son los fantasmas utilizados y el número de imágenes de ultrasonido requeridas para realizar la calibración. Se ha demostrado en los trabajos que los métodos de calibración de un solo punto los más óptimos debido a su fácil construcción y error pequeño de reconstrucción; dentro de estos métodos destaca el método de hilos cruzados por la fácil construcción del fantasma utilizado en este método [2].

El método de hilos cruzados consiste en sumergir en agua dos hilos intersectándose en un punto y obtener una serie de imágenes de ultrasonido del punto de cruce en diferentes direcciones con sus respectivos datos de posición y orientación. El punto de cruce provee un punto en el espacio con coordenadas desconocidas pero fijas en relación al sistema de coordenadas local del rastreador [8]. Posteriormente las imágenes obtenidas se analizan para obtener las posición del cruce de los hilos (, ) con respecto al sistema de coordenadas local de la imagen (I), esta posición debe satisfacer la ecuación 2.2

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.2 |

donde, es la matriz de transformación homogénea (ecuación 2.1) que relaciona el sistema de coordenadas local de la imagen I con el sistema de coordenadas del sensor montado sobre la sonda S; es la matriz de transformación homogénea que relaciona el sistema de coordenadas del sensor S con el sistema de coordenadas del rastreador R; relaciona el sistema de coordenadas del rastreador al sistema de coordenadas del fantasma de hilos cruzados H, cuyo origen se encuentra en el punto de intersección de los hilos; y son factores de escala que traducen pixeles a las unidades correspondientes al sistema de coordenadas del rastreador. La figura 3 ejemplifica el método de calibración de hilos cruzados junto con los sistemas de coordenadas involucrados en el proceso.

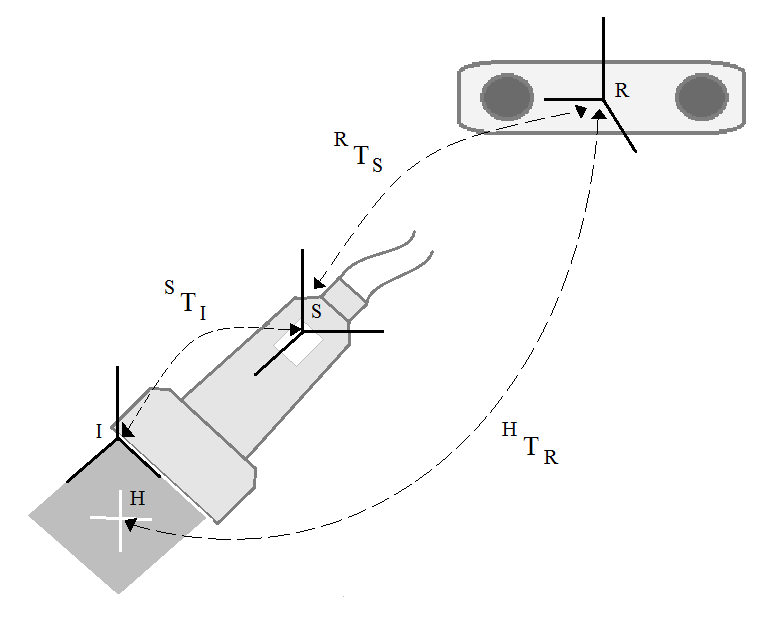


Figura 3. Método de calibración de hilos cruzados y los sistemas de coordenadas involucrados.

Como se mencionó anteriormente este método consiste en obtener una serie de imágenes de ultrasonido del cruce de hilos para construir un sistema de ecuaciones no lineal. Las tres primeras filas en la ecuación 3 dan tres ecuaciones que involucran los parámetros de calibración a estimar; si se obtienen *m* número de imágenes de ultrasonido del punto de cruce y se localiza el punto de cruce en cada una de estas, mediante la ecuación 3 se puede generar un sistema homogéneo de ecuaciones no lineales de tamaño *3m.* Si se obtiene un sistema de ecuaciones sobredeterminado (de tal manera que *3m* sea mayor al número de incógnitas en el sistema), este se puede resolver haciendo uso de algún método iterativo [7]. El algoritmo de Levenberg-Mardquart (LM) es un método iterativo popular y robusto que sirve para la solución de sistemas homogéneos de ecuaciones no lineales [9]. El algoritmo LM es una técnica que localiza el mínimo de una función multivariable que se expresa como la suma de cuadrados de funciones reales no lineales; este algoritmo se ha convertido en una técnica estándar en problemas de mínimos cuadrados no lineales, adoptada en múltiples disciplinas [10].

