



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**SEGUIMIENTO 3D DE ROSTROS E IRIS MEDIANTE MOLDES
ANTROPOMÉTRICOS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MENCIÓN ELÉCTRICA**

VANEL ANDRÉS LAZCANO GONZÁLEZ

**PROFESOR GUIA:
CLAUDIO PÉREZ FLORES**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
PABLO ESTEVEZ VALENCIA
CLAUDIO HELD BARRANDEGUY
MARCELO GUARINI HERMANN**

**SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2006**

RESUMEN DEL INFORME FINAL PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MENCIÓN INGENIERÍA ELÉCTRICA
POR: VANEL ANDRÉS LAZCANO GONZÁLEZ
FECHA: 11-12-06.
PROF. GUÍA: DR. CLAUDIO PEREZ F.

SEGUIMIENTO 3D DE ROSTRO E IRIS MEDIANTE MOLDES ANTROPOMÉTRICOS

En el seguimiento de rostros e iris existe una gran cantidad de trabajos publicados, basados en diferentes técnicas consideradas invasivas como: montaje de dispositivos electrónicos (electrodos, cámaras).

Aprovechando la mayor velocidad de procesamiento alcanzada por los computadores personales y la disminución de costos de los sistemas de adquisición de video, se han desarrollado diferentes métodos no invasivos para el seguimiento de iris y rostros.

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, se desarrolló un método no invasivo de seguimiento de iris que consiste en tres etapas: detección gruesa de la posición del rostro, detección fina y estimación del tamaño del rostro, y detección de la posición y tamaño del iris. La detección gruesa usa la metodología de Maio y Maltoni. La detección fina se realiza con una integral de línea, utilizando un molde antropométrico del rostro inclinado en el eje coronal, transversal y sagital, sobre una imagen direccional de entrada, estimándose así la posición, inclinación y tamaño del rostro. Conociendo estos valores es posible definir zonas de búsqueda más probables del iris. En la que se busca la posición y tamaño del iris recorriéndola con unos moldes semicirculares.

Para el desarrollo de los nuevos moldes antropométricos y validación de la metodología, se construyeron bancos de imágenes estáticas de 5 individuos con rotaciones en el eje transversal. Los individuos rotaron sus rostros desde -45° a 45° con un paso de 15° . Además se construyeron 4 secuencias de video para los mismos individuos, que rotan sus rostros en el eje transversal y coronal. Se construyeron 4 secuencias de video de individuos que rotan su rostro en el eje sagital. Con estos bancos de imágenes se construyeron modelos empíricos de la variación de las posiciones de las características antropométricas del rostro y la excentricidad del rostro, frente a las rotaciones, transversales y sagitales. Finalmente se construyeron 4 secuencias de video de individuos que rotan su rostro en los 3 ejes.

La metodología desarrollada se evaluó en el banco de secuencias de video para las rotaciones en los diferentes ejes. Para la rotación transversal se obtuvo que en todas las secuencias el desempeño es mayor que 89% y en 2 alcanza el 100%. Para el caso de la detección del iris se observa que el porcentaje de detección correcta fue mayor que 75% y en 2 secuencias fue mayor que 90%. Para el seguimiento sagital se obtuvo que la detección de rostros en tres de las secuencias fue más de 89% sólo en una se tiene 78%, en una alcanza 99%. Para el caso de la detección del iris se observa que el porcentaje de detección correcta fue mayor que 89% en 3 de las secuencias y en 1 secuencia mayor que 86%. En la rotación 3D se obtuvo valores de la tasa de detección correcta del rostro en tres secuencias mayores que 93% y en sólo una es de 18%. La tasa de detección correcta del iris sólo en una secuencia presenta un valor de 83%, en otra se alcanza 89% y en dos de ellas se supera el 90% de detección correcta.

La metodología desarrollada para el seguimiento de rostros selectiva en el eje transversal con un paso de 20° , en el sagital con paso de 20° y en el coronal con paso de 15° .

Se midieron los tiempos de procesamiento para rotaciones coronal-transversal y 3D. Para estos ejes se obtuvo un tiempo promedio de 0,020 s, y 0,028 s respectivamente, pudiéndose procesar hasta 50 imágenes y 35 imágenes por segundos respectivamente. Estos tiempos se midieron en un computador Pentium 4 de 3,2 GHz. Estos resultados permiten aplicar la metodología en tiempo real.

AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a mis padres Domingo y Gladys por su apoyo durante 3 años para el desarrollo de esta tesis.

Agradezco al profesor Claudio Pérez Por su apoyo y confianza, profesor Pablo Estévez, Claudio Held y Marcelo Guarini por sus consejos en la realización de este documento.

Agradezco el apoyo de financiamiento del proyecto Fondecyt 1040693.

Agradezco a Alvaro Palma por haber realizado un programa de detección de rostro que funciona en tiempo y detecta rostros en forma increíble. Agradezco su apoyo para entender los programas y para que estos funcionaran. Sin esto esta tesis no se podría haber realizado.

A los amigazos del laboratorio: Leo, Pablo, Andrés, Faby, Leonardo, Javier, Cristián Robles, Carlos, Chubo, Cristian Díaz, Patricio Garate, Z, Juanito, Pablo Vera, Neven, Meme, Carolina, Pablo González, Victor, Rodrigo, Eliana Monardes.

Agradezco a Cecilia y a Leticia.

A mis Padres

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. METODOLOGÍA	7
2.1 DETECCIÓN GRUESA.....	7
2.1.1 Transformada de Hough.....	8
2.2 DETECCIÓN FINA	13
2.2.1 Imagen direccional fina.....	13
2.2.2 Moldes finos.....	14
2.3.3 Integral de línea.....	35
2.3 DETECCIÓN DE IRIS	36
2.4 SEGUIMIENTO DE ROSTROS E IRIS EN SECUENCIAS DE VIDEO	39
2.5 BASE DE DATOS.....	40
3. RESULTADOS.....	43
3.1 DETECCIÓN CORONAL-TRANSVERSAL	43
3.1.1 Integral de línea de 2 dimensiones	44
3.1.2 Seguimiento en secuencias de video	45
3.1.3 Medición de porcentajes de error en detección de rostro y ojos	47
3.1.4 Ejemplos de detecciones erróneas.....	48
3.2 DETECCIÓN SAGITAL.....	48
3.2.1 Integral de línea para rotación sagital	49
3.2.2 Seguimiento en secuencias de video	51
3.2.3 Medición de porcentajes de error en detección de rostro y ojos	52
3.2.4 Ejemplos de detección errónea	53
3.3 DETECCIÓN 3D	53
3.3.1 Integral de línea de 3 dimensiones.....	54
3.3.2 Seguimiento de secuencias de video en 3 dimensiones	56
3.3.3 Medición de porcentajes de error en detección de rostro y ojos	57
3.3.4 Ejemplos de detección errónea	58
3.4 TIEMPOS DE PROCESAMIENTO	58
4. CONCLUSIONES	62
5. REFERENCIAS.....	65

Glosario de variables

θ^*	: Angulo central del molde elíptico.
φ	: Tamaño del molde elíptico.
$I(i, j)$: Imagen de entrada.
(i_G, j_G)	: Fila y columna del máximo del acumulador.
W_G	: Factor de escala entre imagen de entrada y la imagen direccional gruesa.
I_{DF}	: Imagen direccional fina.
W_F	: Escala de la imagen direccional fina.
(i_{GE}, j_{GE})	: Fila y columna del máximo del acumulador a escala de la imagen direccional fina.
(i_G^*, j_G^*)	: Coordenadas del centro grueso a la escala de la imagen de entrada.
n_v	: Eje mayor de máxima elipse detectable en la vertical.
a	: Semieje menor de la elipse.
b	: Semieje mayor de la elipse.
e	: Excentricidad de la elipse.
I_{ROI}	: Región de interés en la imagen direccional fina.
ϕ	: Angulo de rotación coronal del molde.
Φ	: Conjunto de valores posibles para la rotación del molde del rostro en los moldes coronales.
Γ	: Conjunto de valores posibles para la rotación del molde del rostro para la rotación transversal.
H	: Conjunto de valores posibles para la rotación del molde del rostro para la rotación sagital.
$I_{T_{FR\Phi\Gamma H}}$: Valor de la integral de línea para los moldes en los ángulos Φ , Γ , H .
$a(i, j)$: Diferencia efectiva entre ángulos de elementos de la imagen direccional de entrada y los moldes del rostro en el punto (i, j) .
$T_{FR\Phi\Gamma H}(i_0, j_0)$: Molde del rostro centrado en el punto (i_0, j_0)
$N_{T_{FR\Phi\Gamma H}}$: Numero de puntos del molde del rostro.

$AT(i, j)$: Angulo asociado al molde del rostro en el punto (i, j) .
$AI_R(i, j)$: Angulo asociado a la imagen direccional de entrada en la región de interés, I_{ROI} .
$I_{er}(i, j)$: Región de búsqueda del iris.
$R_{LI\Phi\Gamma H}$: Tamaño del iris estimado para rostro rotados 3D.
$T_{I,R+\delta,\Phi,\Gamma,H}(i_0, j_0)$: Contorno semicircular de tamaño $R + \delta$ centrado en el punto (i_0, j_0) .
$N_{T_{I,R+\delta,\Phi,\Gamma,H}}$: Numero de puntos del molde semicircular del iris de tamaño $R + \delta$.
R_f	: Tamaño del rostro semieje mayor del rostro para detección Online.
Lim sup ceja izq	: Límite superior ceja izquierda.
Lim inf ceja Izq	: Límite inferior ceja izquierda
Lim sup ceja der	: Límite superior ceja derecha.
Lim inf ceja der	: Límite inferior ceja derecha.
Lim inf nariz	: Límite inferior nariz.
Lim sup nariz	: Límite superior nariz.
Lim inf boca	: Límite inferior boca.
Lim sup boca	: Límite superior boca.

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento de iris en rostros ha sido utilizado en interfaces hombre máquina para detección de somnolencia [21][24][25], apoyo a discapacitados y en realidad virtual [2]. Dentro de las posibles aplicaciones se ha propuesto operar un teclado virtual a través de la detección de la posición del iris y determinación de dirección de la mirada [2]. También se consideran futuras aplicaciones para dispositivos controlados por la dirección de la mirada en salas de cirugía, maquinarias industriales y en cabinas de aviones. La interacción entre el computador y el humano debería hacerse en forma robusta, no invasiva [13] y en tiempo real. En el pasado se desarrollaron varios métodos para el seguimiento del iris que utilizaban electrodos para medir la actividad eléctrica en el globo ocular, cascos para montar cámaras solidarias a la cabeza, uso de reflejos de luz en la cornea y cristalino, y utilización de luz infrarroja para destacar el iris. La disminución de los costos en sistemas de adquisición de video, de computadores y el aumento de velocidad y de capacidades de procesamiento, han hecho posible desarrollar sistemas de seguimiento de iris mediante el procesamiento de imágenes en tiempo real.

Varias limitaciones se han identificado en los sistemas previamente desarrollados para la detección y seguimiento de iris. Algunas aplicaciones son invasivas, otras suponen un fondo homogéneo o permiten sólo pequeños movimientos de la cabeza [1] o requieren el primer cuadro frontal a la cámara [7]. Otros métodos utilizan el color de la piel del rostro, el cual varía dependiendo de la fuente de iluminación y de la etnia del sujeto [12]. Los métodos basados en color imponen restricciones en el color del fondo. Varios de los métodos de detección de iris desarrollados están lejos de poder ser implementados en tiempo real.

Los métodos desarrollados para la detección y seguimiento de rostros se han basado principalmente en procesamiento digital de imágenes. Los métodos desarrollados se pueden dividir en tres grandes grupos [23]: características invariantes, calce de moldes y métodos holísticos. El primer grupo busca las características invariantes del rostro en una imagen: se destacan los métodos de detección de color piel [23], los que buscan formas elipsoidales de rostros o diferencias de contraste que identifican a los ojos. El segundo grupo [23] considera un conjunto de características del rostro como un todo y la correlación de este molde con la imagen de entrada permite indicar la existencia y la posición del rostro. Los métodos holísticos son entrenados a través de un conjunto de imágenes de entrada, deben capturar en forma representativa las posibles variaciones del rostro. Estos algoritmos entrenados se utilizan para la detección de múltiples rostros en imágenes digitales [23].

Los métodos anteriores son efectivos pero presentan algunas desventajas. Por una parte los métodos que buscan características del rostro en la imagen, como el color, están restringidos a una o pocas etnias y esta información no es suficiente para lograr detección y seguimiento del rostro en forma exitosa. Si se buscan características invariantes en la imagen estos métodos son poco robustos a cambios de iluminación y a ruido en las imágenes. Los métodos de calce de molde para el rostro sobre la imagen tienen menores tiempos de cálculo involucrados, pero no tienen buen desempeño con los cambios de escala y rotaciones [22]. Los métodos holísticos son bastante demandantes en cálculos, en recurso de memoria y necesitan grandes bancos de imágenes para su entrenamiento. Estos métodos presentan una alta eficiencia al considerar posibles rostros en muchas y en todas las rotaciones posibles dentro de la imagen, lo que dificulta su implementación en tiempo real [18].

Los trabajos que han abordado el problema de seguimiento de rostros rotados han sido llevados a cabo a través de diferentes enfoques como: color de piel, modelos 3D del rostro, máscaras binarias, redes neuronales, detección de características antropométricas del rostro, luz infrarroja y visión estereoscópica. En [12] se presenta un método para seguimiento de rostro en el tiempo usando color de piel, pero es sensible al cambio de etnia. Los métodos que utilizan una malla finita

3D que representa un modelo del rostro [23], requieren de un scanner 3D para tener una maya tridimensional del rostro. En [4] se reconstruye el rostro a partir de una vista frontal pero con tiempo de procesamientos elevados, no alcanzándose tasas superiores a los 30 cuadros por segundo, por ejemplo Rowley en [18] obtuvo redes neuronales entrenadas para detección de rostros rotados pero con tiempos de procesamiento del orden de minutos, los que son demasiado altos para una implementación en tiempo real. Los métodos por luz infrarroja [24] [25] entregan buena estimación de la posición del iris y de la inclinación del rostro y procesamientos en tiempo real, pero esta técnica es considerada invasiva al irradiar al sujeto con este tipo de luz, y se requiere un hardware adicional para generar la luz infrarroja. En [8] se presenta un método de detección de rostros con rotación en el eje transversal, el tiempo involucrados para la detección de un rostro en un Pentium II de 233 MHz es de 2,4 s. Considerando un factor 15 en el aumento de velocidad de procesamiento, con un computador de 3,4 GHz, se podría tener un tiempo de detección de rostro de 0,16 s, o 6 cuadros por segundo no logrando 30 cuadros por segundo, que se considera tiempo real, ni considerar rotación sagital y coronal. En [11] usando visión estereoscópica y filtros de partículas se obtiene buenos resultados en seguimiento de rostros y bajos tiempos para la detección de rostro pero se requieren dos cámaras y hardware adicional para manejarlas.

Esta Tesis de Magister aporta al conjunto de métodos de calce de moldes al rostro. Sus objetivos son incorporar a la metodología existente para rotación coronal [5], la capacidad de realizar seguimiento de iris en rostros rotados en el eje transversal y sagital en una imagen digital a través de una metodología no invasiva. Se pretende así proveer una herramienta para realizar la detección de iris para rotaciones de cabeza en 3D. Tomando en cuenta algunas simplificaciones, esta metodología debe ser aplicable en tiempo real a una tasa de 30 cuadros por segundo. La Figura 1.1 muestra los ejes de rotación coronal transversal y sagital para el rostro. Se pretende relajar las restricciones a los movimientos del rostro en el trabajo desarrollado por Palma en [13], el que permitía rotaciones en el eje coronal de $\pm 15^\circ$, en el transversal de $\pm 10^\circ$ y en el sagital de $\pm 20^\circ$.

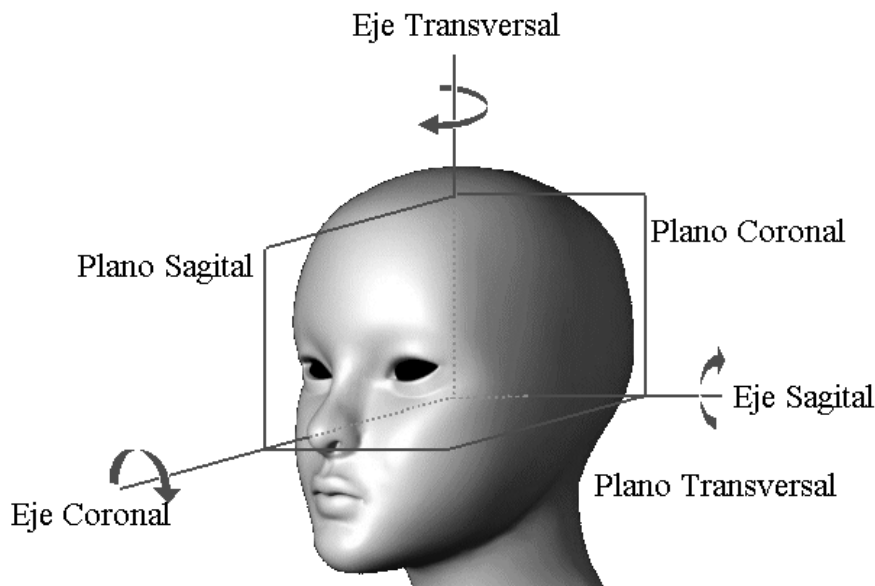


Figura 1.1 Ejes de rotación posibles para el rostro

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile, se desarrolló un método no invasivo de seguimiento de iris que consiste en tres etapas [14]: detección gruesa de la posición del rostro, detección fina de la posición y estimación del tamaño del rostro, y detección de la posición y tamaño real del iris. La detección gruesa usa la metodología propuesta por Maio y Maltoni en [9]. La detección fina se realiza con una integral de línea, utilizando un molde antropométrico del rostro inclinados en el eje coronal, transversal y sagital, sobre una imagen

direccional determinada de la imagen de entrada, estimándose así la posición, inclinación y tamaño del rostro. Conociendo estos valores es posible definir zonas de búsqueda más probables del iris. En esta zona se busca la posición y tamaño del iris comparando esta región de la imagen con unos moldes del iris que se crearon en forma análoga al método propuesto por Daugman [3]. Esta metodología utiliza pares de contornos semicirculares de diferentes tamaños que representan el borde del iris. Se calcula una diferencia entre 2 integrales de línea de tamaños consecutivos al interior de la región de búsqueda del iris. Esta diferencia será máxima cuando un contorno se encuentre al interior del iris y otro se encuentre fuera.

La validación del método propuesto se realizó en tres conjuntos de videos: un primer conjunto de 5 secuencias de video, en que personas mueven su cabeza en los ejes transversal y coronal con un total 1679 imágenes; un segundo conjunto de cuatro secuencias de video, en que personas mueven sus rostros en el eje sagital con un total de 973 imágenes y un tercer conjunto de 4 secuencias de video con personas que mueven sus rostros en 3D con un total de 1104 imágenes.

Para la realización de esta Tesis de Magíster se cuenta con un programa desarrollado en Microsoft Visual C++ versión 5.0, que es capaz de realizar, a través de procesamiento de imágenes, seguimiento en línea y detección de ojos e iris en rostros rotados en el eje coronal entre $\pm 45^\circ$.

En los capítulos que siguen se muestra el nuevo método desarrollado para el seguimiento de iris en rostros rotados en 3D, los resultados obtenidos, la discusión y conclusiones que son posibles extraer de este trabajo.

El capítulo 2 explica en detalle las modificaciones realizadas a la metodología implementada en [14] y [17]. Estas modificaciones son: construcción de nuevos moldes, estructura de datos, cambios a la metodología de detección online de rostros e iris rotados en 3D, tanto para secuencias de video como en tiempo real.

En el capítulo 3 se describen los resultados de validación del algoritmo en los conjuntos de secuencias de video construidas y algunos ejemplos de cálculos de integrales de línea y de seguimiento en el tiempo de secuencias de video.

En el capítulo 4 se presentan las conclusiones obtenidas de los resultados del trabajo, las mejoras que se pueden hacer al método y futuras líneas de investigación.

2. METODOLOGÍA

La metodología para la detección de iris en rostros rotados en el eje sagital, transversal y coronal se realizó en tres etapas: detección gruesa, detección fina y detección del iris. La detección gruesa consideró el cálculo de la transformada de Hough para la estimación gruesa de la posición del rostro. La detección fina utilizó la estimación gruesa de la posición del rostro para determinar el tamaño y la inclinación del rostro. La detección del iris consideró la inclinación del rostro, su tamaño y posición para definir una región para la búsqueda del iris.

2.1 Detección gruesa

La detección gruesa se llevó a cabo en la imagen de entrada, generando una imagen direccional gruesa y sobre ésta se calculó la transformada de Hough.

La imagen direccional gruesa se calculó subdividiendo la imagen de entrada en subimágenes de dimensiones 7x7 píxeles, según la metodología definida en [9] [13] [14] [15] [16]. A cada uno de los píxeles de esta subimagen se le asoció un vector definido según la ecuación 2.1,

$$\begin{aligned} \vec{h} &= n_x \hat{i} + n_y \hat{j}, \\ n_{xi} &= \frac{I(i-1, j-1) + I(i+1, j-1) - I(i-1, j+1) - I(i+1, j+1)}{4}, \\ n_{yi} &= \frac{I(i+1, j-1) - I(i+1, j+1) - I(i-1, j-1) + I(i-1, j+1)}{4}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

en que $I(i, j)$ es la imagen de entrada. Se generaron 5x5 vectores considerando un ancho de 1 píxel para el borde de la región interior en la subimagen de 7x7. Se tomaron estos vectores y se buscó el vector más representativo según [9]. La imagen de entrada es de dimensión fija y es de 320x240, su imagen direccional será de dimensiones 45x34, los píxeles que sobran se eliminan de la imagen. Un ejemplo de aplicar este método sobre una imagen se muestra en la Figura 2.1. Como se observa en la Figura 2.1(b) la imagen direccional gruesa presenta la dirección en que se orienta la variación del nivel de gris en cada una de las subimágenes de dimensión 7x7. En la región del rostro, en la Figura 2.1(b), se observa que se forma un contorno elíptico muy parecido a la forma del rostro en la Figura 2.1(a). Para la detección del rostro se aprovecha este hecho y se calculó la transformada de Hough como se indica en [9].

