

## Termografía 3D y su potencial aplicación a la medicina.

**Ignacio Decia**

Monografía vinculada a la conferencia del Ing. Sebastián Fernandez sobre "Principios de la termografía" y la Dra. Beatriz Rojas. sobre "Termografía y aplicaciones clínicas" del día 28 de abril de 2015.

e-mail: ndecia91@gmail.com

**Resumen.** La termografía 3D combina la información térmica de un objeto con su geometría 3D. A diferencia de la termografía convencional, tiene la ventaja de generar termogramas cuantificables, independientes de la posición de la cámara y comparables entre sí. Se estudiarán los componentes de un termografo 3D, las etapas de trabajo que involucran su utilización y la teoría detrás de esta tecnología. Se tomará como ejemplo práctico un prototipo de bajo costo pero flexible. Por último se discutirá el concepto de termogramas estándares que abren las puertas a la creación de bases de datos de termogramas médicos que luego pueden ser tomados como referencia en el diagnóstico de enfermedades.

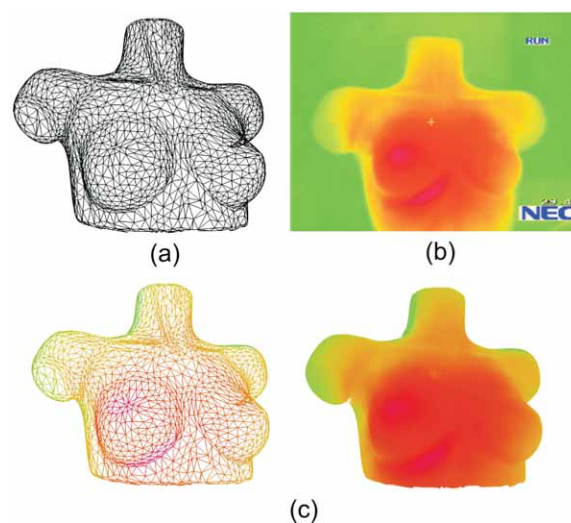
### 1. Introducción

La termografía permite la detección y localización de variaciones anormales en la temperatura caracterizadas por un incremento o decremento en la superficie de la piel. Es una herramienta de bajo costo, no invasiva y libre de radiaciones ionizantes que permite el análisis y evaluación de las funciones fisiológicas. La termografía ha sido aplicada a diversos campos de la medicina, tales como en la evaluación de desórdenes neurológicos, enfermedades vasculares, cirugías a corazón abierto, medicina deportiva, y más recientemente en la detección del cáncer de mama. La termografía ha sido aprobada por la U.S Food And Drug Administration (FDA) como un método suplementario a la mamografía [1].

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, la termografía no ha tenido amplia aceptación en la medicina como herramienta efectiva de diagnostico. Una razón posible es que los termogramas brindan únicamente datos cualitativos de la temperatura [4]. Los termografós captan el flujo de energía infrarroja que proviene de un objeto generando una imagen 2D. Cada color en la imagen es proporcional al nivel de energía recibido y por lo tanto a la temperatura. Este flujo medido es dependiente de la distancia y la orientación de la cámara respecto a la superficie del objeto. En consecuencia, los termografos convencionales no permiten la obtención de información cuantitativa

precisa. Más aún, esto pone de manifiesto la dificultad para comparar dos termogramas distintos que corresponden al mismo objeto.

La termografía 3D integra información térmica con datos geométricos para generar un termograma 3D. La combinación del modelo 3D de un objeto con su imagen térmica 2D permite obtener los datos espaciales requeridos para realizar cálculos cuantitativos del flujo emitido por unidad de superficie. De esta forma, es posible el desarrollo de termogramas 3D estándares capaces de ser comparados entre sí [4]. A continuación se discutirán los componentes de un termógrafo 3D, el marco teórico sobre el que se apoya la termografía 3D y una propuesta de estandarización de termogramas 3D. Se utilizará como ejemplo el prototipo desarrollado en [3].



**Figura 1.** Termografía 3D aplicada a la detección de cáncer de mama. (a) Modelo 3D capturado por scanner 3D. (b) Termograma 2D (c) La combinación del modelo 3D con el termograma 2D genera el termograma 3D

## 2. Desarrollo del tema

Un termografo 3D es dispositivo capaz de capturar de manera sincronizada datos espaciales y térmicos de un objeto en estudio. La salida de este dispositivo es un modelo térmico 3D capaz de ser visualizado y analizado en una computadora.