En el proceso de calibración solo nos interesa encontrar los valores de las escalas y y de , pero para esto también se debe de encontrar la solución para , aunque estos valores serán descartados posteriormente [7]. Debido a esto y a que la orientación del sistema de coordenadas H puede ser cualquiera, y aun así satisfacer la ecuación 3, los 11 parámetros que se deben de encontrar mediante el algoritmo de LM son dos factores de escala, tres ángulos de rotación y tres factores de traslación que forman la matriz , y tres factores de traslación que forman la matriz ; esto implica que para obtener un sistema de ecuaciones no lineales sobredeterminado el número de imágenes *m* que se deben de obtener debe de ser igual o mayor a 4.

La principal desventaja del método de hilos cruzados, y de los métodos de calibración de un punto, es que la exactitud del método depende principalmente de que tan bien se localiza el centro del punto y que tanto permanece fijo el punto con respecto al rastreador durante el procedimiento. Por otro lado, debido a la calidad de las imágenes de ultrasonido, es común que la localización del punto sea realizada a mano en cada imagen, haciendo del proceso de calibración tardado [11]; sin embargo, aun así este método de calibración es conveniente para su uso en ultrasonido 3D a mano libre, por su fácil implementación y construcción del fantasma, aunado al bajo error de reconstrucción que tienen los métodos de un solo punto [2].

**2.3 Adquisición digital de imágenes de ultrasonido**

Una vez obtenida la calibración de la sonda de ultrasonido, es posible la adquisición de imágenes de ultrasonido con su respectiva posición y orientación para realizar una reconstrucción del volumen.

La adquisición digital de imágenes de ultrasonido se puede realizar principalmente de dos maneras, mediante una adquisición de planos individuales restringida por alguna variable como el tiempo, distancia o ángulo o mediante una grabación continua del ultrasonido para posteriormente elegir las imágenes apropiadas mediante post-procesamiento. En la mayoría de los sistemas de ultrasonido 3D a mano libre las imágenes son transferidas entre el ultrasonido y una computadora en forma de video análogo, debido a que la mayoría de las máquinas de ultrasonido tienen una salida de video análogo y los digitalizadores de video para computadora son baratos y comunes [12].Una consideración importante al momento de digitalizar las imágenes de ultrasonido es el procurar que la intensidad de los valores en las imágenes 2D no se modifique, para permitir la reconstrucción y el análisis de los niveles de gris de los datos adquiridos de una manera confiable [8].

Para garantizar una calidad de imagen continua en la adquisición de imágenes de ultrasonido se requiere seguir un protocolo de adquisición [13].En la mayoría de los sistemas el ultrasonido 3D se adquiere barriendo una sonda 2D convencional sobre el área de interés acomodando las imágenes obtenidas para formar un volumen 3D. Existen diferentes maneras de realizar el barrido y estas dependerán principalmente dela forma de la sonda. Existen tres protocolos de adquisición de imágenes de ultrasonido cuando se realiza un escaneo sobre la piel, rotacional, ventilador y lineal. Cada una de estas presenta ciertas ventajas; por ejemplo, el escaneo en forma de ventilador es ideal para ventanas acústicas pequeñas como el espacio entre las costillas; sin embargo estas generalmente requieren de aditamentos mecánicos especiales para realizar el escaneo con mayor exactitud en el movimiento. El protocolo a mano libre, en donde la sonda es movida por la mano de un modo arbitrario, es la manera más sencilla y flexible, permitiendo la adquisición de volúmenes sin la necesidad de aditamentos especiales [14]. La figura 4 ejemplifica un barrido a mano libre, donde la posición de las imágenes es arbitraria y depende del movimiento de la mano del especialista. Con el fin de obtener la mejor calidad en la adquisición de imágenes y la reconstrucción, el barrido debe de ser lento y suave, y la distancia entre las imágenes debe ser pareja [13].



Figura 4. Adquisición de imágenes de ultrasonido a mano libre.