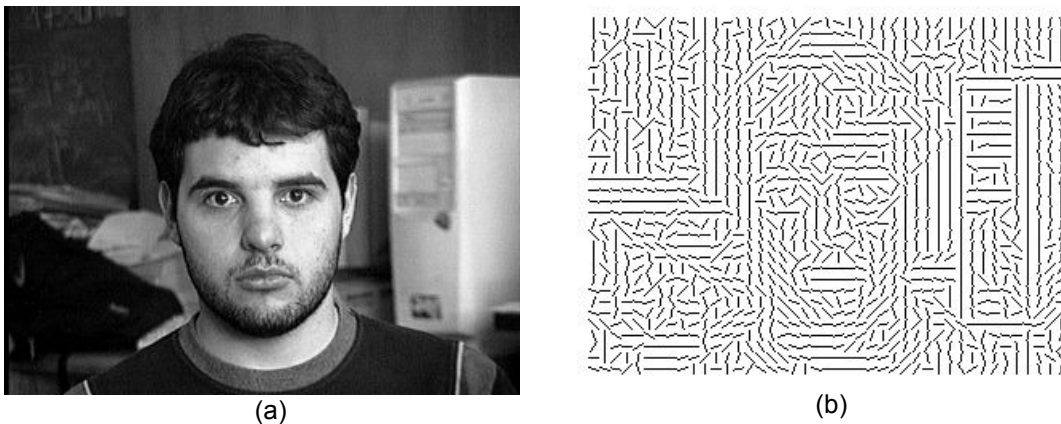


Figura 2.1: Estimación de imagen direccional gruesa. (a) Imagen de entrada. (b) imagen direccional gruesa estimada.

2.1.1 Transformada de Hough

La transformada de Hough consiste en el barrido de la imagen direccional utilizando moldes elípticos que representan la posición del centro de una elipse con respecto a una tangente inclinada φ grados. La Figura 2.2 muestra este molde elíptico, en que la tangente asociada a una vecindad en (x_0, y_0) , inclinada φ grados con respecto a la horizontal es representada por una línea gruesa. Si se asume que dicha tangente es a su vez tangente a una elipse de excentricidad e , y semieje vertical situado en el rango de variación $b \in [b_{\min}, b_{\max}]$, es posible calcular el lugar geométrico de los centros de esas elipses, el cual vendría dado por el ángulo θ , limitado por los tamaños mínimos y máximos de los semiejes vertical y horizontal admisibles por el algoritmo. Este ángulo θ es formado por el rayo de una elipse de excentricidad e al punto tangente de ángulo φ su valor viene dado por la ecuación 2.1,

$$\theta = \tan^{-1} \left(-\frac{1}{e \cdot \tan(\varphi)} \right), \quad (2.1)$$

en que $e = \frac{a_{\max}}{b_{\min}}$, con a_{\max} el máximo semieje horizontal y b_{\max} el máximo semieje vertical admisible. El ángulo φ es el que forma la tangente con la horizontal y ambos ángulos y su relación se aprecian en la Figura 2.2.

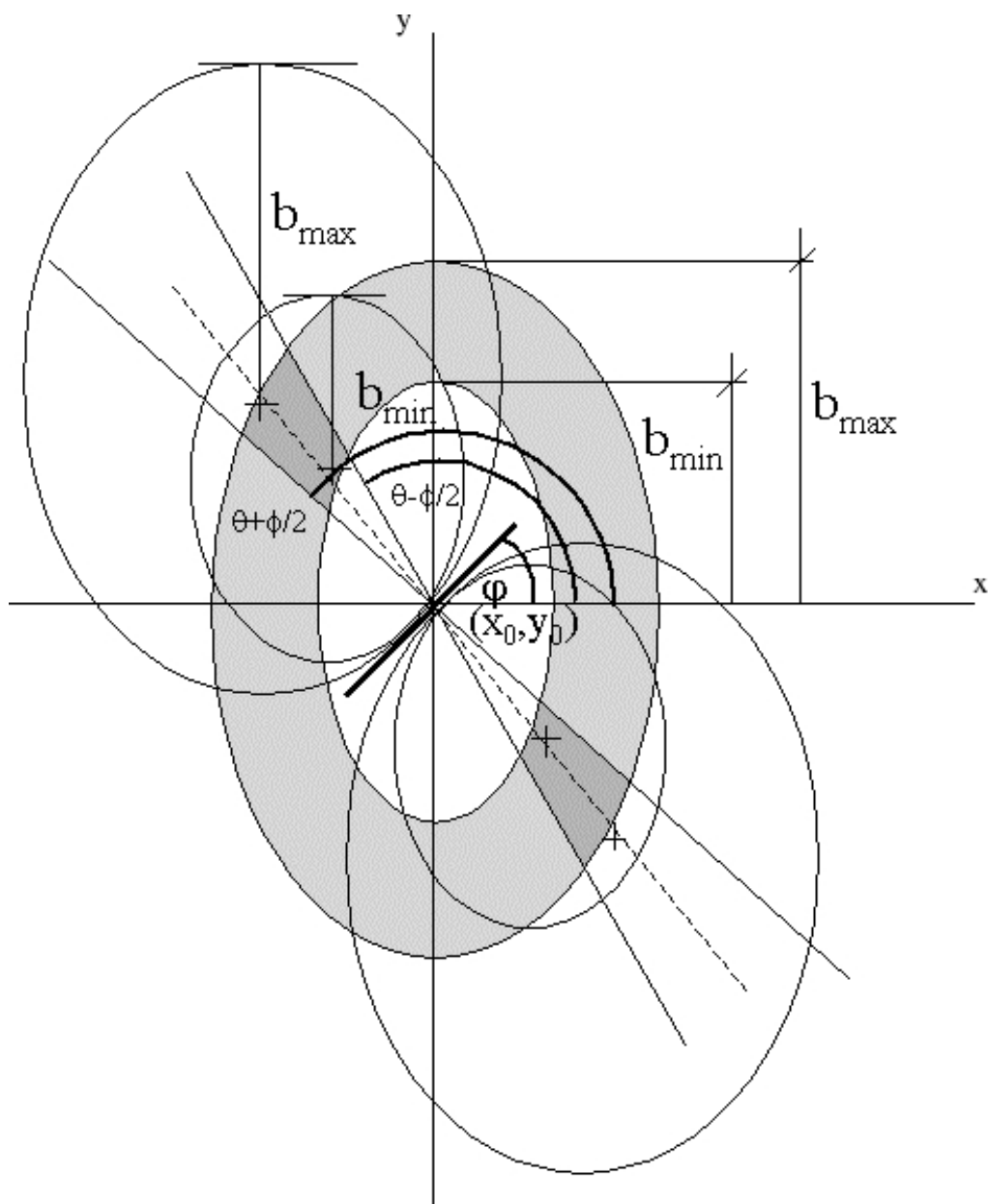


Figura 2.2: Molde elíptico de posibles posiciones del centro del rostro con respecto a una tangente inclinada ϕ grados. Las coordenadas (x_0, y_0) representan la posición de un elemento tangente al rostro, la línea punteada representa la recta de ubicación del centro del rostro. Los ángulos $\theta + \phi/2$ y $\theta - \phi/2$ representan el rango de tolerancia para la posible ubicación del rostro. El tamaño del rostros detectable estará en el rango b_{\min} y b_{\max} .

Una vez calculado en ángulo ϕ , fue posible asociar a la recta sobre la que se sitúa el centro de la elipse que representa al rostro con respecto a la tangente en estudio. La Figura 2.2 muestra el ángulo. Una segunda condición establece que el tamaño del semieje vertical de la elipse que representa al rostro debe estar en el rango $b \in [b_{\min}, b_{\max}]$.

El método de generación de la imagen direccional aproximó la distribución de tonos de gris dentro de cada vecindad por un plano, aproximación que introduce un error. Con el fin de considerar el efecto de este error, se añadió un ángulo de tolerancia ϕ a la ubicación del centro de la elipse que representa el rostro, por lo que la posición de dicho centro de la elipse pudo ubicarse en una zona en torno a ella, delimitada por la intersección de un anillo elíptico conformado por una elipse interna

de semiejes vertical b_{\min} , y una externa, cuyo semieje vertical es b_{\max} , con dos rectas, definidas por los ángulos $\theta + \frac{\phi}{2}$ y $\theta - \frac{\phi}{2}$.

Los puntos situados en los ángulos más cercanos a la recta que representan el eje de la zona de posible centros constituyeron una ubicación más probable del centro de la elipse que los puntos situados más cercanos al borde de la zona, es decir a las rectas de pendiente $\theta + \frac{\phi}{2}$ y $\theta - \frac{\phi}{2}$.

Para cada inclinación de los vectores de la imagen direccional se generó un molde elíptico con un paso de 5° . Se generaron 36 moldes para ángulos que van de 0° a 175° con un paso de 5° como se muestra en la Figura 2.3.

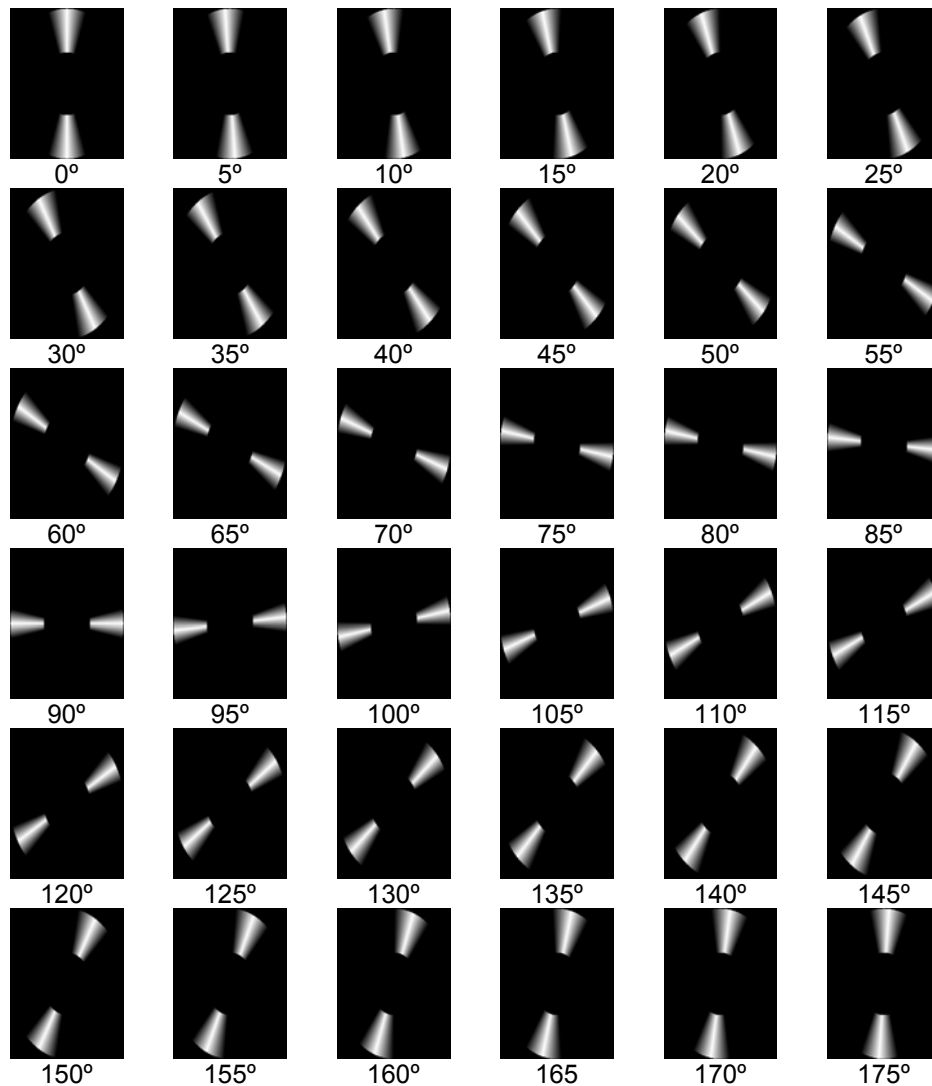


Figura 2.3: Moldes gruesos generados para el cálculo de la transformada de Hough entre 0° a 175° con un paso de 5° . El molde está definido en el rango de ángulo $\theta + \phi/2$ y $\theta - \phi/2$ y de tamaño b_{\min} y b_{\max} . Para ángulos mayores que 180° los moldes se repiten.

Los moldes elípticos de la Figura 2.3 muestran la probabilidad de encontrar el centro de una elipse de eje mayor b_{\min} y eje mayor b_{\max} . Dado un vector tangente la probabilidad se indicó en niveles de gris. Esta probabilidad se asigna según,

$$\text{Prob}(\theta^*) = 1 - \frac{2 - |\theta^* - \theta|}{\phi}, \quad (2.2)$$

en que θ^* , ángulo central del molde, θ es el ángulo de tolerancia que varía entre $-\frac{\phi}{2}$ y $\frac{\phi}{2}$

definiendo el tamaño en grados del molde.

En la Figura 2.4 se muestra un gráfico de la función de probabilidad para la ubicación del centro de la elipse.

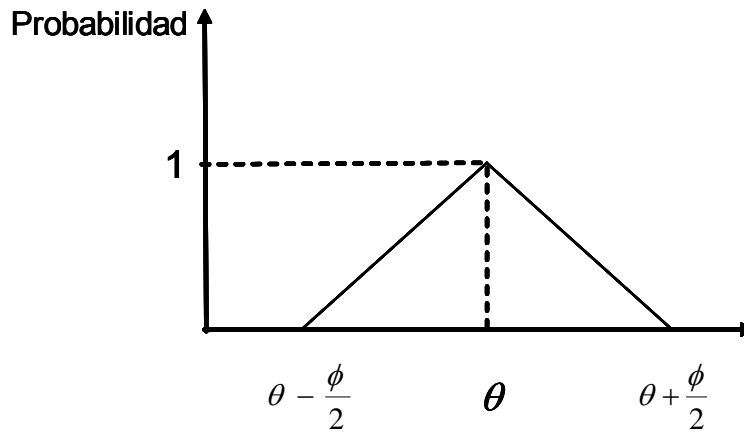


Figura 2.4: Gráfico de la función de probabilidad de ubicación del centro de la elipse para la construcción de moldes gruesos. El molde está definido en el rango $\theta + \phi/2$ y $\theta - \phi/2$. En este caso $\phi = 30^\circ$.

Se construyó una matriz acumulador de tamaño de la imagen de entrada y con el conjunto de moldes de la Figura 2.3 se recorrió la imagen direccional gruesa y se asignó los valores del molde grueso en el acumulador para cada punto en la imagen direccional. Al recorrer la imagen direccional gruesa, realizando este procedimiento, los valores del acumulador presentaron un máximo si existe un contorno elíptico en la imagen. La Figura 2.5(c) muestra el acumulador superpuesto a la imagen de entrada.

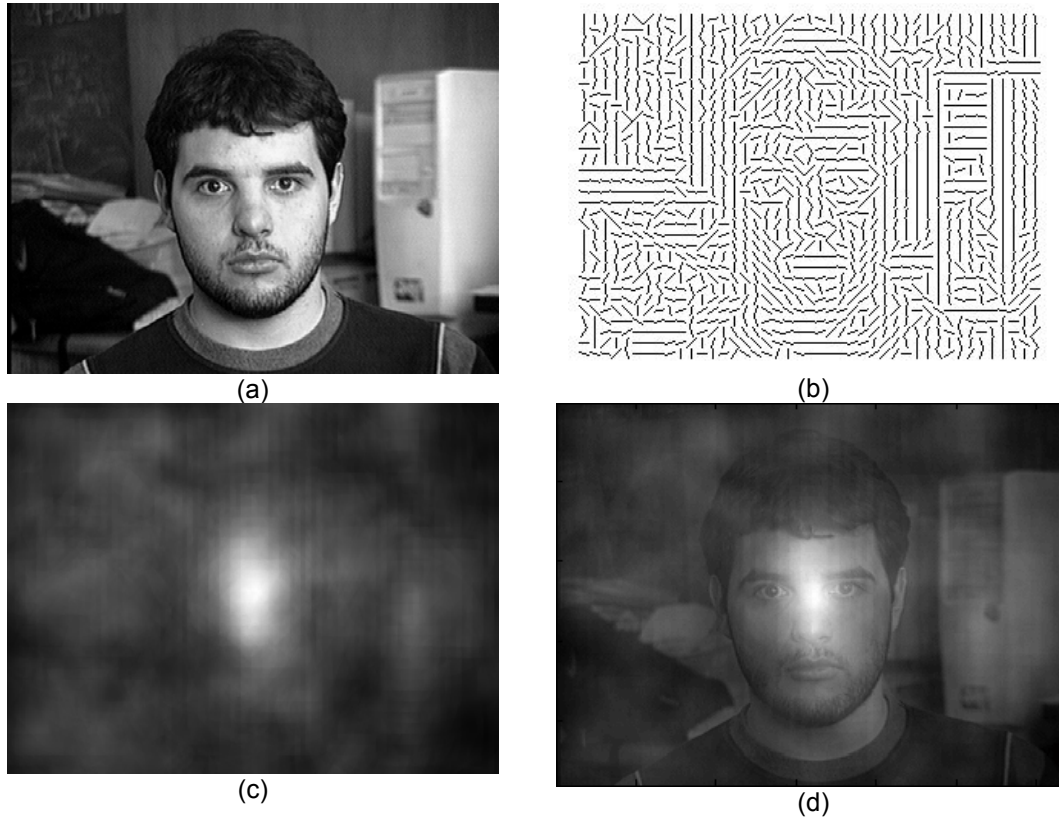


Figura 2.5: Imagen de ejemplo de cálculo de la transformada de Hough. En una imagen direccional. (a) Imagen de entrada. (b) Imagen direccional gruesa calculada a la imagen de entrada. (c) Acumulador calculado sobre la imagen direccional gruesa (d) Imagen de entrada superpuesta al acumulador.

En la Figura 2.5(c) se muestran los valores del acumulador en niveles de gris, un nivel de gris bajo indica un bajo nivel del acumulador y un nivel de gris alto representa un nivel alto del acumulador. En el acumulador de la Figura 2.5(c) se presenta un máximo en la posición cercana al centro del rostro. La Figura 2.5(d) muestra el acumulador superpuesto a la imagen de entrada, en la que se observa que el máximo del acumulador coincide con el centro del rostro.

El máximo en el acumulador determinó la estimación gruesa de la posición del rostro en la imagen de entrada a la escala de la imagen direccional gruesa. Estas coordenadas se indicaron como un par ordenado (i_G, j_G) , en que i_G fue la columna del máximo del acumulador y j_G fue su fila. La relación de estas coordenadas con la imagen de entrada vino dada por la ecuación 2.3:

$$\begin{aligned} i_G^* &= W_G i_G + \left\lfloor \frac{W_G}{2} \right\rfloor \\ j_G^* &= W_G j_G + \left\lfloor \frac{W_G}{2} \right\rfloor \end{aligned} \quad (2.3)$$

en que i_G^* , j_G^* fueron las coordenadas del centro grueso a la escala de la imagen de entrada, W_G fue el factor de escala entre la imagen original y la imagen direccional gruesa, en este caso el factor de escala es de 7 píxeles.

Las coordenadas de la posición del rostro, máximo del acumulador, se utilizaron para la etapa de detección fina del rostro.

2.2 Detección fina

En la detección fina se utilizó una imagen direccional fina la que permitió determinar con mayor precisión la posición, el tamaño, y la inclinación del rostro.

2.2.1 Imagen direccional fina

La imagen direccional fina, I_{DF} , se determinó subdividiendo la imagen de entrada en subimágenes de dimensiones 3x3 píxeles, según la metodología definida por Maio y Maltoni en [9]. A cada uno de los píxeles de esta subimagen se le asoció un vector definido según la ecuación 2.1, a esta región de 3x3 se le asignó el vector que mejor representa la dirección de la variación de los niveles de gris en la subimagen. Considerando las coordenadas para la posición del rostro obtenidas por la detección gruesa, centro grueso, se definió una región de búsqueda del rostro en la imagen, cuyo alto lo determina el doble del semieje mayor de la máxima elipse que se pudo incluir en la imagen de entrada, el ancho de la región viene dado por el doble del semieje menor de la máxima elipse incluida en la imagen.