### 2.1. Componentes de un termografo 3D

Un sistema de termografía 3D se compone de un scanner 3D y una cámara térmica donde ambos se encuentran conectados a una computadora para dirigir el proceso y visualizar los resultados. El scanner y la cámara se combinan para obtener un termograma 3D que combina los datos espaciales y la distribución de temperatura sobre la superficie del objeto.

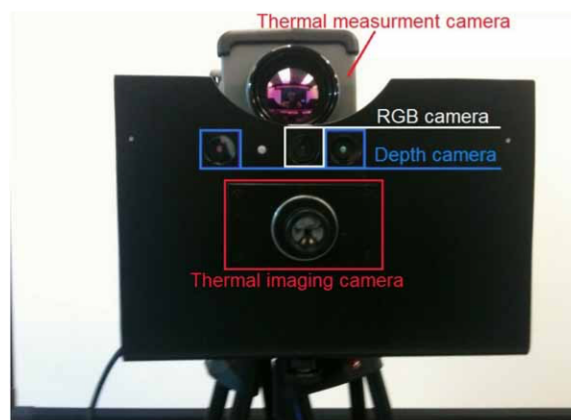
El scanner 3D es utilizado para obtener una representación espacial del objeto. La representación puede ser en forma de una malla triangular que modela su superficie. Existen múltiples métodos para su obtención. El método utilizado con mayor frecuencia es la proyección de luz estructurada. Requiere de un proyector y de un conjunto de cámaras digitales y consiste en proyectar un patrón de luz

conocido sobre el objeto mientras la cámara toma una imagen del mismo. La imagen es analizada y en función de la deformación del patrón de luz se reconstruye el objeto 3D.

El prototipo estudiado utiliza como scanner el dispositivo *Kinect* de Microsoft. Es de bajo costo y de aceptable precisión. Está compuesto por un proyector de luz IR, una cámara IR y una cámara RGB estándar. El par proyector IR y cámara IR forman la cámara de profundidad que permite obtener la distancia de un punto del espacio a la cámara y es utilizada en la construcción del modelo 3D. Notar que la luz IR al ser invisible al ojo humano no causa molestias y puede ser utilizada en scanners médicos.

La cámara térmica captura la imagen térmica 2D que muestra la distribución de temperatura sobre la superficie del objeto que luego será asociada al modelo 3D. El prototipo utiliza una cámara térmica para obtener la imagen de la distribución de temperatura y otra cámara para obtener los valores de temperatura exactos.

Los componentes del sistema se encuentran conectados a una computadora y son controlados por componentes de software que permiten la obtención y visualización del termograma 3D. Típicamente los componentes de software incluyen software de calibración, de visualización y análisis.



**Figura 2.** Termografo 3D del prototipo. Se pueden observar los distintos tipos de cámaras montados a un soporte común.

## 2.2. Etapas de trabajo

Se distinguen tres etapas que componen el modelo de trabajo con un termógrafo 3D: la etapa de calibración, de adquisición de datos y la aplicación.

En la etapa de calibración se obtienen los parámetros que describen las relaciones espaciales y físicas de los componentes que forman al sistema. Los parámetros son utilizados luego en la etapa de adquisición de datos.

La etapa de adquisición de datos consiste en obtener los datos espaciales y de temperatura para combinarlos y construir el modelo térmico 3D. Esta etapa y la de calibración serán detalladas más adelante.

La última etapa es donde se aplica la tecnología para resolver un problema. Los datos son visualizados y analizados.

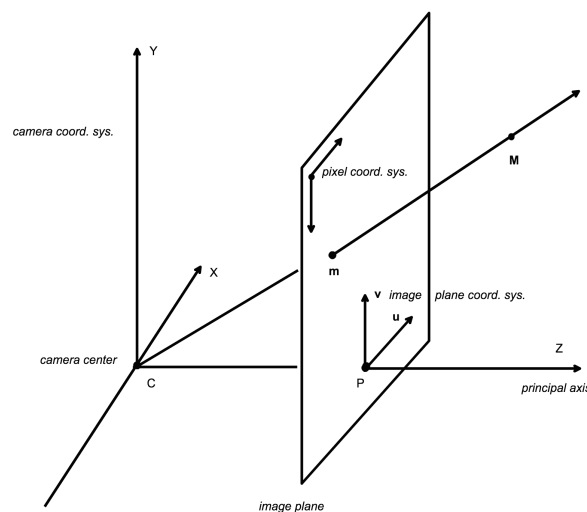
### 2.3. Modelo teórico de una cámara

Para comprender la etapa de calibración y de adquisición de datos se debe establecer primero un modelo teórico que describa el funcionamiento de una cámara. El modelo descrito a continuación se denomina *Pinhole Model* y es ampliamente utilizado para describir la proyección de un punto del espacio 3D a un píxel en la imagen [3].