Las coordenadas para la detección gruesa del rostro (i_G^*, j_G^*) en la escala de la imagen original se transformaron a la escala de la direccional fina según la expresión 2.4:

$$(i_{GE}, j_{GE}) = \frac{(i_G^*, j_G^*)}{W_F}, \quad (2.4)$$

en que (i_{GE}, j_{GE}) fueron las coordenadas de centro grueso en la escala de la direccional fina y W_F fue el factor de escala para la imagen direccional fina, que en este caso fue de 3 píxeles. El tamaño de las imágenes de entrada fue de 320 píxeles de ancho y 240 píxeles de alto, por lo que la elipse de mayor tamaño incluida totalmente en la imagen, fue aquella de semieje mayor de 120 píxeles, a este valor se le llamo b_{max} . Transformando este valor a la escala de la imagen direccional fina se obtuvo,

$$n_v = \frac{b_{max} - \frac{W_F}{2}}{W_F}, \quad (2.5)$$

en que n_v representó la máxima elipse detectable en la vertical, a la escala de la imagen direccional fina, en el caso $b_{max}=120$, se tuvo $n_v=39$. En la escala de la imagen direccional fina en la horizontal el eje menor máximo detectable, a_{max} , depende de la excentricidad de la elipse como se muestra,

$$e = \frac{a}{b} \times 100, \quad (2.6)$$

En que e es la excentricidad de la elipse, a semieje menor y b semieje mayor como se muestra en la Figura A.1 del anexo 1, la excentricidad será un valor entero entre 1 y 100.

En este trabajo se definió una región cuadrada de búsqueda para el rostro en la imagen direccional fina, debido a que los rostros pueden estar rotados en el eje coronal, por lo que no se sabe el área que podía ocupar el objeto elíptico a detectar. La región definida para la búsqueda del rostro en la imagen en torno al centro grueso, se denominó región de interés en la imagen direccional fina, I_{ROI} , se expresó por,

$$I_{ROI} = \left\{ (i, j) \in I_{DF} / |i - i_{GE}| \leq \frac{h_v}{2} \text{ y } |j - j_{GE}| \leq \frac{h_v}{2} \right\}, \quad (2.7)$$

en que $h_v = 2n_v + 1 + 2\delta + 2$, donde δ es una tolerancia definida.

La Figura 2.6 muestra un ejemplo de la determinación de la imagen direccional fina y de la región de búsqueda para la imagen de entrada. La Figura 2.6(b) muestra la imagen direccional de la imagen de entrada en (a), se observa que los elementos son mucho más finos que en la direccional gruesa. En la Figura 2.6(c) se observa que la región de búsqueda del rostro es una región cuadrada de tamaño $b_{\max} \times b_{\max}$. A la Figura 2.6(c) se le ha superpuesto la imagen de entrada a la región de búsqueda.

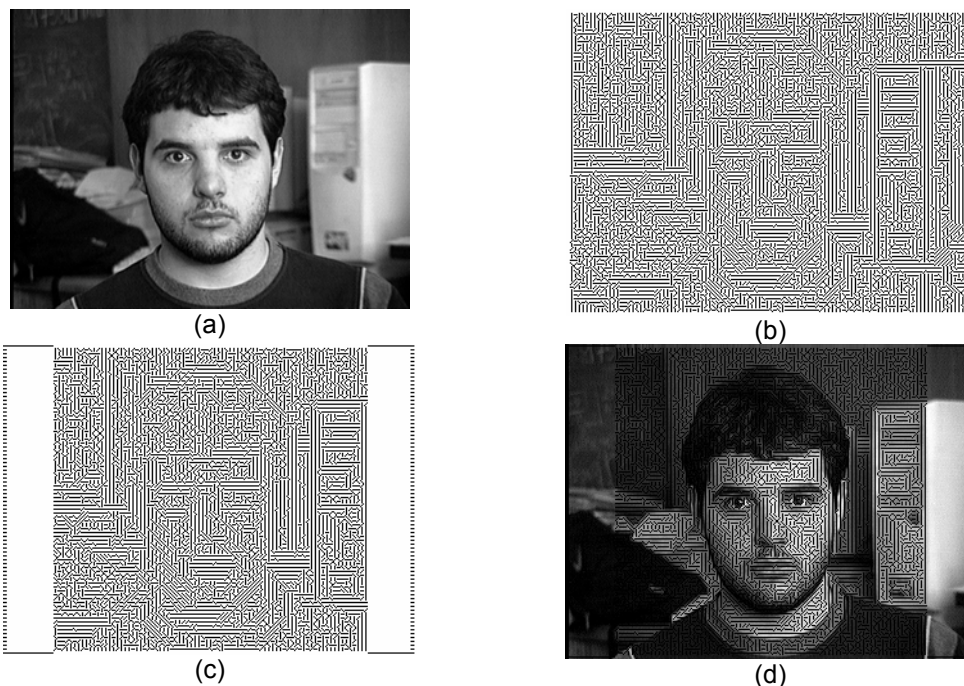


Figura 2.6: Imagen direccional fina para una imagen de entrada. (a) Imagen de entrada. (b) Imagen direccional fina de la imagen de entrada. (c) Región de búsqueda del rostro definida por la máxima imagen elipse contenida en la imagen de entrada. (d) Superposición de imagen de entrada y región de búsqueda del rostro.

2.2.2 Moldes finos

La detección fina de la posición, inclinación y tamaño del rostro se basó en la similitud que tiene un rostro con un conjunto de moldes elipsoidales para cada uno de los tamaños y de las rotaciones consideradas. Se generó un conjunto de moldes para el rostro con diferentes inclinaciones en los tres ejes y para diferentes tamaños. El proceso de creación de moldes se inició con la definición de la cantidad de los tamaños considerados, la cantidad de ángulos coronales, transversales y sagitales.

Tamaños de los moldes

Para el caso del tamaño de los moldes se definió un conjunto de valores enteros que va desde b_{\min} a b_{\max} . En general se considera $b_{\min} = 50$ y $b_{\max} = 150$. Estos valores se transformaron a la

escala de la imagen direccional fina y generaron un conjunto de moldes de tamaños B_r , por lo que el conjunto de tamaños queda definido por,

$$B_r = \{b \mid b_{\min}^* \leq b \leq b_{\max}^*\}, \quad (2.8)$$

en que b_{\min}^* y b_{\max}^* fueron los tamaños máximos y mínimos para el eje mayor a la escala de la imagen direccional fina.

Moldes frontales

Se generaron moldes para rostros frontales en [13] [14], considerando la mitad inferior del rostro como un contorno elíptico. Se realizó un estudio estadístico para determinar las posiciones de características antropométricas del rostro más destacables en imágenes direccionales de imágenes de caras de la base de datos de Purdue, AR [10]. Las características antropométricas más importantes fueron cejas, nariz, boca y trago de la aurícula. Se determinaron posiciones mínimas y máximas en forma porcentual con respecto al tamaño total del rostro para cada imagen de rostro de la base de datos de Purdue. Estas medidas se realizaron tomando como referencia el límite superior izquierdo del rostro como se muestra en la Figura 2.7.

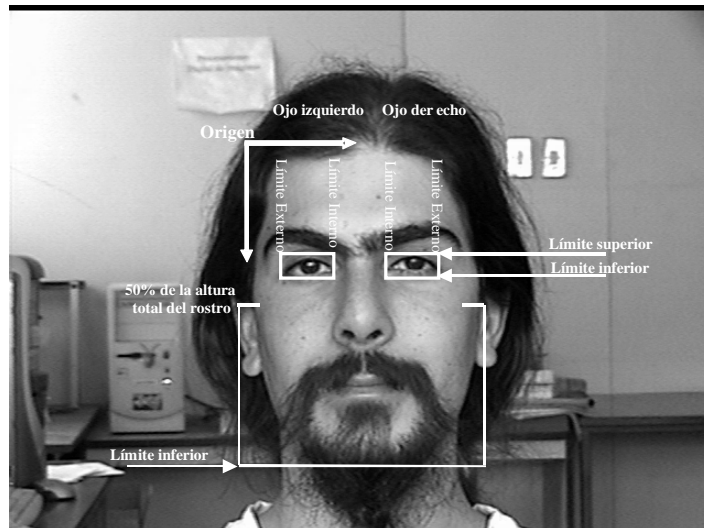


Figura 2.7: Sistema de coordenadas para medición de posiciones de características antropométricas. En la Figura se muestran los límites externo e interno del ojo izquierdo e interno y externo del ojo derecho, además se muestran los límites superior e inferior de los ojos, punto medio del rostro y límite inferior medido desde su límite superior izquierdo.

La Tabla 2.1 muestra los valores obtenidos en [13].

Tabla 2.1: Valores máximos y mínimos de características antropométricas de rostros en base de datos de Purdue(tomados de Palma [13]).

Característica	Media (%)
Límite superior ceja izquierda	26,0
Límite inferior ceja izquierda	32,3
Límite interior ceja izquierda	40,4
Límite externo ceja izquierda	9,2
Límite superior ceja derecha	25,7
Límite inferior ceja derecha	32,2
Límite interior ceja derecha	58,8
Límite externo ceja derecha	91,0
Límite superior nariz	34,5
Límite inferior nariz	61,9
Límite interior nariz	43,1
Límite externo nariz	56,9
Límite superior boca	70,1
Límite inferior boca	80,6
Límite interior boca	30,1
Límite externo boca	70,9

Considerando los valores del estudio estadístico en la base de datos de Purdue en la Tabla 2.1, se generaron un conjunto de moldes antropométricos para el rostro. La Figura 2.6 muestra los moldes frontales generados para el rostro. Los valores de inclinación para las características antropométricas estudiadas fueron: 0° para las cejas y la boca, 90° para la nariz y el trago de la aurícula.

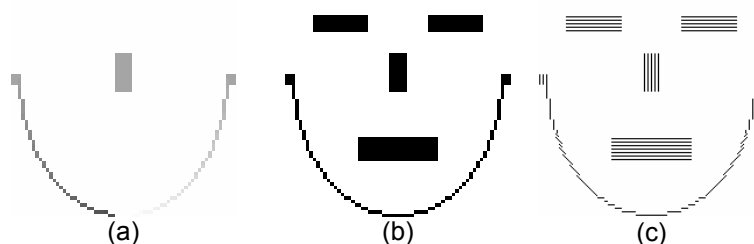


Figura 2.8: Moldes Frontales generador para el rostro, los moldes presentan magnitud y ángulo. (a) ángulo del molde del rostro , (b) módulo del rostro y (c) molde completo.

La Figura 2.8 muestra el molde frontal generado para el rostro. La Figura 2.8(a) muestra el ángulo asignado a cada una de las características antropométricas consideradas. El valor del ángulo se representó en niveles de gris, para 0° se asignó nivel más claro y para 180° el nivel de gris más bajo. Las cejas y la boca presentaron un ángulo de 0°, por lo que aparecen en blanco, la nariz y el trago de la aurícula 90°, para el mentón se construyó un contorno elíptico con diferentes inclinaciones. La Figura 2.8(b) presenta la magnitud en la imagen direccional asignada a cada una de las características antropométricas, en este caso se muestra que todas las características antropométricas presentan la misma magnitud. La Figura 2.8(c) muestra el molde completo considerando magnitud y ángulo para todas las características antropométricas.

Los ángulos del contorno elíptico del molde del rostro se determinaron evaluando los ángulos de los pixeles en un contorno elíptico, con respecto al centro de la elipse para una vecindad de 3 pixeles como se muestra en la Figura 2.9.

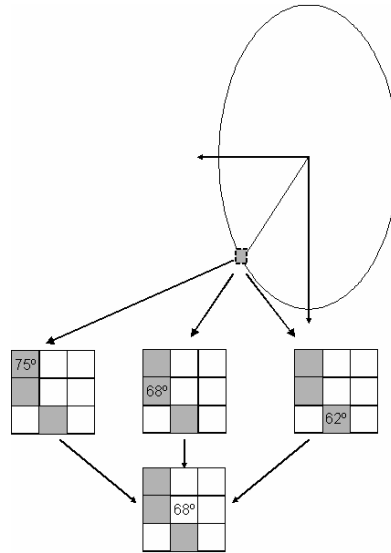


Figura 2.9: Cálculo de ángulo para contorno elíptico. Se muestra el cálculo del ángulo del contorno elíptico en una matriz de 3x3. En cada uno de los puntos en que existe contorno se calcula el ángulo con respecto al centro de la elipse, luego se calcula el promedio de estos ángulos y se asigna al centro de la matriz de 3x3 el ángulo promedio.

Como se muestra en la Figura 2.9, el ángulo asignado a la región de 3x3 es el promedio de los 3 ángulos de los tres píxeles en el contorno elíptico que en la Figura 2.9 se muestran en color gris. El ángulo a la tangente del punto en el contorno elíptico estuvo dado por la ecuación 2.9.

$$\varphi = \tan^{-1}\left(-\frac{b}{a \tan(\theta)}\right), \quad (2.9)$$

en que θ fue el ángulo promedio de los puntos en el contorno.

Moldes coronales

En [5] se construyeron moldes coronales para la detección de rostros que presentan rotación en el eje coronal. Estos moldes se generaron a partir de un molde frontal, el que se rotó en el eje coronal con respecto al centro geométrico del molde. En los moldes coronales se consideraron las mismas características antropométricas del molde frontal. En imágenes direccionales de rostros rotados en el eje coronal se midió el ángulo de inclinación de las características antropométricas consideradas. Se consideró ϕ el ángulo coronal que forma el rostro con la horizontal también fue

ϕ el ángulo de las cejas y la boca, para la nariz y el trago de la aurícula se consideró $90^{\circ} - \phi$.

Las posiciones de las características antropométricas que se estudiaron para el molde frontal en [13] se consideraron válidas para rostros rotados en el eje coronal en [5], debido a que el eje de simetría del rostro gira en el eje coronal con el rostro rotado. Para el contorno elíptico de los moldes del rostro rotados en el eje coronal, se incluyó una corrección del ángulo de los elementos del contorno debido a que éste se construyó rotado en el eje coronal. La expresión para el contorno elíptico se muestra en la ecuación 2.10, la que se deduce en el anexo 1,

$$\varphi = \phi - \tan^{-1}\left(-\frac{b}{a \tan \theta}\right). \quad (2.10)$$

De esta forma se construyeron moldes elípticos para rostros rotados en el eje coronal. Se generaron estos moldes entre $\phi_{\min} = -40^\circ$ y $\phi_{\max} = 40^\circ$ con un paso de 10° , los que para cada inclinación se tiene $b_{\max} - b_{\min}$ moldes por lo que para todos los moldes coronales se tiene $(\phi_{\max} - \phi_{\min}) \times (b_{\max} - b_{\min})$ moldes. La estructura de datos utilizada para el almacenamiento de estos moldes es un arreglo, donde cada elemento de este arreglo tuvo un conjunto moldes que van desde el tamaño mínimo del rostro hasta el tamaño máximo para cada ángulo coronal considerado. La Figura 2.10 muestra los moldes coronales generados para diferentes ángulos de rotación para un tamaño de rostro. Se muestra la magnitud, el ángulo y el molde coronal completo, generados como un ejemplo para -30° , -20° , -10° , 10° , 20° y 30° . La Figura 2.10(a) representa el valor del módulo del molde, en este caso el valor es fijo para todos los puntos. La Figura 2.10(g) muestra el valor del ángulo para cada punto del molde. La inclinación de las cejas es mayor que el de la nariz, por lo que el valor del nivel de gris es más cercano al blanco en las cejas que en la nariz. La Figura 2.10(m) representa el molde coronal completo generado considerando el módulo y el ángulo. Las 3 figuras en cada columna representan la magnitud, el ángulo y el molde completo para los ángulos -30° , -20° , -10° , 10° , 20° , 30° respectivamente.

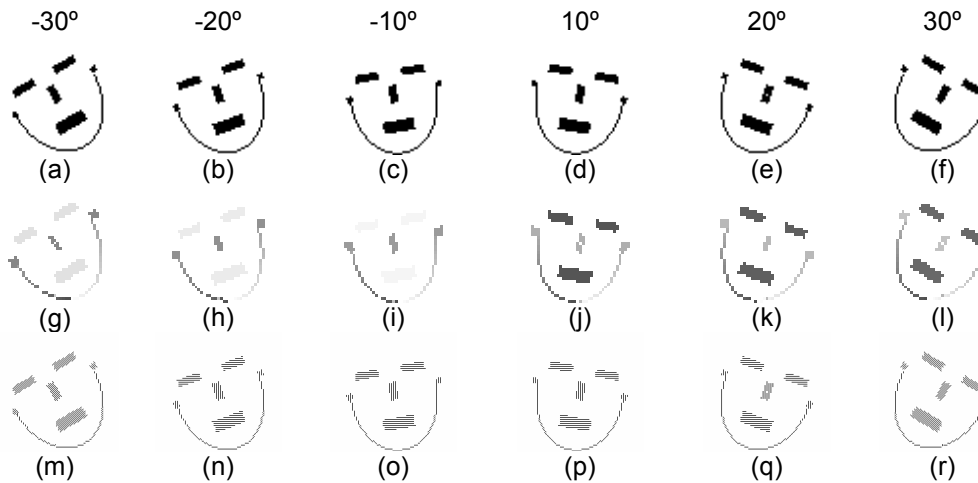


Figura 2.10: Moldes coronales del rostro para diferentes ángulos y un tamaño fijo. Magnitud en (a), (b), (c), (d), (e) y (f). Ángulo en (g), (h), (i), (j), (k) y (l). Molde completo en (m), (n), (o), (p), (q) y (r) para -30° , -20° , -10° , 10° , 20° y 30° .

Moldes transversales

En [13] [14] se realizó seguimiento de rostros frontales, y en [5][15][16][17] seguimiento de rostros rotados en el eje coronal. En este trabajo de Tesis se presenta una extensión de estos trabajos considerando rotaciones en el eje transversal y sus combinaciones con el eje coronal. Para este fin se construyeron moldes del rostro para la rotación transversal, estos moldes se generaron haciendo un estudio en un banco de imágenes de rostros con rotación transversal. La Figura 2.11 muestra ejemplos del banco de imágenes estáticas que se utilizaron para la generación de moldes.

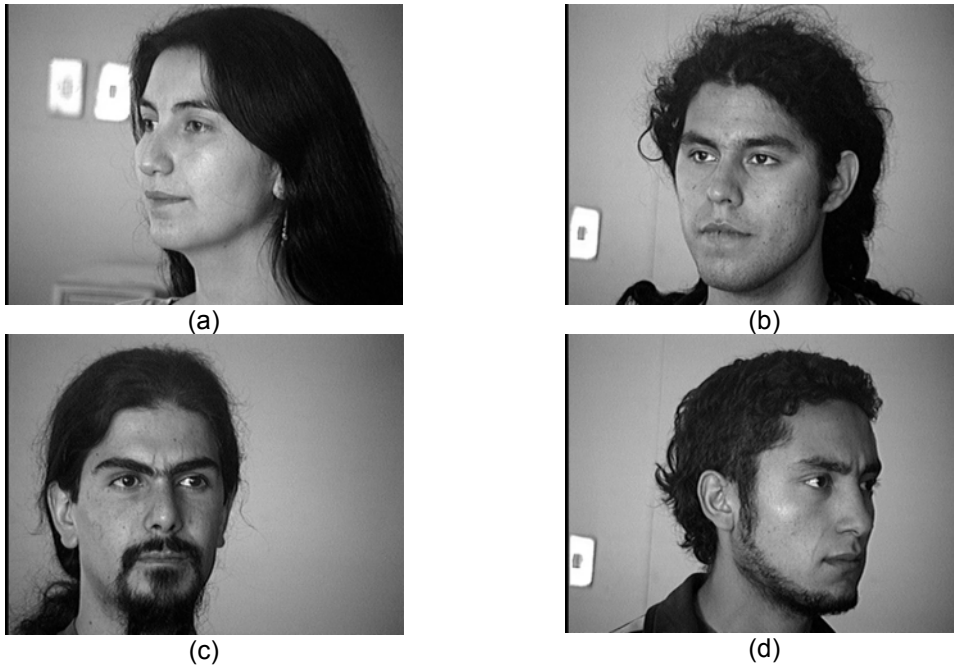


Figura 2.11: Ejemplos del banco de imágenes de rostros rotados en el eje transversal construido. (a) Imagen de rostro rotado en 45° a la izquierda, (b) imagen rostro rotados en 30° a la izquierda, (c) imagen de rostros rotado 15° a la derecha y (d) imagen de rostro rotado 45° a la derecha.

Las imágenes de la Figura 2.10 se utilizaron para medir la evolución de la excentricidad de los rostros, posición y tamaño de las características antropométricas en función del ángulo de rotación transversal.

La Figura 2.12 muestra la forma en que se marcó manualmente cada imagen del banco de imágenes. Se marcó la elipse que contiene al rostro, y las características antropométricas antes definidas: excentricidad del rostro, ceja, boca, nariz. Una vez que se marcaron las características se midió manualmente las posiciones de las características antropométricas tomando como origen el límite superior izquierdo del rostro y se transforman en porcentaje con respecto al alto del rostro y su ancho.

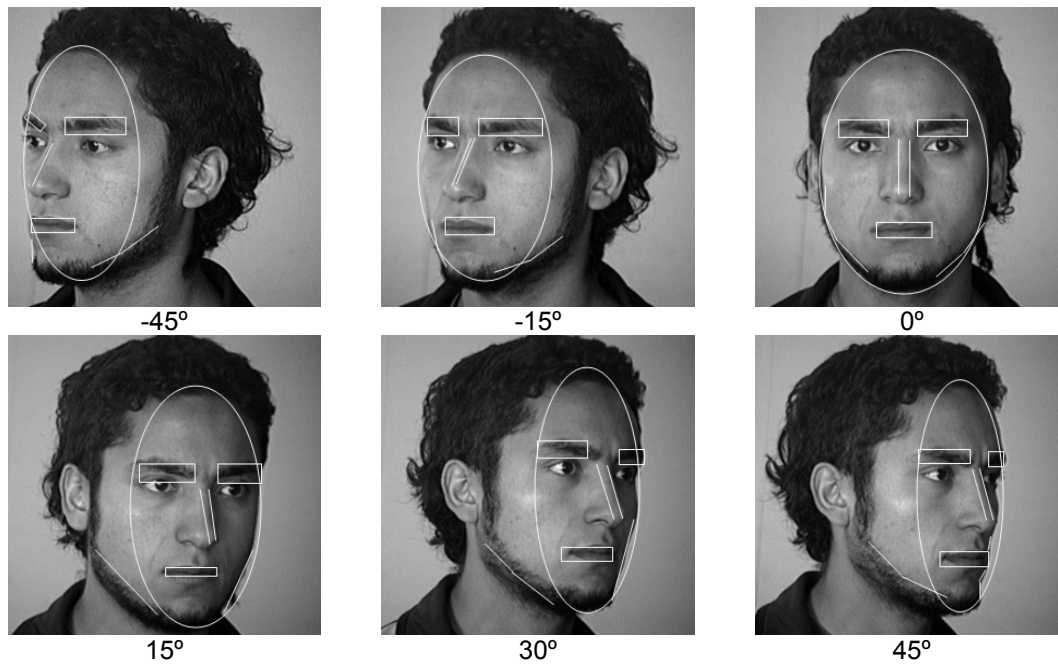


Figura 2.12: Marcado de características antropométricas en un individuo del banco de imágenes. Se marcaron en forma la elipse que contiene al rostro, ceja izquierda, ceja derecha, posición y ángulo de la nariz y boca en cada imagen con rotación transversal.

Al considerar las imágenes para diferentes ángulos de rotación transversal como una secuencia de imágenes se observó que no existen variaciones verticales con respecto a las posiciones de las características antropométricas.

La cantidad de individuos, la cantidad de imágenes por individuo, y la forma de construcción del banco de imágenes se indican más adelante en 2.6.

La evolución de posición de las características antropométricas se graficó en función del ángulo transversal. La Figura 2.13 muestra el límite izquierdo cejas, el límite central de la ceja izquierda, el límite central de la ceja derecha y el límite derecho de las cejas para todos los individuos simultáneamente.

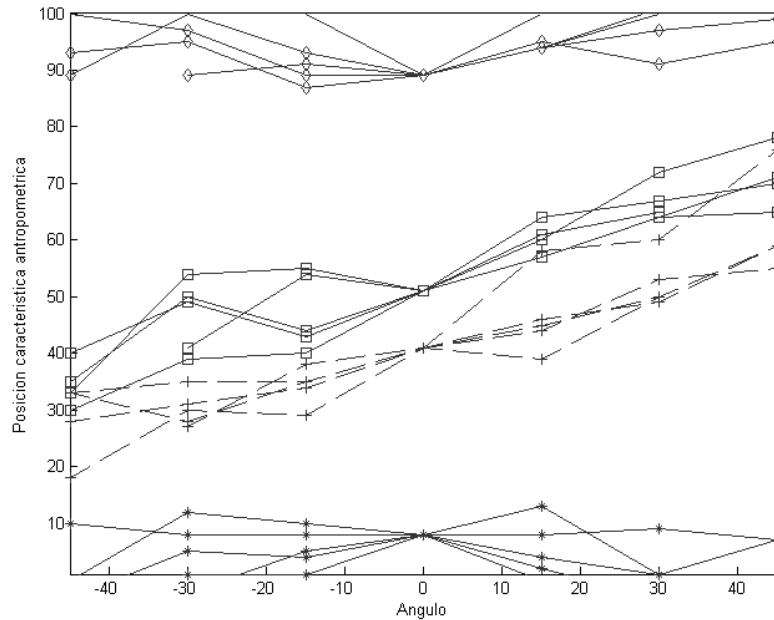


Figura 2.13: Variación de posición de las características antropométricas medidas para la rotación transversal. Con '*' se presenta la posición del límite izquierdo cejas, con '+' el límite central de la ceja izquierda, con '△' el límite central ceja derecha, y con '◇' el límite derecho de la ceja derecha.

En la Figura 2.13 se observa la evolución de las características antropométricas: el límite izquierdo cejas, el límite central de la ceja izquierda, el límite central de la ceja derecha y el límite derecho de las cejas, para todos los individuos del banco de imágenes estáticas. Estos valores se expresaron en porcentaje con respecto al límite superior izquierdo del rostro.

La evolución de las características y de la excentricidad para los rostros se modeló usando funciones de primer y segundo orden para el ángulo de rotación transversal.

La Tabla 2.2 muestra los modelos empíricos encontrados para las características antropométricas frente a la rotación transversal.

Tabla 2.2: Modelos empíricos para la variación de la posición de las características antropométricas en función del ángulo de rotación transversal

Nº de Orden	Característica antropométrica	Modelo	Valor de parámetros
1	Excentricidad	$e' = a \theta + e$	$a = -\frac{5}{9}$
2	Límite izquierdo boca	$\text{lim_izq_bo}' = a\theta + \text{lim_izq_boc}$	$a = \frac{7}{18}$
3	Límite derecho boca	$\text{lim_der_bo}' = a\theta + \text{lim_der_boc}$	$a = \frac{7}{18}$
4	Límite izquierdo cejas	$\text{lim_izq_cej}' = a \text{lim_iz_cej}(- \theta + 45^\circ)$	$a = \frac{1}{45}$
5	Límite izquierdo central cejas	$\text{lim_izq_cent_cej}' = a\theta + \text{lim_izq_cent_cej}$	$a = \frac{7}{18}$
6	Límite derecho central cejas	$\text{lim_der_cent_cej}' = a\theta + \text{lim_der_cent_cej}$	$a = \frac{7}{18}$
7	Límite derecho cejas	$\text{lim_der_cej}' = \text{lim_der_cej} + (a - b \text{lim_der_cej}) \theta $	$a = \frac{20}{9}$ $b = \frac{1}{45}$

En la Tabla 2.2 se indicaron los modelos encontrados para la variación de las posiciones de las características antropométricas en función del ángulo de rotación transversal. Por ejemplo para la variación de la excentricidad se utilizó la función valor absoluto del ángulo de rotación transversal, la que es simétrica con respecto al origen. El valor e es el valor de la excentricidad para el rostro frontal y e' es el nuevo valor de la excentricidad para el ángulo θ de rotación transversal. En esta tabla también se indicaron los valores de los parámetros para cada modelo.

La Figura 2.14 muestra la evolución de la excentricidad del rostro del banco de imágenes.

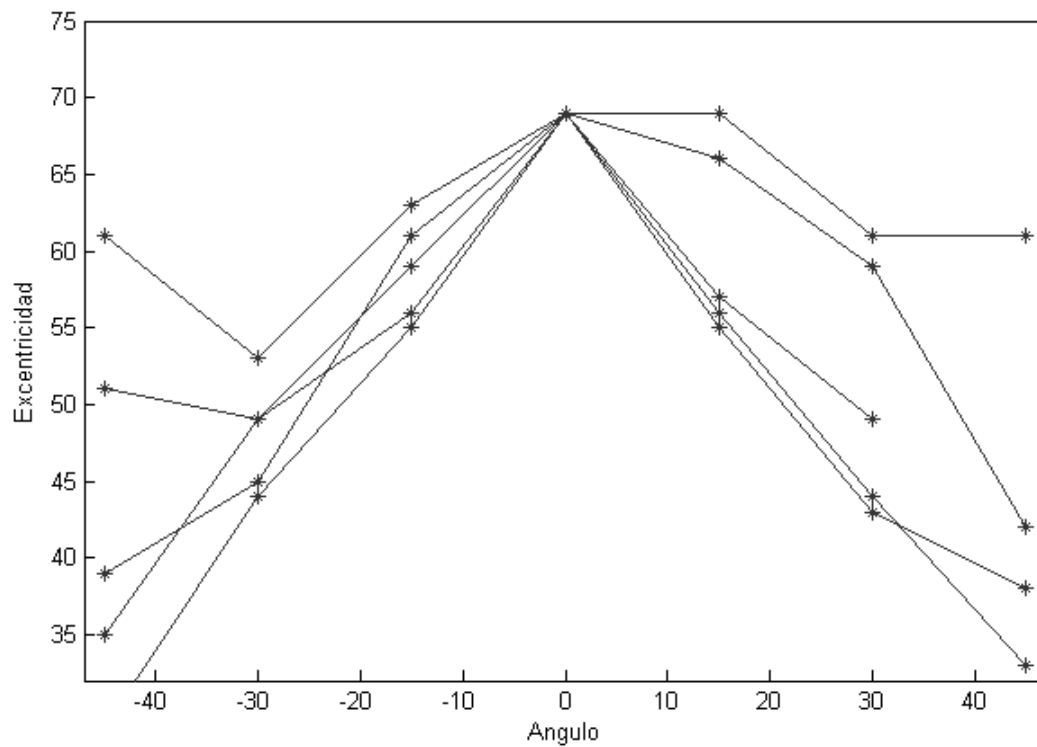


Figura 2.14: Variación de la excentricidad del rostro para 5 individuos del banco de imágenes en función del ángulo transversal. Se observa que la excentricidad es máxima para la imagen frontal y disminuye a medida que aumenta la rotación transversal.

La Figura 2.14 muestra los valores de excentricidad del rostro medido para todos los individuos del banco de imágenes para todos los ángulos de rotación transversal.

La Figura 2.15 muestra un gráfico de la evolución de los modelos encontrados para la posición de las características antropométricas: límite izquierdo de la ceja izquierda, límite central de la ceja izquierda, límite central de la ceja derecha y para el límite derecho de la ceja derecha.

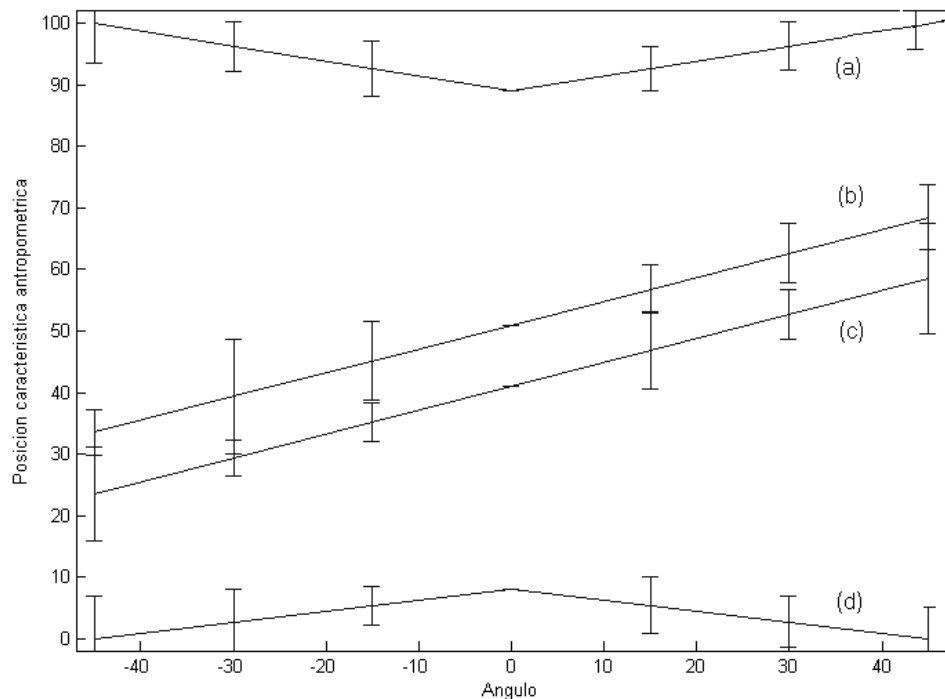


Figura 2.15: Modelo de variación de posición de características antropométricas en función del ángulo de rotación transversal. El orden de las curvas es de arriba a abajo, la curva (a) presenta el modelo y la dispersión de valores con respecto al modelo del límite izquierdo de la ceja izquierda, la curva (b) para el límite central de la ceja izquierda, la curva (c) para el límite central de la ceja derecha y la (d) para el límite derecho de la ceja derecha.

Los moldes transversales generados se muestran en la Figura 2.16.

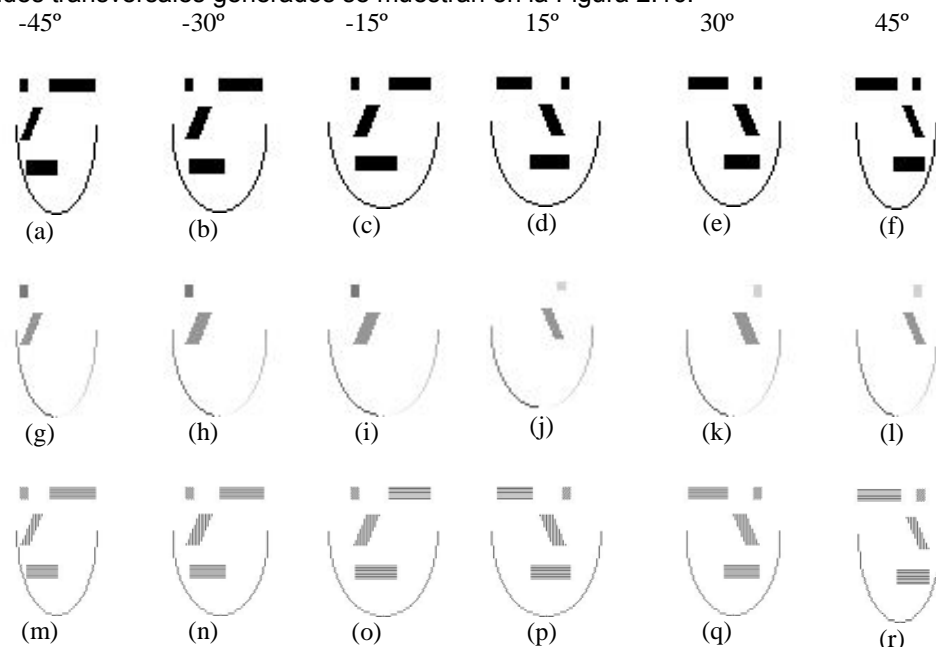


Figura 2.16: Moldes generados para rotación transversal, en cada columna de la figura se muestran el módulo, el ángulo y el molde completo del rostro para ángulo de rotación transversal de -45° a 45° con una paso de 15° .

La Figura 2.16 muestra los moldes transversales generados entre los ángulos -45° y 45° con un paso de 15° . En la Figura 2.16(a) se muestra el módulo asociado a las características antropométricas para un ángulo de rotación transversal de -45° , en este caso el valor del módulo es constante para todos los puntos. La Figura 2.16(g) muestra el ángulo asociado a las características antropométricas para un ángulo de rotación de -45° , los ángulos se representan con diferentes niveles de gris. La Figura 2.16(m) muestra el molde completo. Las Figuras 2.16(b), (c), (d), (e) y (f) muestra los módulos de los moldes para -30° , -15° , 15° , 30° y 45° respectivamente. Las Figuras 2.14 (h), (i), (j), (k) y (l) muestran los ángulos asociados a los moldes de -30° , -15° , 15° , 30° y 45° respectivamente. Las Figuras 2.16(n), (o), (p), (q) y (r) representan los moldes completos para los ángulos -30° , -15° , 15° , 30° y 45° respectivamente.

Moldes sagitales

Se construyeron moldes para la rotación sagital, estos moldes se generaron midiendo la posición de las características antropométricas en función del ángulo de rotación sagital en un banco de secuencias de videos de rostros. La Figura 2.17 muestra ejemplos de imágenes del banco de secuencias de video que se utilizaron para la generación de moldes.

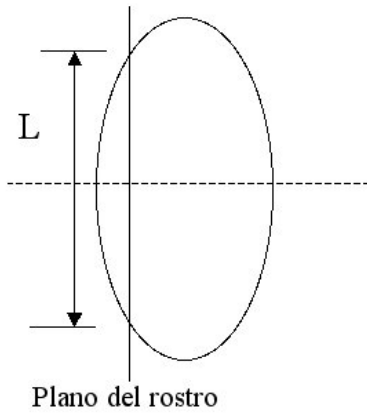


Figura 2.17: Ejemplos de imágenes de secuencias de video para la construcción de los moldes sagitales.

La Figura 2.17 muestra algunas de las imágenes de rostros rotados en el eje sagital que se tomaron para el desarrollo de los moldes, con estas imágenes se estudió la evolución de la excentricidad de los rostros, posición y tamaño de las características antropométricas.

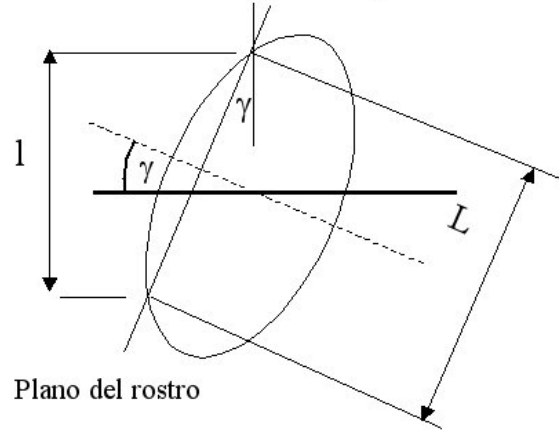
La estimación del ángulo de rotación sagital se realizó suponiendo el rostro frontal como un plano, se midió el tamaño del rostro en píxeles del rostro frontal. Si el rostro se rota en el ángulo sagital su tamaño disminuye en su proyección vertical por lo que se supuso que se generaba un ángulo entre el plano del rostro y el plano de la imagen. La Figura 2.18 muestra una figura esquemática del supuesto utilizado para la estimación del ángulo de rotación sagital.

Rostro de perfil



(a)

Rostro de perfil con rotación sagital en γ



(b)

Figura 2.18: Esquema de cálculo de ángulo de rotación sagital en rostro de perfil. Se muestra el tamaño estimado del rostro L y su proyección vertical para un ángulo de rotación γ . (a) Plano del rostro de tamaño L para vista frontal. (b) Rostro de perfil rotado en el eje sagital en ángulo γ . Se muestra una proyección vertical de tamaño l .

La Figura 2.18(a) muestra el tamaño de un rostro frontal en vista de perfil. El tamaño L se estimó en pixeles. La Figura 2.18(b) muestra el rostro de perfil rotado en un ángulo γ en el eje sagital. La proyección vertical del rostro es de largo l , con estos valores es posible calcular el ángulo de inclinación γ según la expresión 2.11:

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{l}{L}\right) . \quad (2.11)$$

La evolución de las características antropométricas, frente a la rotación sagital, se midió en forma porcentual, con respecto al tamaño total del rostro tomando como inicio el límite superior izquierdo del rostro. La evolución de estos puntos se graficó en función del ángulo transversal. La Figura 2.19 muestra la evolución del límite superior de la ceja izquierda, límite superior de la ceja derecha, límite inferior de la nariz, límite superior de la nariz, límite superior de la boca y límite inferior de la boca.

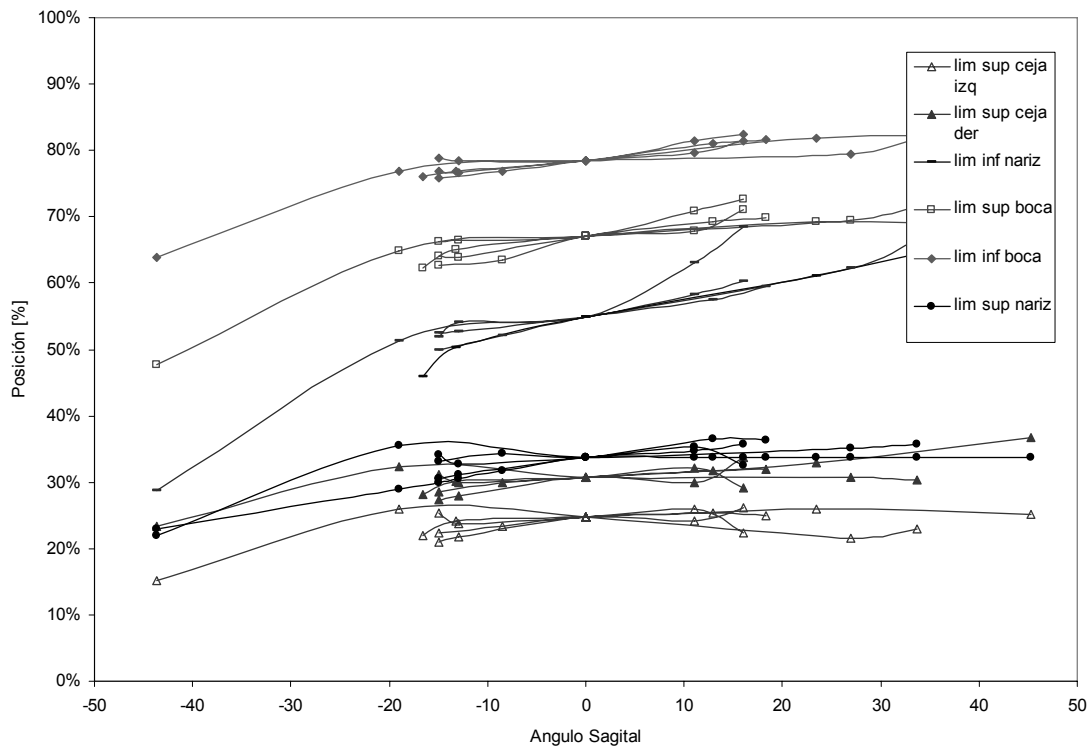


Figura 2.19: Características antropométricas en función del ángulo de la rotación sagital. Se graficaron límite superior ceja izquierda, límite superior ceja derecha, límite inferior nariz, límite superior boca, límite inferior boca y límite superior nariz

La Figura 2.19 muestra la evolución de las características antropométricas en función del ángulo sagital. Se observó que las características límite superior nariz, límite inferior cejas, límite superior cejas, límite superior boca y límite inferior boca, permanecen relativamente constante en el lado derecho del gráfico cuando el ángulo sagital es positivo. Para ángulos sagitales negativos se tiene variaciones en las posiciones de las características. El límite inferior de la nariz varía a su mínima posición en -40° y a su máxima en 40° .