Antes de comenzar con el desarrollo del modelo se deben establecer los siguientes conceptos:

1. Se asume un sistema de coordenadas global llamado *world coordinate system* ( $wc$ ).
2. El punto  $\widetilde{v}_{xx} = (x, y, z, w)$  denota la representación en coordenadas homogéneas del punto  $v = (\frac{x}{w}, \frac{y}{w}, \frac{z}{w}, 1)$  en el sistema de coordenadas  $xx$ . Análogo para otros sistemas de coordenadas o un punto 2D.
3. El centro de la cámara  $(c_x, c_y, c_z)$  se denomina centro de proyección y en él se intersectan los rayos proyectados. El centro es tomado como el origen del sistema de coordenadas de la cámara, llamado *camera coordinate system* ( $cam$ ).
4. La línea que se expande en la dirección hacia donde está mirando la cámara se llama eje principal o eje óptico.
5. Se define el plano de imagen como el plano perpendicular al eje principal que se encuentra a una distancia  $f$  del centro de proyección. Esta distancia es llamada distancia focal.
6. La intersección del plano de imagen con el eje principal define el punto principal y es el origen del sistema de coordenadas del plano de imagen, llamado *image plane coordinate system* ( $img$ ).
7. Por último, el sistema de coordenadas propio de la imagen generada se encuentra contenido en el plano de imagen y es llamado *pixel coordinate system* ( $pix$ ). Su origen está dado por los puntos  $(u, v)$ .

La figura 3 muestra los conceptos anteriores. Se puede observar como el punto  $M$  es proyectado sobre el plano de imagen resultando en el punto  $m$ . Este punto queda determinado por la intersección del plano de imagen con la recta que pasa por el punto  $M$  y el centro de proyección. Se dice que  $m$  es la proyección en perspectiva del punto  $M$ .



**Figura 3.** Modelo de cámara. Se observan los distintos sistemas de coordenadas, el plano de imagen y el punto  $M$  proyectado sobre él.

La transformación que permite proyectar un punto 3D en un píxel será obtenida por la composición de transformaciones más simples.

Para comenzar se encontrará la transformación que permite proyectar un punto expresado en el sistema de coordenadas de la cámara sobre el plano de imagen. Más formalmente, dado el punto  $\widetilde{M}_{cam} = (x, y, z, w)$  buscamos su proyección  $m_{img}$  sobre el plano de imagen. Para esto se intersecta la recta  $\alpha M_{cam}$  con el plano de imagen definido por  $Z = f$ . Es fácil ver que  $m_{img} = \frac{f}{z} \cdot (x, y)$  que expresado en coordenadas homogéneas es  $\widetilde{m}_{img} = (f \cdot x, f \cdot y, z)$ . Matricialmente se tiene que:

$$\widetilde{m}_{img} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot M_{cam}$$

La siguiente transformación realiza un cambio de coordenadas que permite pasar del sistema de coordenadas definido en el plano de imagen (*image plane coord. sys.*) al sistema de coordenadas definido por la imagen (*pixel coord. sys.*). Más formalmente, dado un punto  $m_{img}$  del plano de imagen buscamos el punto  $m_{pix}$ . Típicamente se cumple que eje vertical del sistema de coordenadas de la imagen está en dirección opuesta al eje vertical del sistema de coordenadas del plano de imagen. Los ejes horizontales de ambos sistemas suelen coincidir.

Para pasar de un sistema al otro a se debe aplicar primero la traslación  $(u, v)$  y luego, dado que el punto resultante estará expresado en unidades de distancia (metros, centímetros o pulgadas), se debe realizar un escalamiento para transformarlo a unidades de píxel. Tenemos que  $m_{pix} = (w \cdot (x + u), h \cdot (y + v))$  donde  $w$  y  $h$  corresponden al ancho y largo del píxel.

$$m_{pix} = \begin{bmatrix} w & 0 & w \cdot u \\ 0 & h & h \cdot v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \widetilde{m}_{img}$$

Si se componen las dos matrices anteriores se obtiene la llamada matriz intrínseca que depende únicamente de los parámetros internos a la cámara como son su distancia focal  $f$ , el origen del sistema de coordenada definido por la imagen y el tamaño del píxel.