Dada la evolución de las características antropométricas, el ángulo de las características y la excentricidad para los rostros se modelaron usando combinaciones simples de función valor absoluto, el ángulo multiplicado por un escalar y el ángulo al cuadrado multiplicado por un escalar. En el anexo 3 se resumen los modelos encontrados para la variación de las características antropométricas para la rotación sagital.

En la Figura 2.20 se muestra la evolución de los modelos en función del ángulo de rotación sagital. Estos modelos se generaron utilizando los datos de la Figura 2.19. Los valores de los parámetros encontrados y las estructuras de los modelos se muestran en destalle en el anexo 3.

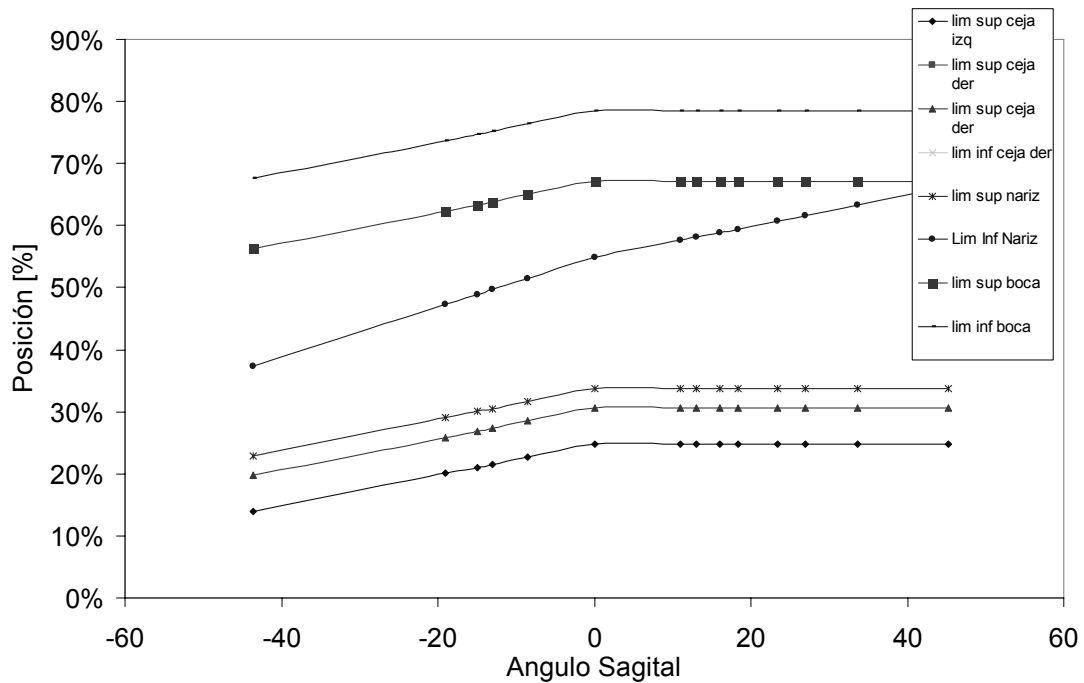


Figura 2.20: Modelo de variación de posición de las características antropométricas en función del ángulo sagital. Se graficaron los modelos para el límite superior cejas izquierda, límite superior ceja derecha, límite superior ceja derecha, límite inferior ceja derecha, límite superior nariz, límite inferior nariz, límite superior boca, límite inferior boca.

La Figura 2.21 muestra la variación de la excentricidad de varios rostros para rotación sagital.

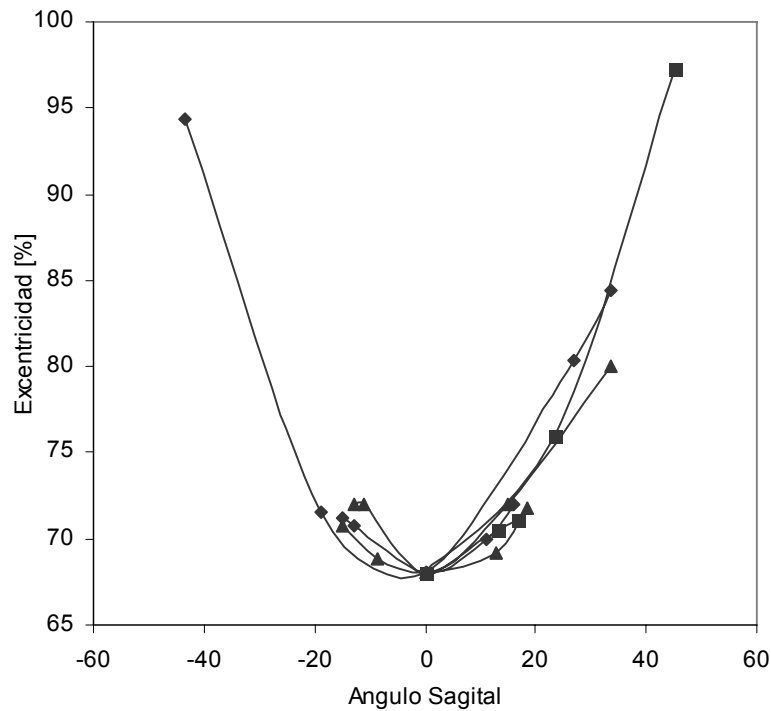


Figura 2.21: Excentricidad para diferentes rostros en función del ángulo de rotación sagital. Se observa que la excentricidad es mínima para el rostro frontal y crece a medida que se aleja el ángulo sagital del valor frontal.

Utilizando los modelos se construyeron moldes antropométricos sagitales para el rostro. Se generaron estos moldes con un paso de 15° entre -45° y 45° .

En la Figura 2.22 se muestran los moldes antropométricos generados. Se definió como ángulo negativo cuando la cabeza rota hacia arriba y positivo con rotación hacia abajo. Se observó que para el ángulo de -45° , Figura 2.22(m), el trago de la aurícula no toca al rostro, se considera el contorno elipsoidal completo, y la nariz desaparece completamente, las cejas se consideraron sólo la porción inicial. Para el molde en -15° , Figura 2.22(o), se asemeja más al molde frontal, las cejas son casi horizontales al igual que la boca, aparece la nariz, el trago de la aurícula toca el contorno elíptico, pero aún se considera el contorno completo de rostro. Para 15° , Figura 2.22(p), no se considera el contorno elíptico completo sólo la parte inferior, las cejas se inclinan, la boca permanece horizontal, y la nariz no se altera. Para 45° , Figura 2.22(r), las cejas se han inclinado bastante siguiendo el comportamiento que se observa en las Figuras 2.15(p) y (q). La evolución de la excentricidad en los moldes sagitales está de acuerdo al modelo que se indica en el anexo 3.

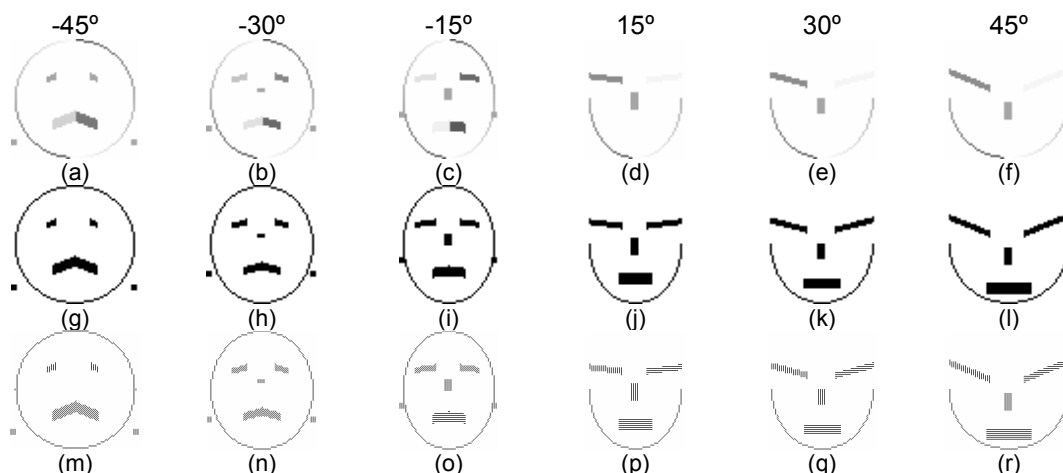


Figura 2.22: Moldes sagitales generados entre -45° y 45° . (a), (b), (c), (d), (e), (f) Ángulo del molde para diferentes inclinaciones en el eje sagital. (g), (h), (i), (j), (k), (l) Modulo de molde sagital, que presenta un valor constante 1 para todos los puntos del molde. (m), (n), (o), (p), (q), (r) Molde completo para rotacion sagital.

Moldes coronal-transversal

Estos moldes fueron una combinación de los moldes coroneales y los transversales. Al combinar los moldes coroneales y los transversales se conservaron variaciones de las características antropométricas de ambos moldes.

La Tablas 2.2 y 2.3 muestran las características antropométricas que se conservaron y sus combinaciones.

Tabla 2.2: Características antropométricas que se combinaron entre moldes coroneales y transversales para rotación transversal a la izquierda.

Características	Tamaño	Ángulo
Ceja izquierda	Según molde Transversal	Coronal + Transversal
Ceja derecha	Según molde coronal	Coronal
Nariz	Según molde Transversal	Coronal + Transversal
Boca	Según molde Transversal	Coronal
Excentricidad	Según molde Transversal	

Tabla 2.3: Características antropométricas que se combinaron entre moldes coroneales y transversales para rotación transversal a la derecha.

Características	Tamaño	Ángulo
Ceja izquierda	Según molde coronal	Coronal
Ceja derecha	Según molde Transversal	Coronal + Transversal
Nariz	Según molde Transversal	Coronal + Transversal
Boca	Según molde Transversal	Coronal
Excentricidad	Según molde Transversal	

La Tabla 2.2 muestra las características antropométricas que se combinaron para la rotación transversal a la izquierda y la Tabla 2.3 muestra la combinación con rotación transversal a la derecha.

La Figura 2.23 muestra los moldes finales generados para rotación coronal y transversal, se generó en el eje coronal entre -30° y 30° con un paso de 10° , en el transversal se generó entre -45° y 45° con paso de 15° .

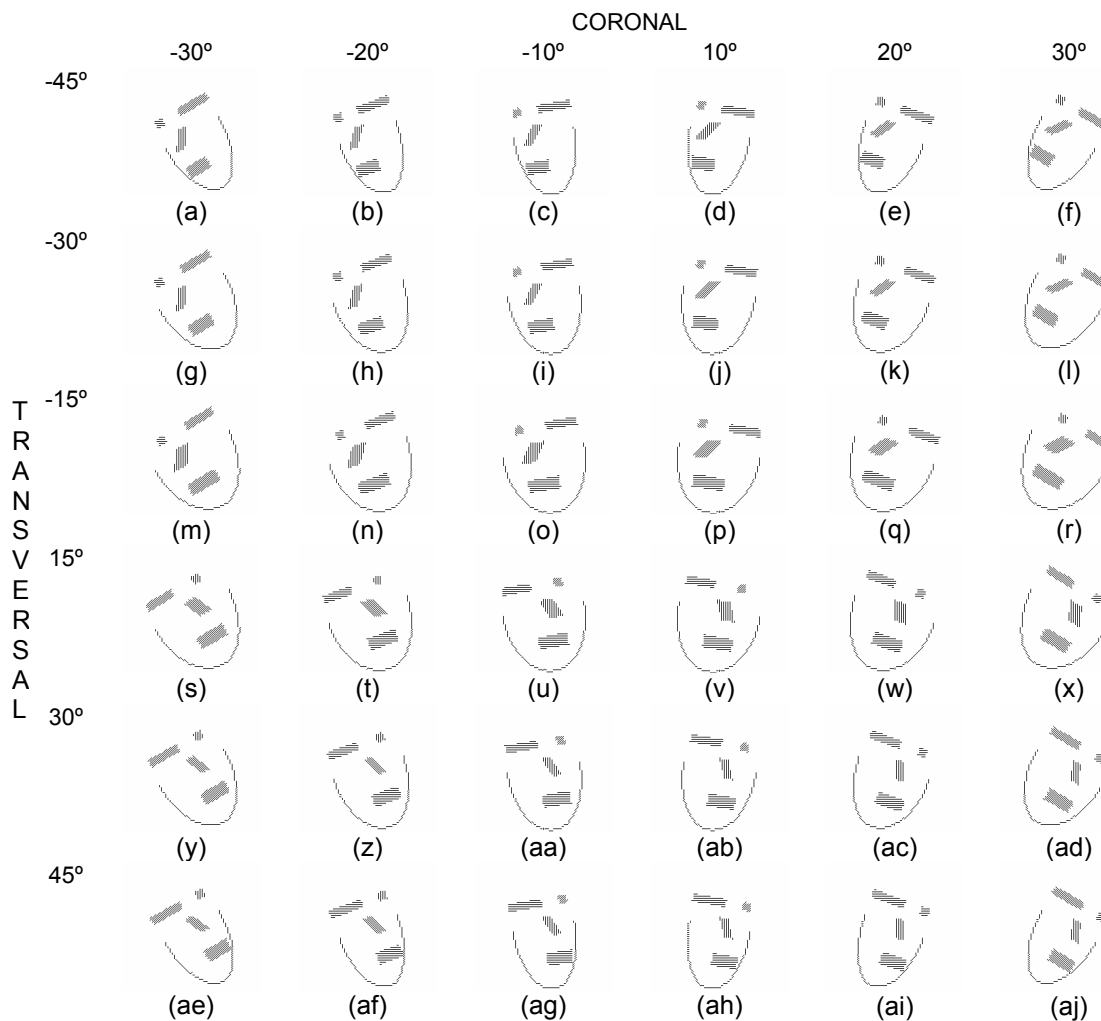


Figura 2.23: Moldes coronales transversales para rotación coronal -30° a 30° y transversal -45° y 45° con paso de 10° y 15° respectivamente.

La Figura 2.23 muestra los moldes coronales transversales generados para ángulos de rotación coronales de -30° a 30° con paso de 10° y transversal de -45° a 45° con paso de 15° , por lo que se generan $6 \times 6 = 36$ moldes. Se observa en la Figura 2.20 que las características de los moldes transversales se rotaron en el ángulo coronal, combinando los ángulos de las cejas, bocas y nariz según la variación coronal y transversal. Las Figura 2.20(a), (b), (c), (d), (e) y (f) presentan un molde transversal para 45° rotados en -30° , -20° , -10° , 10° , 20° y 30° respectivamente.

Moldes coronal-sagital

Los moldes coronales-sagitales se generaron para la rotación en estos dos ejes. Estos moldes fueron una combinación de los moldes coronales y los sagitales. Al combinar los moldes coronales

y los sagitales se conservaron variaciones de las características antropométricas de ambos moldes.

La Figura 2.24 muestra los moldes coroneles-sagitales generados. Se generaron para ángulos coroneles entre -30° y 30° con paso de 10° y para sagitales entre -30° y 30° con paso de 30° . Se observa en la Figura 2.24 que los moldes conservan las propiedades y características de los moldes sagitales pero rotados en el ángulo coronal. Los ángulos de las características antropométricas vinieron dados por la rotación coronal.

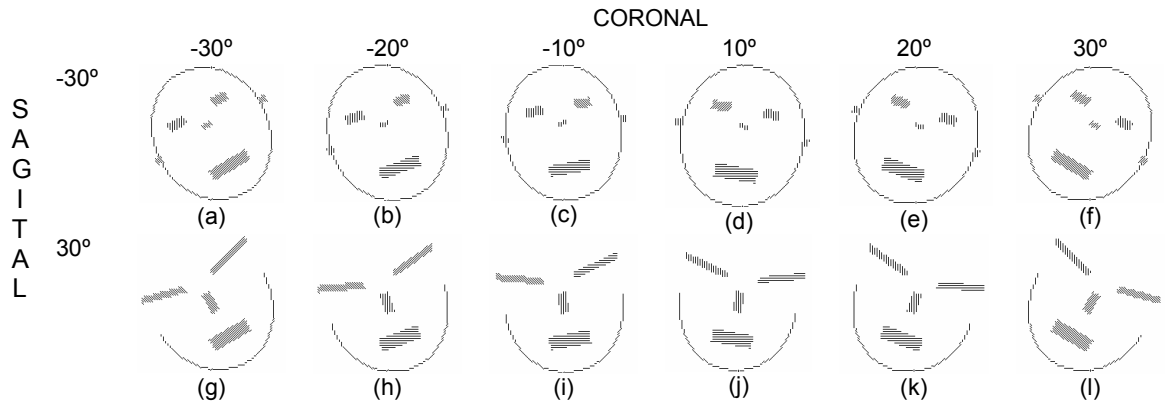


Figura 2.24: Moldes completos coroneles-sagitales. Generados para -30° y 30° sagitales y para -30° a 30° con un paso de 10° en el eje coronal.

Moldes transversal-sagital

Al igual que los moldes coroneles sagitales se generaron moldes transversales sagitales. Estos moldes conservan algunas características de los moldes transversales y de los sagitales.

La Figura 2.25 muestra los moldes transversales-sagitales generados. Los moldes se generaron para el ángulo transversal entre -30° y 30° con un paso de 10° y para el ángulo sagital entre -40° y 40° con un paso de 40° . En la Figura 2.25(g), (h), (i), (j), (k) y (l) se observa que los moldes generados no consideran la parte superior del contorno elíptico debido a la componente transversal. La longitud de la nariz depende del ángulo sagital, las Figuras 2.25(a), (b), (c), (d), (e) y (f) presentan una nariz más corta que los moldes con rotación sagital positiva. La excentricidad de los moldes es una combinación lineal de la variación de la excentricidad en cada eje.

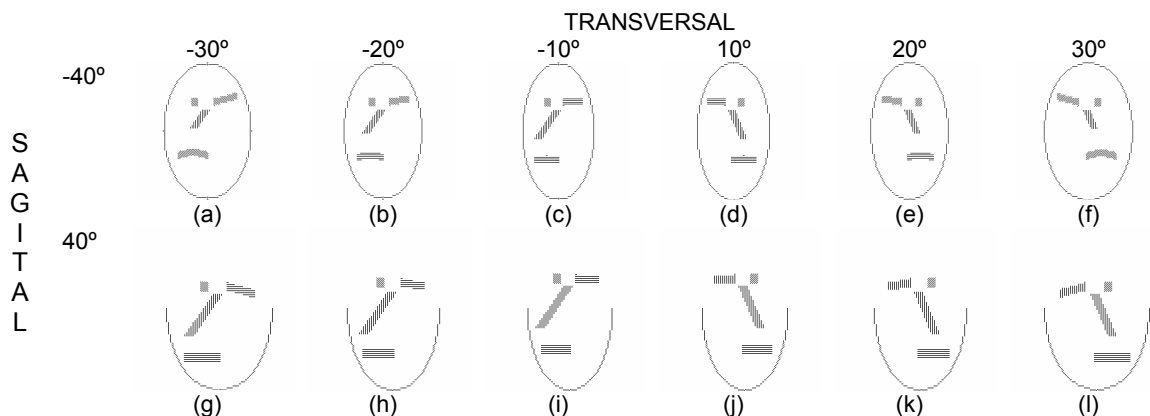


Figura 2.25: Moldes completos transversales-sagitales generados para -40° y 40° en el eje sagital y -30° y 30° con un paso de 10° en eje transversal.

Moldes coronal-transversal-sagital

Se generaron moldes coronales-transversales-sagiales utilizando la misma metodología anterior. Se combinaron linealmente las excentricidades, se determinó que característica eran más relevantes para conservarlas en los moldes para distintos ángulos de rotación. Se generaron estos moldes para dos ángulos de rotación sagital -40° y 40° . En la Figura 2.23 se muestran los moldes coronales-transversales-sagiales generados para un ángulo sagital de -40° y la Figura 2.26 muestra los moldes coronales-transversales-sagiales generados para un ángulo sagital de 40° .

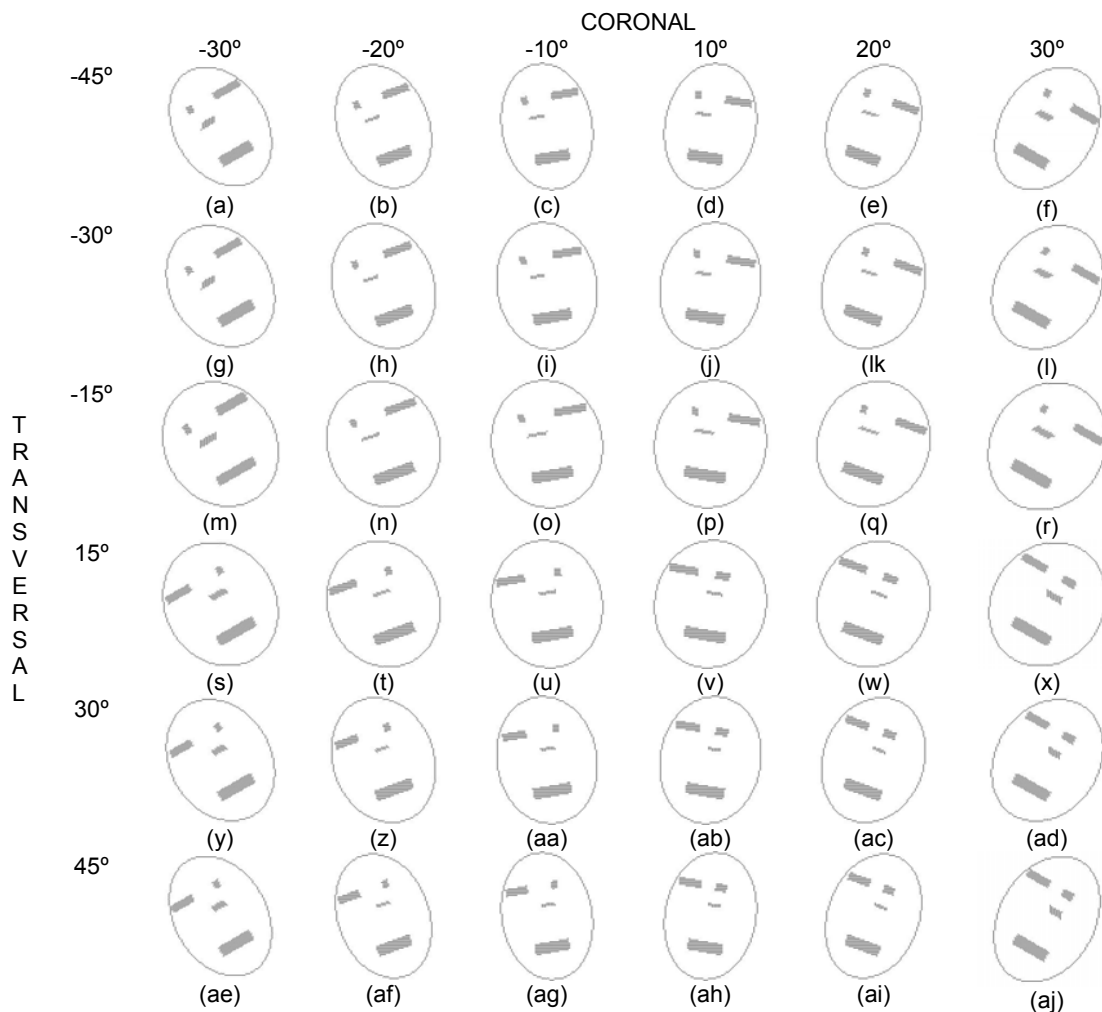


Figura 2.26: Moldes finos completos creados para la rotación coronal-transversal-sagital. Ángulo sagital fijo en 40° , coronal varía de -30° a 30° con paso de 10° y transversal varía de -45° a 45° con paso de 15° .

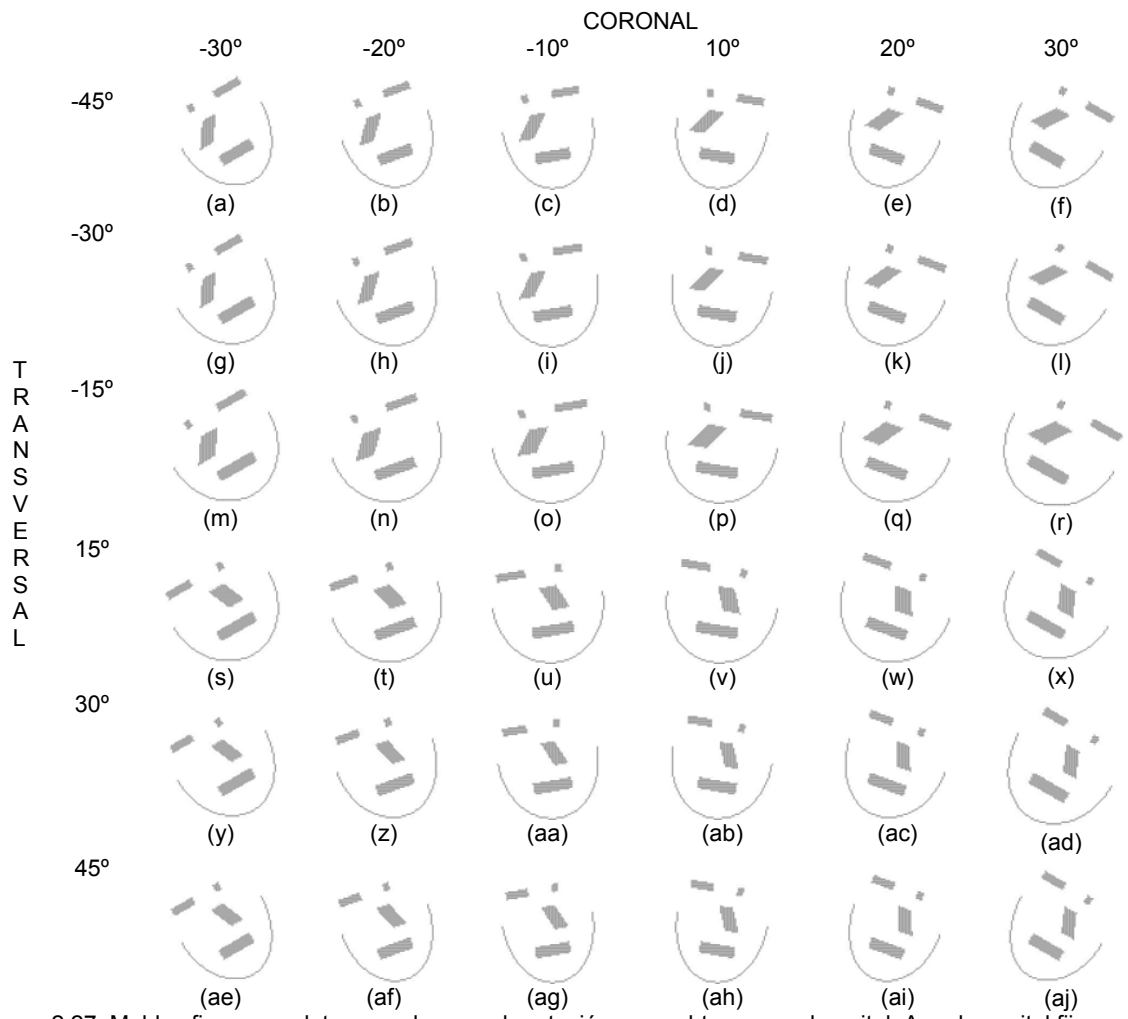


Figura 2.27: Moldes finos completos creados para la rotación coronal-transversal-sagital. Angulo sagital fijo en -40° , coronal varía de -30° a 30° con paso de 10° y transversal varía de -45° a 45° con paso de 15° .

2.3.3 Integral de línea

La etapa de detección fina se llevó a cabo en una región reducida de la imagen en torno al centro grueso detectado. En esta región se compararon los moldes finos del rostro con la imagen direccional de la imagen de entrada. La comparación se realizó a través de una integral de línea que consideró las diferencias angulares punto a punto entre la imagen direccional fina de la imagen de entrada y el molde antropométrico del rostro. La Figura 2.25 muestra un esquema de la región en que se evalúan las integrales de línea. El punto central en las coordenadas (i_G^*, j_G^*) , es el punto dado por la etapa de detección gruesa, transformado a la escala de la direccional fina. En torno a este punto se define una vecindad de tamaño W en este caso de tamaño 9. Debido a que la detección gruesa se realizó a otra resolución existe una incerteza con respecto a la posición del rostro, por esto se define una zona de búsqueda de tamaño W .

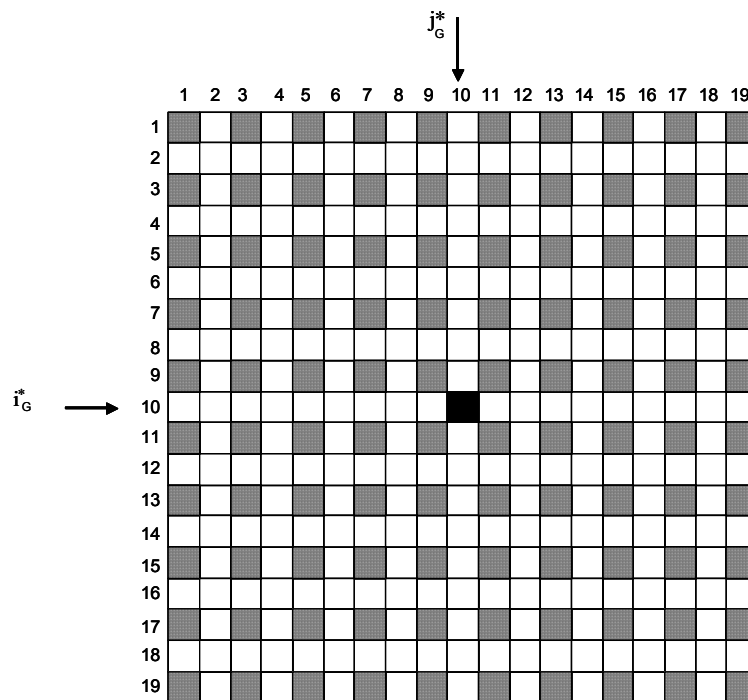


Figura 2.28: Zona de evaluación de detección fina.

En esta región se realizó la detección fina en los puntos que se muestran en gris en la Figura 2.28. Se evaluó en 100 puntos, en torno al centro grueso, en vez de los 361. Esta simplificación se realizó para disminuir la cantidad de puntos en que se evaluó la integral de línea. En cada uno de estos puntos se centraron los moldes del rostro y se calculó una integral de línea, que comparó los moldes antropométricos y la región de interés en la imagen direccional, I_{ROI} .

La integral de línea se determinó según la expresión 2.11,

$$I_{T_{FR\Phi TH}}(i_o, j_o) = \frac{\sum_{i,j \in T_{FR\Phi TH}(i_o, j_o)} [I_{ROI}(i, j) \cdot a(i, j) - (1 - I_{ROI}(i, j)) \cdot 90]}{N_{T_{FR\Phi TH}}}, \quad (2.11)$$

$T_{FR\Phi\Gamma H}(i_0, j_0)$ fue el molde del rostro de tamaño R . Φ correspondió al conjunto de todos los posibles valores para el ángulo coronal, Γ fue el conjunto de todos los posibles valores para el ángulo de rotación transversal, H fue el conjunto de valores posibles para el ángulo sagital, $N_{T_{FR\Phi\Gamma H}}$ fue el número de pixeles que pertenecen al molde. La integral de línea 2.11 se evaluó para el conjunto posible de ángulos centrado en (i_0, j_0) , y $a(i, j)$ vino dado por la expresión 2.12,

$$a(i, j) = 90 - 2 \min\left(\left|AT(i, j) - AI_R(i, j)\right|, 180 - \left|AT(i, j) - AI_R(i, j)\right|\right), \quad (2.12)$$

y $AT(i, j)$ fue el ángulo asociado al punto (i, j) en el molde $T_{FR\Phi\Gamma H}$ y $AI_R(i, j)$ fue el ángulo asociado al punto (i, j) en la región de interés I_{ROI} . La división por la cantidad de puntos del molde $N_{T_{FR\Phi\Gamma H}}$ permitió la normalización de los resultados relativos al tamaño de los moldes. El factor $a(i, j)$ definido en la expresión 2.12 tomó en consideración la disparidad existente entre el ángulo del molde $T_{FR\Phi\Gamma H}$ y la región de interés I_{ROI} . Para una gran disparidad entre los ángulos, el valor de la integral de línea debe ser pequeña, por lo tanto, la posibilidad de elección del molde $T_{FR\Phi\Gamma H}$ como el que tiene mejor ajuste con la imagen direccional en I_{ROI} disminuye. La disparidad angular se calculó como el mínimo entre $\left|AT(i, j) - AI_R(i, j)\right|$ y $180 - \left|AT(i, j) - AI_R(i, j)\right|$. De esta forma se determinó efectivamente su disparidad. La integral de línea que se definió en la expresión 2.11 se calculó usando el molde $T_{FR\Phi\Gamma H}$ centrado en todos los puntos que pertenecen a una vecindad cuadrada de tamaño $W \times W$ alrededor del centro grueso detectado en la etapa anterior. Este cálculo permitió encontrar la posición del molde que se ajustó mejor alrededor del centro grueso. Las coordenadas del molde que maximizaron $I_{T_{FR\Phi\Gamma H}}$ se consideraron como la posición del centro del rostro, y su eje mayor vertical definió el tamaño del rostro.

2.3 Detección de iris

La posición del ojo con respecto al rostro fue medida en la base de datos de rostros AR [10], para determinar la región de búsqueda. Se determinaron 4 límites para la posición de los ojos. Los 4 límites definidos para el ojo fueron: límite superior, límite inferior, límite externo y límite interno para cada ojo.

La Figura 2.29 muestra los límites definidos para la posición de la región de búsqueda de los ojos en un rostro frontal.

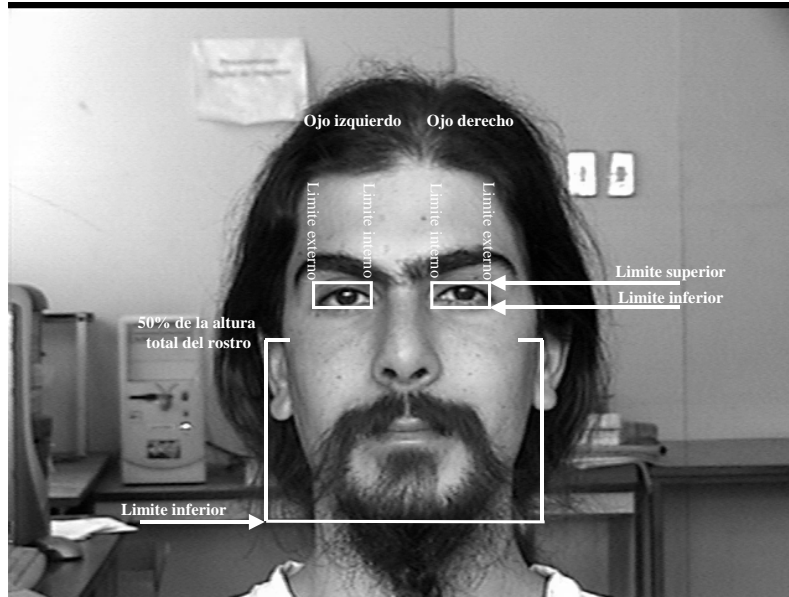


Figura 2.29 Región de búsqueda de los ojos en un rostro frontal. Se indican el límite superior, límite inferior, límite externo y límite interno para cada ojo.

La región delimitada por estas medidas se le llama $I_{er}(i, j)$ que fue la región de búsqueda del ojo. Una vez que se realizó la etapa de detección fina, $I_{er}(i, j)$ queda determinada en forma inmediata. Las regiones de búsqueda del ojo se rotaron, estiraron, contrajeron o desplazaron dependiendo del ángulo de inclinación. Las coordenadas de las regiones de búsqueda se generaron fuera de línea para luego ser utilizadas.

Una vez que $I_{er}(i, j)$ se determinó la posición del iris, a esta región se elimina el brillo de reflexión en la pupila. En la región de búsqueda de la imagen se aplicó un filtro mediano en una ventana de 7×7 para eliminar la reflexión.

La expresión 2.13 indica como se definió del filtro mediano,

$$I_{erm}(i, j) = \min[I_{er}(i-k, j-l)] \quad k, l \in [-3, 3], \quad (2.13)$$

en que $I_{erm}(i, j)$ son los píxeles $I_{er}(i, j)$ procesado por el filtro mediano.

Aunque el iris presenta una forma circular en caras frontales, este es ocluido por los párpados. La intersección de la forma circular del iris con la frontera externa de los párpados crea ángulos α y β con respecto a la horizontal [21]. Estos ángulos disminuyen hasta 0° en el pestañeo.

La Figura 2.30 muestra los ángulos α y β entre el iris y la esclera creados por la oclusión de los párpados.

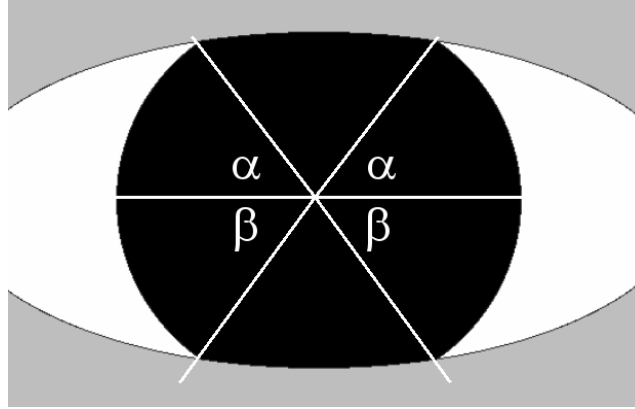


Figura 2.30: Oclusión de la esclera por el papado y ángulos de apertura α y β .

Se crearon moldes semicirculares, $T_{IR\Phi}$, los que representaron la abertura entre el iris y la esclera. Se midieron los ángulos α y β en rostros frontales, de la base de datos de AR [10], obteniéndose que los valores promedios fueron 50° y 70° para α y β respectivamente. Se consideró la corrección por el ángulo ϕ para los ángulos α y β en el caso de la rotación coronal. La Figura 2.31 muestra un esquema de la corrección de los ángulos de apertura del iris y la esclera.

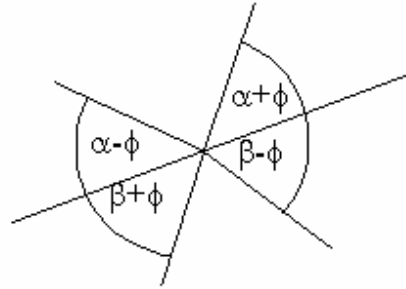


Figura 2.31: Corrección de ángulos de apertura del iris en el ángulo de rotación ϕ .

El algoritmo para la detección del iris utilizó el hecho que existe alto contraste entre el iris y la esclera y que el iris es aproximadamente circular [3] [13] [14]. Se calculó una razón entre dos integrales de línea sobre $T_{IR\Phi}$: una se calculó al interior del iris y la otra afuera. La versión discreta de la razón entre ambas integrales fue,

$$R_{LI\Phi\Gamma H}(i_o, j_o) = \frac{\sum_{i,j \in T_{I(R+\delta)\Phi\Gamma H}(i_o, j_o)} I_T(i, j)}{\frac{N_{T_{I R + \delta\Phi\Gamma H}}}{\sum_{i,j \in T_{IR\Phi\Gamma H}(i_o, j_o)} I_T(i, j)}}, \quad (2.13)$$

en que $I_T(i, j)$ fueron los pixeles a lo largo del molde $T_{IR\Phi\Gamma H}$, $N_{T_{I R + \delta\Phi\Gamma H}}$ fue el número de puntos que pertenecen al molde $T_{IR\Phi\Gamma H}$ asociados al radio $R_{LI\Phi\Gamma H}$ con δ fijado en 2 pixeles. $R_{LI\Phi\Gamma H}$ se calculó, centrando los puntos al interior de $I_{er}(i, j)$ y fue máximo cuando la integral de línea del denominador se calculó al interior del iris y la integral de línea del numerador estuvo afuera. Este

punto se designa como el centro del iris y $2(R_{L\phi_{GH}} + \delta - 1)$ es su diámetro. El tamaño del iris depende de la apertura del párpado. Para el caso de rostros rotados en el eje coronal se consideró, en la misma región de búsqueda, moldes semicirculares rotados en ángulo ϕ evaluados en cada punto de la zona $I_{er}(i, j)$.

2.4 Seguimiento de rostros e iris en secuencias de video

El método propuesto se aplica al seguimiento del iris en tiempo real en secuencias de video. Con este fin se realizaron simplificaciones al algoritmo, considerando el hecho que el mismo sujeto está presente en todas las imágenes y la posición del rostro, inclinación y tamaño de una a otra imagen no cambia significativamente. Después de procesar la primera imagen, el algoritmo de seguimiento de video asume la posición del rostro la determinada en la detección fina de la imagen anterior, como la detección gruesa para la imagen que se va a analizar. Por lo tanto no se necesitó realizar la detección gruesa de la posición del rostro después de la primera imagen. Si no existía pérdida de seguimiento el algoritmo se mantuvo en este modo de operación. Si existía pérdida de seguimiento el algoritmo desarrolló la etapa de detección gruesa para la búsqueda del rostro. La Figura 2.32 muestra un esquema de la operación de la detección en secuencias de video y la simplificación realizada.

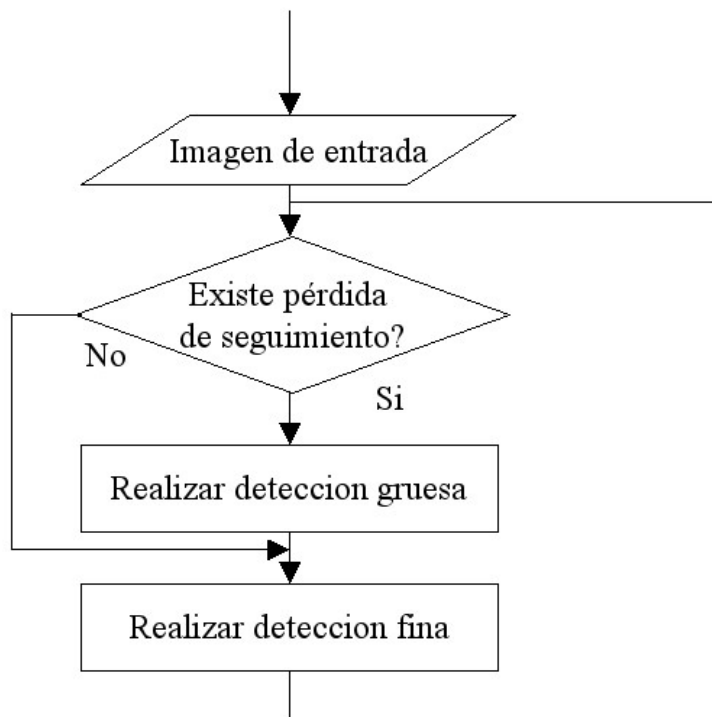


Figura 2.32: Diagrama en bloques para seguimiento de rostros en secuencias de video. Con la nueva imagen de entrada se pregunta si existe pérdida de seguimiento, si la respuesta es si se calcula la transformada de Hough y se determina la posición gruesa del rostro, esta posición entra a la etapa de detección fina y en torno a esta posición se mejora la estimación de la posición del rostro y se determina la inclinación. En caso de no existir pérdida de seguimiento se evita la etapa de detección gruesa y se asumen las coordenadas gruesas del rostro como las determinadas en la detección fina anterior.