$$\begin{bmatrix} f & 0 & u' \\ 0 & f' & v' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Resta encontrar la transformación que permite el cambio de coordenadas del sistema global al sistema de coordenadas de la cámara. Más formalmente, dado un punto  $\widetilde{M}_{wc}$  se busca el punto  $\widetilde{M}_{cam}$ . Para esto se realiza la traslación  $(-c_x, -c_y, -c_z)$  que hace coincidir el origen del sistema de coordenadas de la cámara con el del mundo. Luego se aplica una rotación para hacer coincidir los ejes de ambos sistemas y finalmente se aplica nuevamente la traslación pero en sentido opuesto.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix}$$

Esta matriz se denomina matriz extrínseca y corresponde a los parámetros que dependen de la posición y dirección de la cámara.

La composición de la matriz intrínseca con la matriz extrínseca da como resultado la matriz de la transformación que permite proyectar un punto 3D sobre la imagen. Esta matriz se llama *Camera Matrix* y tiene la siguiente forma:

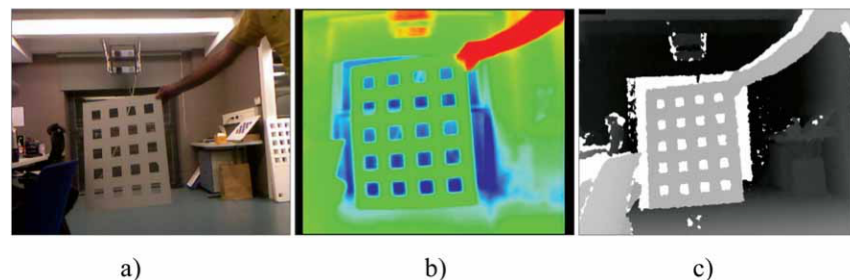
$$C = \begin{bmatrix} f & 0 & u' \\ 0 & f' & v' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} = K \cdot [R|T]$$

donde K corresponde a la matriz intrínseca y [R|T] corresponde a la matriz extrínseca compuesta por una rotación R y una traslación T.

#### 2.4. Etapa de calibración

La etapa de calibración consiste en determinar los parámetros intrínsecos y extrínsecos para cada cámara utilizada. Primero se determina la matriz  $C$  y luego se descompone en la matriz  $K$  y  $[R|T]$ . Para determinar la matriz  $C$  se toman puntos de referencia para los cuales se conoce su posición en el espacio y en la imagen. Estos puntos determinan un sistema lineal de ecuaciones donde las incógnitas corresponden a los elementos de la matriz  $C$ . Dado que la matriz tiene 12 elementos, son necesarias 12 ecuaciones. Se puede demostrar que cada punto impone dos restricciones en la matriz por lo que únicamente se requieren 6 puntos de muestra.

En el prototipo se desarrolla un método que permite calibrar las cámaras térmicas, RGB y de profundidad al mismo tiempo tomando puntos de referencia sobre un tablero construido con un material especial. Además se construyó un software para facilitar el proceso de calibración.



**Figura 4.** Imágenes tomadas por las cámaras en el proceso de calibración. Se utiliza un único material que puede ser detectado por las tres cámaras. (a) Cámara RGB (b) Cámara térmica (c) Cámara de profundidad

#### 2.5. Adquisición de datos

Para obtener la imagen térmica 3D se debe construir el modelo 3D y luego combinarlo con el termograma 2D.

La construcción del modelo 3D depende del tipo de scanner utilizado por lo que la discusión se limitará al método empleado en el prototipo. El método implica hacer el proceso inverso a la proyección. Para cada píxel se desea encontrar su punto correspondiente en el espacio. Este proceso es llamado proyección hacia atrás.

Dado un píxel existen infinitos puntos en el espacio que proyectados caen sobre él. Todos los puntos de la recta que pasa por el centro de proyección y el píxel cumplen con esto. Por lo tanto, para determinar unívocamente al punto es necesario conocer su distancia al centro de proyección. Por esta razón el prototipo utiliza una cámara de profundidad. El origen de esta cámara debe coincidir con el origen del sistema de coordenadas global. La construcción del modelo esta dada por los siguientes pasos:

1. Se calcula  $C_{depth}^{-1}$ , la inversa de la matriz correspondiente a la cámara de profundidad.
2. Dado un píxel  $m_{pix}$  de la imagen obtenida por la cámara de profundidad se calcula su proyección hacia atrás. La recta que va desde el centro de la cámara y pasa por el píxel está dada por  $\gamma \cdot (C_{depth}^{-1} \cdot m_{pix})$  siendo  $\gamma \geq 0$ . Asignando a  $\gamma$  la distancia  $d$  del punto a la cámara se obtiene el punto buscado. Por lo tanto, la proyección hacia atrás del píxel esta dada por  $M = d \cdot (C_{depth}^{-1} \cdot m_{pix})$
3. Se proyecta el punto  $M$  obtenido en el paso anterior sobre la imagen RGB para obtener el color en dicho punto. La proyección esta dada por  $C_{rgb} \cdot M$ , donde  $C_{rgb}$  es la matriz de la cámara RGB.
4. Se proyecta el punto  $M$  sobre el termograma 2D para obtener el flujo de calor en el punto. La proyección esta dada por  $C_{termo} \cdot M$ , donde  $C_{termo}$  es la matriz de la cámara termográfica.
5. Se repite 2, 3 y 4 para cada píxel de la imagen obtenida con la cámara de profundidad.

## 2.6. Estandarización de termogramas 3D

La ventaja principal de la termografía 3D es que al aumentar los termogramas 2D con datos espaciales es posible calcular el flujo exacto en un punto dado. También abren el camino hacia la estandarización de termogramas 3D que cumplen la propiedad de ser independientes de la posición de la cámara y del objeto [4].

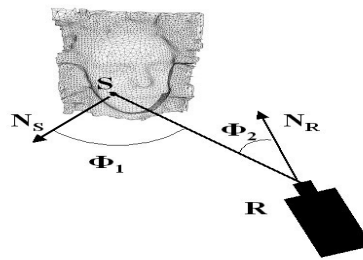


Figura 5. Flujo capturado por la cámara

El flujo de calor  $F$  en un punto de la superficie esta dado por

$$F = \frac{L \cdot dS \cdot dR \cdot (\cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2))}{D^2}$$

Se puede observar que el flujo depende de la posición de la cámara, la distancia del objeto y la normal en el punto. Para generar termogramas independientes de la vista, se propone calcular el flujo normalizado

$$F_n = L \cdot dS \cdot dR = \frac{F \cdot D^2}{\cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2)} \quad .$$

De esta forma se puede transformar el termograma 3D original en un termograma 3D normalizado que es independiente de la vista. Esto facilita enormemente la comparación entre termogramas y habilita la creación de una base de datos de termogramas estándares tomados de personas sanas que luego pueden ser comparados con los termogramas de otros pacientes.

### 3. Conclusiones

La termografía es una tecnología novedosa que combina información térmica de un objeto con su geometría. Esta combinación permite que se puedan realizar análisis más precisos y cuantitativos así como la comparación entre termogramas diferentes de un mismo objeto.

Se ha estudiado un prototipo simple donde se demuestra la tecnología utilizando únicamente cámaras termográficas y el dispositivo *Kinect*. El caso de estudio propone un procedimiento para la construcción de termogramas 3D basado en un modelo matemático simple de cámara. Si bien el uso práctico del prototipo se ve acotado por la utilización de tecnologías de bajo costo, el prototipo propone un esquema flexible que puede ser extendido utilizando scanners y cámaras de alta precisión. La termografía 3D permite la creación de termogramas estándares que pueden ser cuantificados y comparados entre sí utilizando como unidad de medida el flujo normalizado. Esto da un paso fundamental hacia la creación de bases de datos de termogramas que luego pueden ser tomados como referencia por los médicos.

La termografía 3D se encuentra en continuo desarrollo y promete traer consigo interesantes aplicaciones en la medicina. Dadas sus ventajas frente a la termografía convencional es posible que un futuro sea adoptada por la medicina como una herramienta efectiva de diagnóstico.

### 4. Bibliografía

- [1] C. Hildebrandt, et al., “An Overview of Recent Application of Medical Infrared Thermography in Sports Medicine in Austria”, *Sensors*, vol. 10, no. 5, pp. 4700–4715, May 2010.
- [2] I. Grubisic, et al., "Active 3D scanning based 3D thermography system and medical applications," *MIPRO*, 2011 Proceedings of the 34th International Convention , pp. 269–273, May 2011
- [3] K. Skala, et al., “4D thermal imaging system for medical applications” *Sensors*, vol. 113, no. 4, pp. 407–416, 2011.
- [4] P. Aksenov, et al., “3D thermography for quantification of heat generation resulting from inflammation”, in *3D Modeling Symp.*, Paris, France, 2003.