Por otro lado, ya que el tamaño del rostro y la inclinación no cambió significativamente de una imagen a otra, se utilizó sólo cinco valores del semieje del rostro, R_f , considerando el tamaño en pixeles, $R_f - 4 \leq R_f \leq R_f + 4$, en torno al tamaño previamente detectado con un paso de 2 pixeles. Se consideraron los ángulos $\phi - 15 \leq \phi \leq \phi + 15, \gamma - 20 \leq \gamma \leq \gamma + 20, \eta - 20 \leq \eta \leq \eta + 20$, en que (ϕ, γ, η) fueron los el ángulo de inclinación determinado en la etapa de detección anterior. Para cada imagen se evaluó 27 conjuntos de moldes inclinados en los ángulos especificados y 5 tamaños distintos, en una vecindad de tamaño 15 en torno al centro grueso. En total se realizan $5 \times 27 \times 7 \times 7 = 6615$ evaluaciones de moldes por imagen. Para la obtención del ángulo estimado del rostro se filtró la salida del filtro mediano de tamaño 5, sólo para graficar los ángulos estimados en secuencias de video con rotaciones en 3D.

2.5 Base de datos

Imágenes estáticas

Se construyó un banco de imágenes estáticas de personas que tienen sus rostros rotados en el eje transversal en ángulos específico. Para lograr esto se dibujó en el piso una semicircunferencia con marcas en el rango definido de -45° a 45° en el eje transversal. Las marcas se pusieron con un paso de 15° , como se muestra en la Figura 2.33. La persona se instaló en el centro del círculo y se le hizo mirar en la dirección de una de las marcas. Una cámara instalada en el ángulo 0° capturó la imagen de la persona.

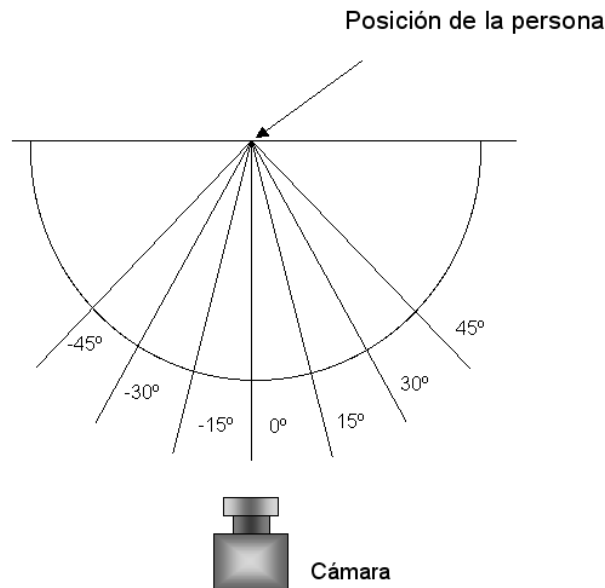


Figura 2.33: Montaje para toma de imágenes de rostros con rotación transversal.

La Figura 2.34 muestra una secuencia de imágenes estáticas de un individuo que rota su rostro en el eje transversal. Las Figuras 2.34(a), (b), (c), (d), (e) y (f) muestran un rostro rotado en $-45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ y 45° respectivamente. Se consideraron 5 individuos, a cada uno se le tomaron series de imágenes estáticas con estas rotaciones en el ángulo transversal.

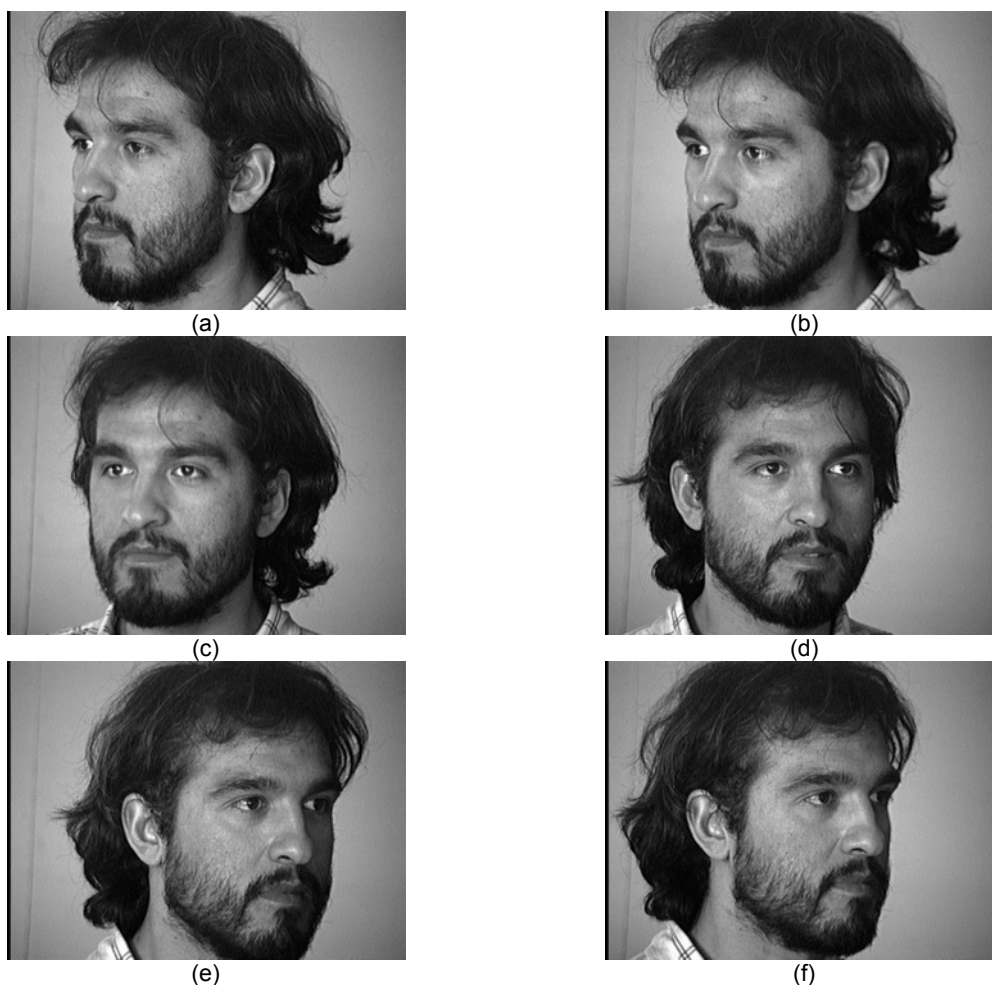


Figura 2.34: Imágenes estáticas generadas con rotación transversal en ángulos determinados: (a) -45° , (b) -30° , (c) -15° , (d) 15° , (e) 30° , (f) 45° .

Secuencia de video

Se construyó 2 conjuntos de secuencias de video. El primero para la rotación en los ejes transversal-coronal y el segundo para la rotación en el eje sagital. También se construyeron 4 secuencia de video con rotación 3D. La Tabla 2.4 muestra la cantidad de imágenes por cada secuencia de video de rotaciones para los ejes coronal transversal, sagital y en los tres ejes.

Tabla 2.4: Cantidad de imágenes por secuencia de video con rotación coronal transversal, sagital y 3D.

Nº	Cantidad de imágenes en secuencia con rotación coronal-transversal	Cantidad de imágenes en secuencia con rotación sagital	Cantidad de imágenes en secuencia con rotación 3D
1	560	217	204
2	598	186	300
3	306	291	300
4	215	279	300
Total	1679	973	1104

La Figura 2.28 muestra imágenes extraídas de una de las secuencias de video con rotación en el eje sagital. A cada una de estas imágenes se le estimó el ángulo de inclinación sagital como se muestra en la Figura 2.16.

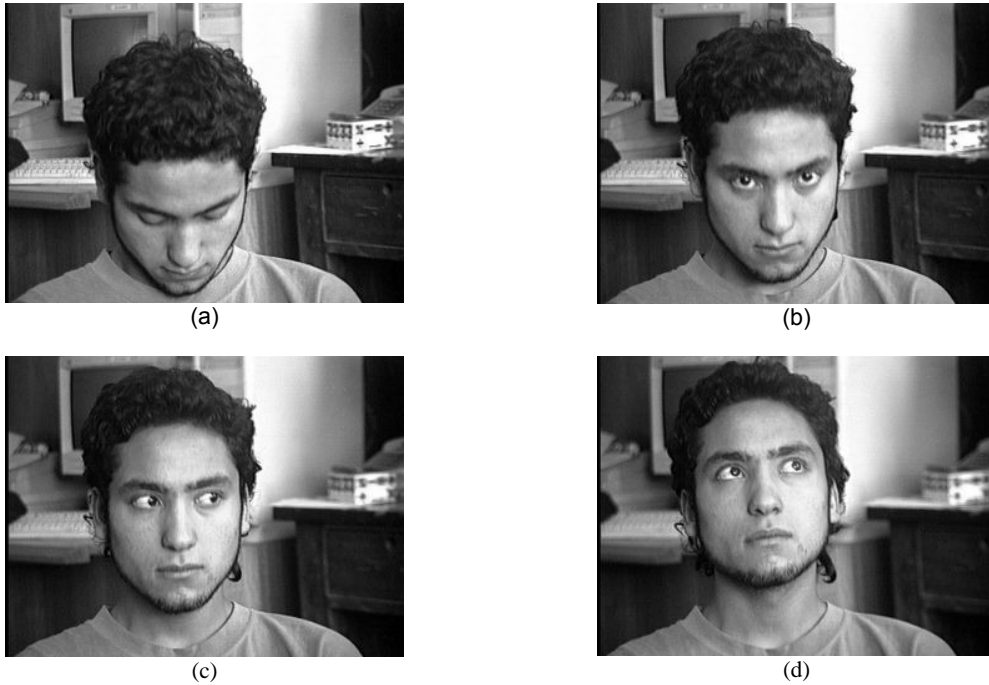


Figura 2.28: Imágenes de secuencia de video de rotación sagitales. La Figura 2.28(a), (b), (c) y (d) presentan ángulos de 40° , 23° , 13° , -13° .

3. RESULTADOS

La evaluación de la metodología se realizó con 4 secuencias de video con rotación coronal-transversal, 4 secuencias de video con rotación sagital y 4 secuencias de videos con rotación de rostro 3D como se muestra en la Tabla 2.4.

3.1 Detección coronal-transversal

Se procesaron 4 secuencias de video con personas que rotan sus rostros en el eje coronal-transversal. Para el procesamiento se configuró el programa para que buscara rostros rotados en el eje coronal y en el transversal. Un operador humano evaluó la detección fina del rostro y la detección del iris, calificando la detección si es muy buena con 1, de inferior calidad 0.9 y así sucesivamente, luego estos valores se comparan con un umbral, en este caso el umbral es de 0.8. La Figura 3.1 muestra ejemplos de detecciones y su calificación.

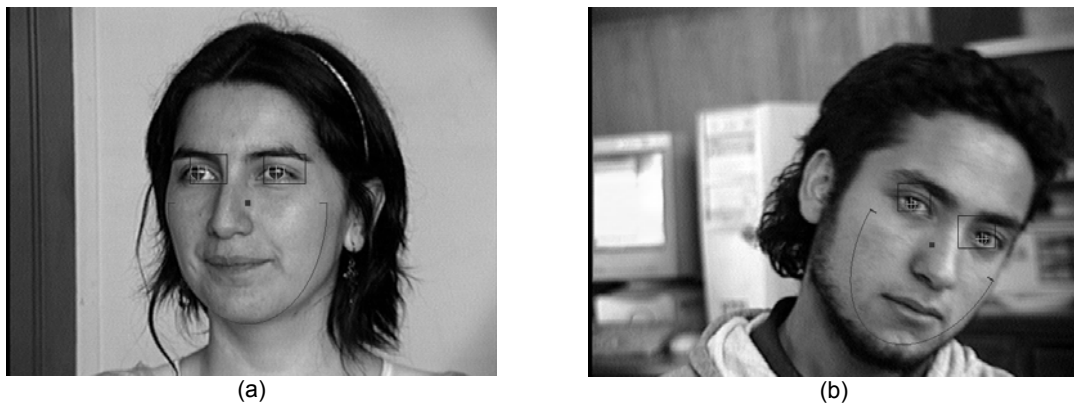


Figura 3.1: Ejemplos de detección de rostro en 2 imágenes con rotación transversal y coronal. (a) Detección de ojos y rostro rotado en el eje transversal. La detección de rostro se califica con 1.0 y la detección de ojos con 1.0. (b) Detección de rostro y ojos rotados en el coronal-transversal. La detección de rostros se califica con 0.8 y la detección de ojos con 0.7.

Se evaluaron las secuencias de video con rotación coronal-transversal. Se usaron los moldes coroneles-transversal generados para la detección de rostro e iris. Se midió la posición de las características antropométricas para la primera imagen de la secuencia de video y se procesó la secuencia de video completa. En las imágenes obtenidas se evaluó la detección de rostro y la detección del iris. En las imágenes que no presentan detección de rostro se eliminan de la evaluación de detección de iris.

La Tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos para estas 4 secuencias de video.

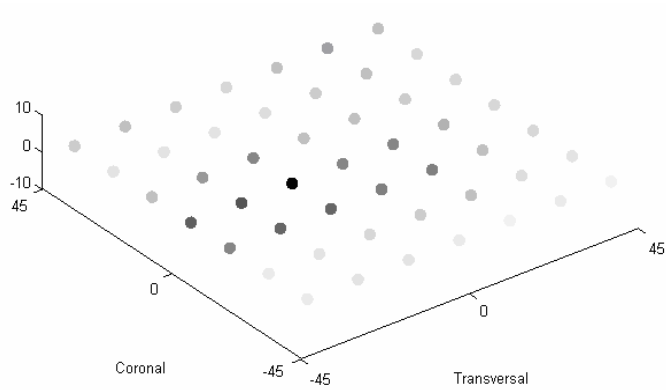
Tabla 3.1: Resultados de la detección coronal-transversal para las secuencias de video.

Nº de secuencia	Cantidad de imágenes	Detección del rostro [%]	Detección de iris [%]
1	560	98	91
2	598	96	75
3	306	100	95
4	215	100	85
Total	1679	98	82

En la Tabla 3.1 se observan los resultados obtenidos en las 4 secuencias de video. Se observa que la detección correcta de rostros en todas las secuencias fue superior a 96% y en 2 de ellas alcanza el 100%. Para el caso de la detección del iris se observa que el porcentaje de detección correcta fue mayor que 75% y en 2 secuencias mayor que 90%.

3.1.1 Integral de línea de 2 dimensiones

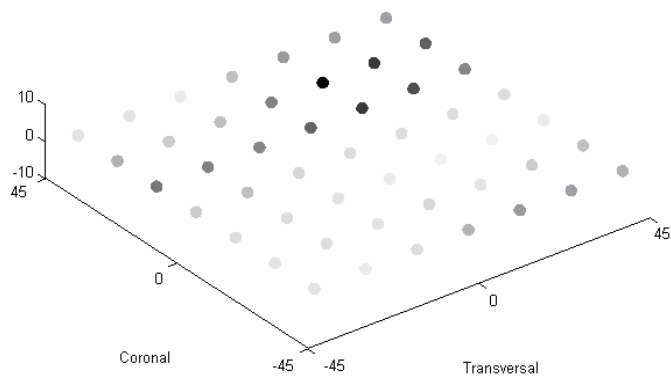
La evaluación de imágenes digitales con moldes transversales y coronales genera como salida una matriz de 2 dimensiones. Los elementos de esta matriz son las máximas integrales de línea para cada conjunto de tamaños de moldes, para cada uno de los ángulos transversal y coronal. La Figura 3.1 muestra la integral de línea bidimensional para tres imágenes de la base de datos. Se representan los valores de las integrales de línea por un círculo. Cada círculo en (a), (c) y (e) presenta un nivel de gris que representa su valor de integral de línea, el círculo más oscuro representa el valor máximo de la integral de línea y el más claro el valor más bajo de integral de línea. En la Figura 3.1(a) se muestran los resultados de procesar la Figura 3.1(b). Se presentan los valores de las integrales de línea para moldes construidos entre -45° y 45° con paso 15° en el eje coronal y entre -45° y 45° con paso 15° en el eje transversal. La Figura 3.1(a) muestra que la máxima integral de línea se alcanza en un ángulo de -15° transversales y coronal 0° . En la Figura 3.1(c) se muestra la integral de línea para la imagen de la Figura 3.1(d). En este caso el máximo se encuentra en coronal 30° y en transversal 15° . La Figura 3.1(d) muestra al individuo rotado en 30° coronales, cuyo rostro no es frontal, presentando rotación transversal. La Figura 3.1(e) muestra el resultado de las máximas integrales para la imagen (f).



(a)



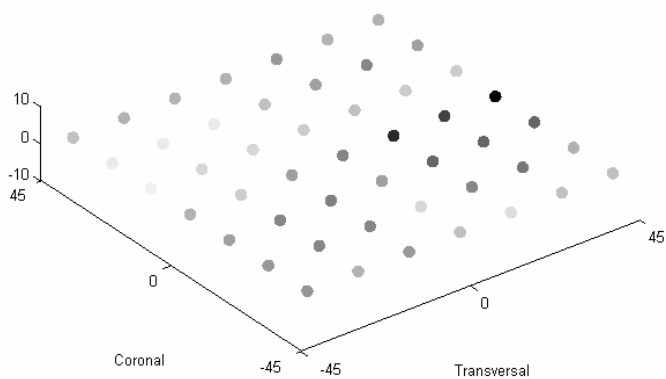
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.1: Integral de línea bidimensional para imágenes de las secuencias de video con rotación coronal-transversal. Los niveles de gris claros en las Figura (a), (c) y (e) representan un valor bajo de la integral de línea y los niveles de gris oscuro representan un valor alto de integral de línea.

3.1.2 Seguimiento en secuencias de video

Se calculó la integral de línea sólo en el eje transversal para una porción de una secuencia de video con movimiento en el mismo eje. Se evaluaron integrales de línea para ángulos transversales

entre -40° y 40° con paso 20° . Los 5 valores obtenidos para cada imagen se graficaron en la Figura 3.2(a). El gráfico muestra los valores de las máximas integrales de línea para una secuencia de video a 30 cuadros por segundo. Se muestra el resultado de 7,5 s, equivalente a 225 imágenes. En la Figura 3.2(b) se muestra una imagen de la secuencia procesada, corresponde al instante 0,5 s. Se observa que los valores de la integral de línea en 0,5 s son mayores para el molde en -40° y -20° transversales. El molde de mayor integral es el molde de -40° . La Figura 3.2(c) muestra otra imagen de la secuencia procesada correspondiente al instante 1,2 s, el valor de las integrales de línea es mayor para los moldes en -20° y -40° transversales, el mayor valor es de para -20° . En la Figura (d) se muestra la imagen para 2,6 s cuya integral de línea es máxima para el molde en 0° . La Figura 3.2(e) presenta la imagen en 3,5 s, el valor de la integral de línea es máxima para el molde en 20° transversales.

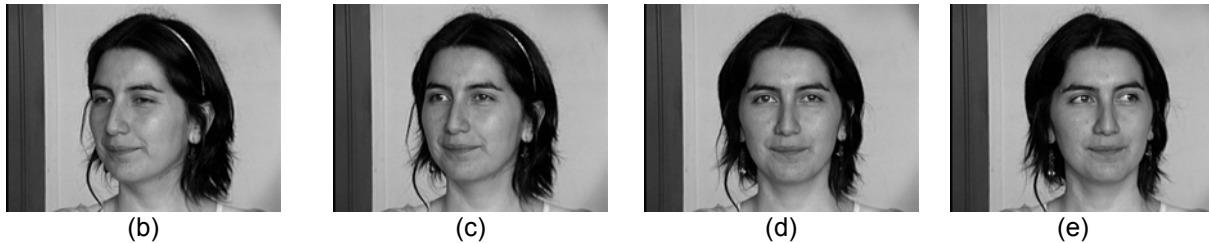
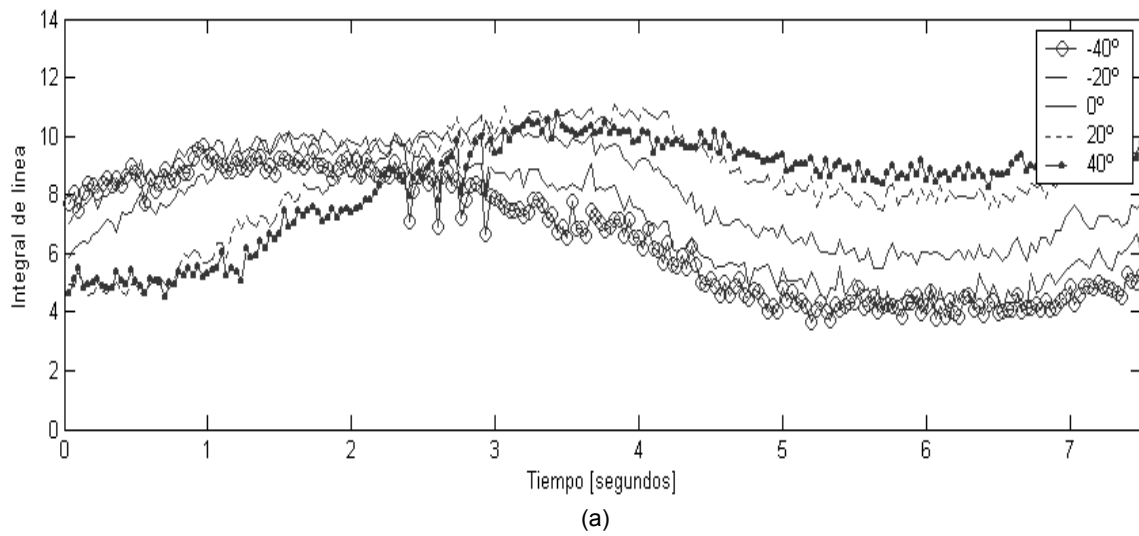


Figura 3.2: Valor de la Integral de línea para secuencia de video con rotación transversal. (a) Integral de línea para secuencia de video de 7 s de duración, en que el individuo rota su rostro en el eje transversal, (b) Imagen de rostro a los 0,5 s, (c) Imagen del rostro a 1,2 s, (d) Imagen del rostro a 2,6 s, (e) Imagen del rostro a 3,5 s.

3.1.3 Medición de porcentajes de error en detección de rostro y ojos

Se midieron los porcentajes de error en las 4 secuencias de video con rotación coronal-transversal. La medición de detección correcta del iris incluye los dos ojos en un individuo[5][13],

Se catalogaron 4 tipos de error para el rostro y el iris:

- i. Rostro mal detectado: La detección fina no detecta correctamente el tamaño o la posición del rostro.
- ii. Rostro no detectado: En una imagen que presenta rostros de tamaño en el rango de detección y no se detecta ningún rostro.
- iii. Iris mal detectado: El algoritmo detecta mal el tamaño y posición del iris.
- iv. La región de búsqueda no calza con la posición del iris.

Para las 4 secuencias de video se midieron los errores de tipo i y ii que se muestran en la Tabla 3.4 y los errores de tipo iii y iv se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4: Medición de porcentajes de error de detección de rostros para 4 secuencias de video con rotación coronal-transversal.

Error	Video 1		Video 2		Video 3		Video 4	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
i	0	0	0	0	0	0	0	0
ii	7	2	19	4	0	0	0	0
Total	7	2	19	4	0	0	0	0

Tabla 3.5: Medición de porcentajes de error de detección de iris para 4 secuencias de video con rotación coronal-transversal.

Error	Video 1		Video 2		Video 3		Video 4	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
iii	42	9	119	25	13	4.3	22	14.2
iv	0	0	0	0	2	0.7	1	0.8
Total	42	9	119	25	15	5	23	15

3.1.4 Ejemplos de detecciones erróneas



Figura 3.3: Ejemplos de imágenes con error de detección para la rotación coronal-transversal. (a) Error en la estimación del tamaño del rostro. (b) Error en la estimación del centro del rostro. (c) Error en la detección de iris. (d) Error en la estimación de la inclinación del rostro. (e) Error en la estimación del tamaño del rostro. (f) Error en la estimación del centro del rostro.

3.2 Detección sagital

Se procesaron 4 secuencias de video con personas que rotan sus rostros en el eje sagital. Se evaluó la detección fina del rostro y la detección de los ojos, calificando en la forma definida en la sección 3.1. La Tabla 3.2 muestra los resultados obtenidos para estas 4 secuencias de video. En estas secuencias se estimó el ángulo sagital del rostro, y se eliminaron las imágenes que están fuera del rango de $\pm 40^\circ$ sagitales. Se observa que la detección de rostros en tres de las secuencias fue más de 89%, y en una se obtuvo 78%. Para el caso de la detección del iris se

observa que el porcentaje de detección correcta fue mayor que 88% en 3 de las secuencias y en 1 secuencia es de 86%.

Las imágenes en las que no se detecta el rostro no se toman en cuenta para la evaluación de la detección del iris.

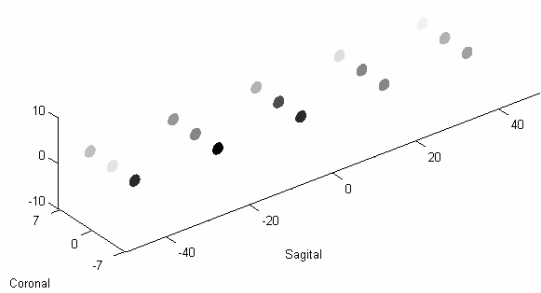
Tabla 3.2: Resultados de la detección sagital para las secuencias de video.

Nº de Orden	Cantidad de imágenes	Detección del rostro [%]	Detección de iris [%]
1	217	90	89
2	186	89	88
3	291	99	92
4	269	78	86
Total	973	90	91

3.2.1 Integral de línea para rotación sagital

Al evaluar integrales de línea de imágenes digitales con moldes sagitales se genera como salida una matriz. Los elementos de esta matriz son las máximas integrales de línea para cada conjunto de tamaños de moldes para cada uno de los ángulos sagitales.

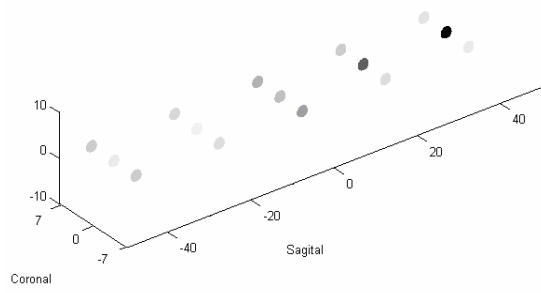
La Figura 3.4 muestra la matriz de integrales de línea para tres imágenes de las secuencias de video que se procesaron. En 3.4(a), (c) y (e) se presentan los valores de las integrales de línea por un círculo. Cada círculo tiene un nivel de gris que representa el valor de la integral de línea, el nivel de gris más oscuro representa el valor máximo de las integrales de línea y el nivel de gris más claro el nivel más bajo de integral de línea. Se consideran ángulos sagitales entre -40° y 40° con paso 20° y ángulos coronales entre -7° y 7° con paso 7° . En la Figura 3.4(a) se muestran los resultados de procesar la Figura 3.4(b). La Figura 3.4(a) muestra que la máxima integral de línea se alcanza en un ángulo de -20° sagital y coronal -7° . En la Figura 3.4(c) se muestran la integral de línea para la imagen de la Figura 3.4(d). En este caso el máximo se encuentra en el ángulo sagital 40° y coronal 0° . La Figura 3.4(e) muestra el resultado de las máxima integral de línea de la Figura 3.4(f).



(a)



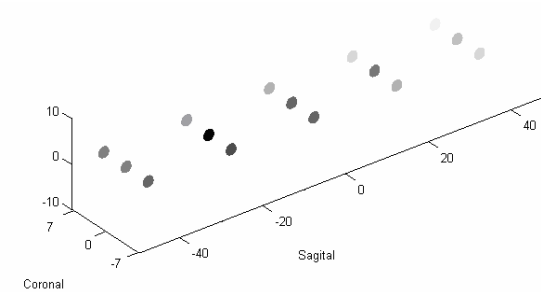
(b)



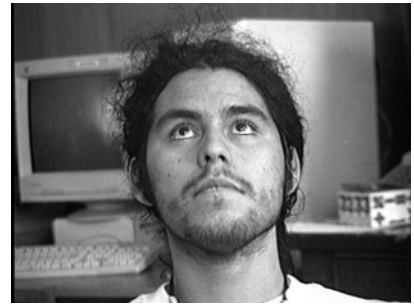
(c)



(d)



(e)

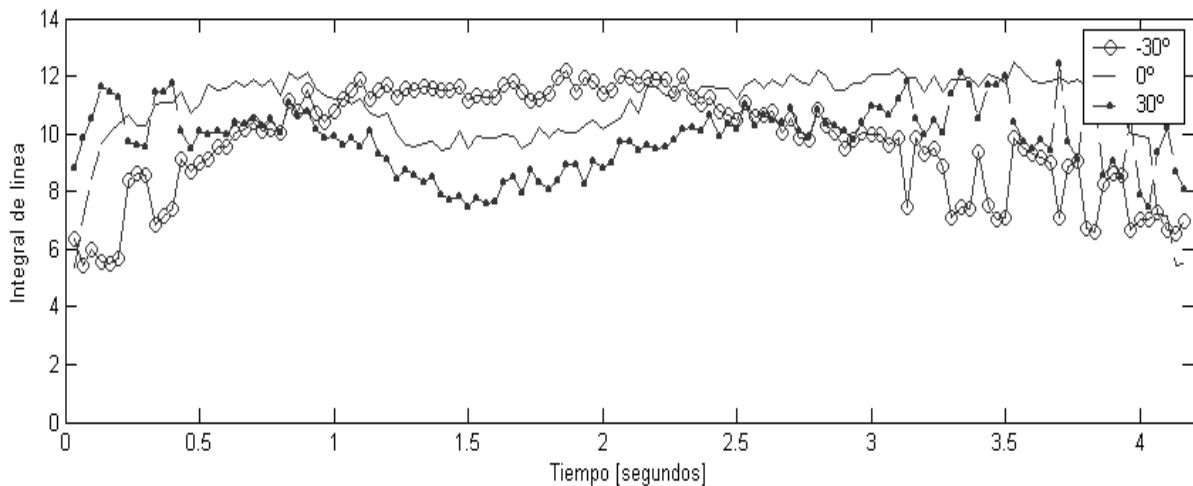


(f)

Figura 3.4: Integral de línea para imágenes de las secuencias de video con rotación sagital. Las Figuras (a), (c), (e) muestran los valores de la matriz integral de línea al procesar las imágenes (b), (d) y (f) para moldes en el eje sagital y coronal. Los valores de la matriz se muestran representados por círculos cuyos niveles de gris representan los valores de las integrales de línea como en la Figura 3.1.

3.2.2 Seguimiento en secuencias de video

Se calculó la integral de línea sólo en el eje sagital para una porción de una secuencia de video con movimiento en el mismo eje. Se evaluaron integrales de línea para ángulos sagitales entre -30° y 30° con paso 30° . Los 3 valores obtenidos para cada imagen se graficaron en la Figura 3.5(a).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.5: Valor de la integral de línea para secuencia de video. (a) Valor de la integral de línea para cada cuadro de una secuencia de video de 4,2 s de duración, en que el individuo rota su rostro en el eje sagital, (b) Rotación del rostro a los 0 s, (c) Rotación del rostros a 0,5 s, (d) Rotación a 1 s, (e) Rotación a 2,5 s.

La Figura 3.5 muestra el gráfico de los valores de las máximas integrales de línea para una secuencia de video a 30 cuadros por segundo. Se muestra el resultado de 4.2 s equivalente a 126 imágenes. En la Figura 3.5(b) se muestra una imagen de la secuencia procesada. Esta imagen corresponde al instante 0 s. Se observa que en ese instante los valores de la integral de línea son mayores para el molde en 30° . La Figura 3.5(c) muestra otra imagen de la secuencia procesada que corresponde al instante 0,5 s, el valor de las integrales de línea es mayor para el molde en 0° . La Figura 3.5(d) muestra una imagen de la secuencia que corresponde al instante 1 segundo, el valor de las integrales de línea es mayor para el molde en -30° . En la Figura 3.5(e) se muestra la imagen para el instante 2,5 s cuya integral de línea es máxima para el molde en 0° .

Los valores de las integrales de línea para los moldes en -30° y 30° se ponderaron por un valor de 1,1 para elevar los valores de la integral de línea para moldes que no fueran el molde frontal. Este valor se calculó haciendo la razón del valor medio de la integral de línea del molde central para la secuencia de video procesada y los promedios de los valores de las integrales de línea de los moldes en -30° y 30° .

3.2.3 Medición de porcentajes de error en detección de rostro y ojos

Se midieron los porcentajes de error en las 4 secuencias de video con rotación sagital. La medición de detección correcta del iris incluye los dos ojos en un individuo [5][13].

Se catalogaron 4 tipos de error para el rostro y el iris:

- i. Rostro mal detectado: La detección fina no detecta correctamente el tamaño o la posición del rostro.
- ii. Rostro no detectado: En una imagen que presenta rostros de tamaño en el rango de detección y no se detecta ningún rostro.
- iii. Iris mal detectado: El algoritmo detecta mal el tamaño y posición del iris.
- iv. La región de búsqueda no calza con la posición del iris.

Para las 4 secuencias de video se midieron los errores de tipo i y ii que se muestran en la Tabla 3.4 y los errores de tipo iii y iv se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4: Medición de porcentajes de error de detección de rostros para 4 secuencias de video con rotación sagital.

Error	Video 1		Video 2		Video 3		Video 4	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
i	0	0	22	10	3	1	1	0
ii	22	10	1	0	0	0	58	21
Total	22	10	23	11	3	1	59	21

Tabla 3.5: Medición de porcentajes de error de detección de iris para 4 secuencias de video con rotación sagital.

Error	Video 1		Video 2		Video 3		Video 4	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
iii	16	11	24	12	7	4	24	12
iv	0	0	0	0	6	4	3	2
Total	16	11	24	12	13	8	27	14

3.2.4 Ejemplos de detección errónea

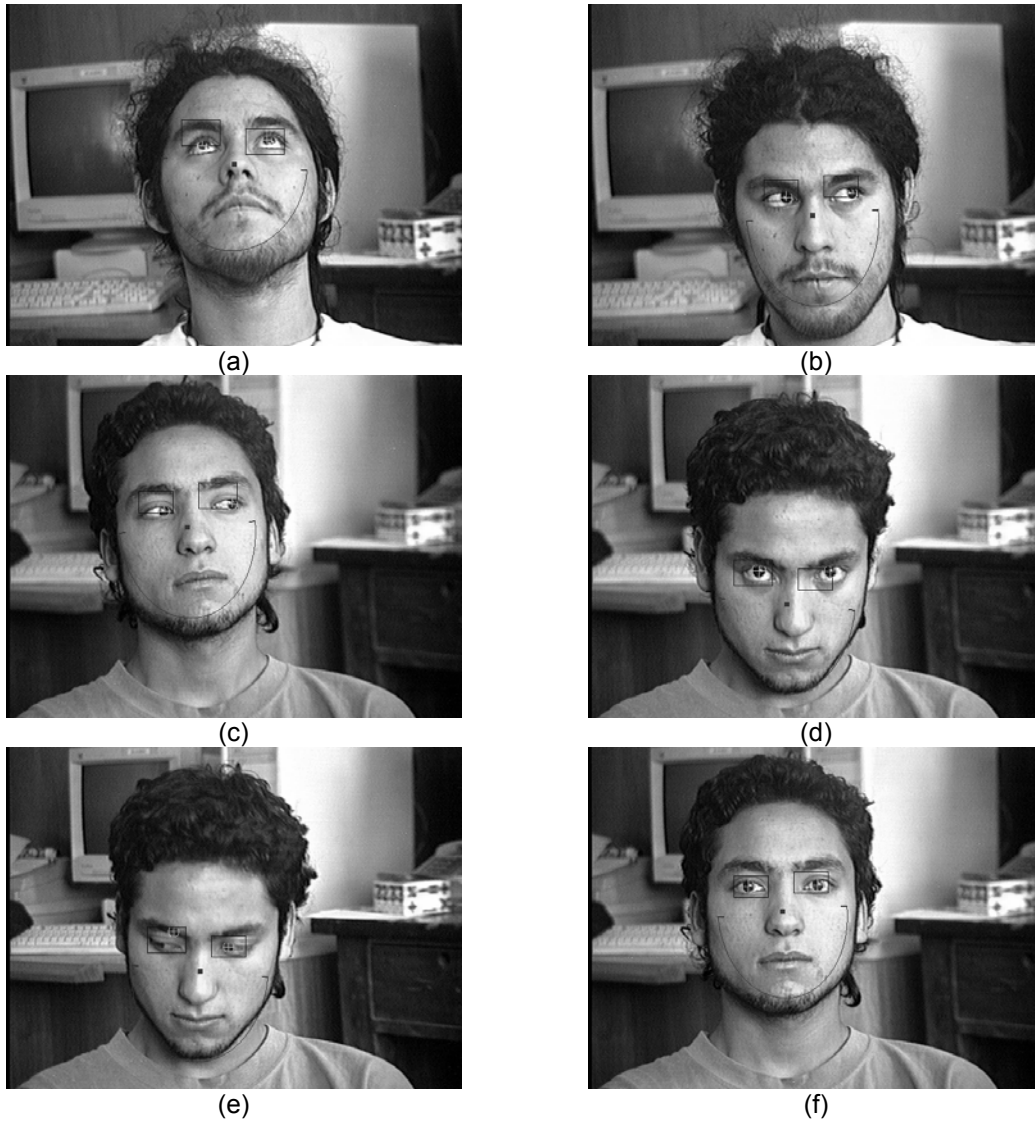


Figura 3.6: Ejemplos de imágenes con error de detección para la rotación sagital. (a) Error en la estimación del centro del rostro. (b) Error en la estimación del tamaño del rostro. (d) Error en la estimación del centro del rostro. (e) Error en la estimación de la posición del iris izquierdo. (f) Error en la estimación del tamaño del rostro.

3.3 Detección 3D

Se procesaron 4 secuencias de video con personas que rotan sus rostros en los ejes coronal, transversal y sagital. Para el procesamiento se configuró el programa para que buscara rostros rotados en los 3 ejes, haciendo que considerara todos los moldes construidos. Se evaluó la detección fina del rostro y la detección del iris.

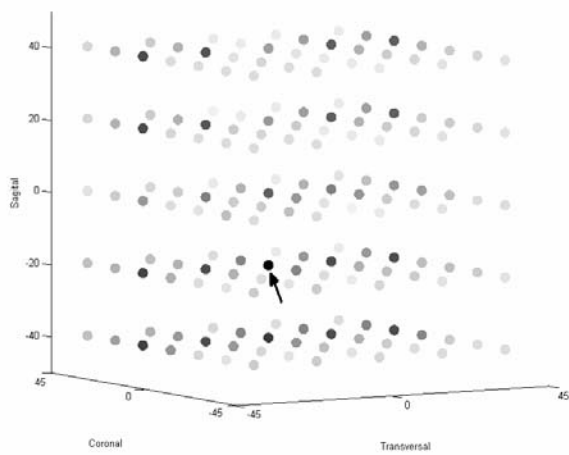
En esta secuencia se calculó el ángulo sagital del rostro, y se eliminaron las imágenes que están fuera del rango de $\pm 40^\circ$ sagitales. La Tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos para estas secuencias de video. Los resultados se obtuvieron mediante la definición en 3.1. En la Tabla 3.3 se observa que el valor de la tasa de detección correcta del rostro en tres secuencias es mayor que 90% y en sólo una es de 81%. La tasa de detección correcta del iris sólo en una secuencia presenta un valor de 83%, en otra se alcanza 89% y en dos de ellas se supera el 90% de detección correcta.

Tabla 3.3: Resultados de la detección rostros e iris rotados en los ejes coronal-transversal-sagital para las secuencias de video.

Nº de secuencia	Cantidad de imágenes	Detección del rostro [%]	Detección de iris [%]
1	204	81	83
2	300	98	89
3	300	93	90
4	300	97	93
Total	1104	92	89

3.3.1 Integral de línea de 3 dimensiones

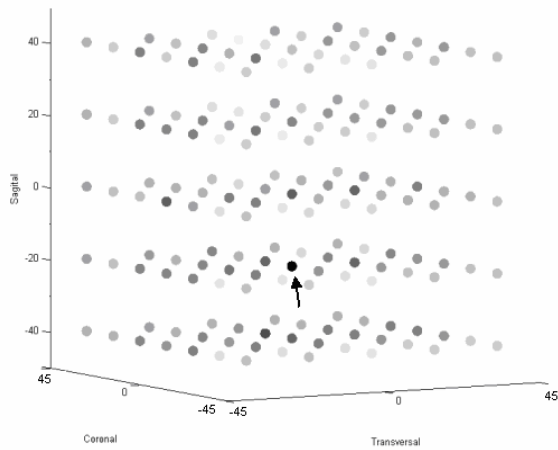
Al evaluar integrales de línea para rotación coronales-transversales-sagitales se genera como salida una matriz de 3 dimensiones. Los elementos de esta matriz son las máximas integrales de línea para cada conjunto de tamaños de moldes, para todos los ángulos. La Figura 3.7 muestra la matriz de integrales de línea para tres imágenes sacadas de las secuencias de video que se procesó. En la Figura 3.7(b) se observa que el sujeto mira hacia arriba con un ángulo coronal positivo. La máxima integral de línea se obtiene en -20° sagitales y 15° coronales y 0° transversal como se observa en la Figura 3.7(a) el círculo más oscuro está en el segundo nivel de la matriz integral de línea. La Figura 3.7(d) muestra otra imagen sacada de la secuencia de video, ésta es algunas imágenes más tarde que las de la Figura 3.7(b) Se observa que el sujeto ha enderezado su rostro y ya casi no presenta rotación coronal. La Figura 3.7(c) presenta la integral de línea y muestra que el máximo se encuentra para -20° sagitales y para 0° coronales y 0° transversal. Se observa que el resto de los valores de la integral de línea varían un poco pero aún se mantiene el seguimiento. La Figura 3.7(f) muestra a otro sujeto mirando hacia abajo y con ángulo coronal y transversal positivo. La máxima integral de línea se obtiene en sagital positivo 20° , coronal de 15° y transversal 20° . La Figura 3.7(e) muestra que las integrales de línea de los moldes sagitales para ángulos positivos presentan valores altos y las de los ángulos negativos presentan valores menores.



(a)



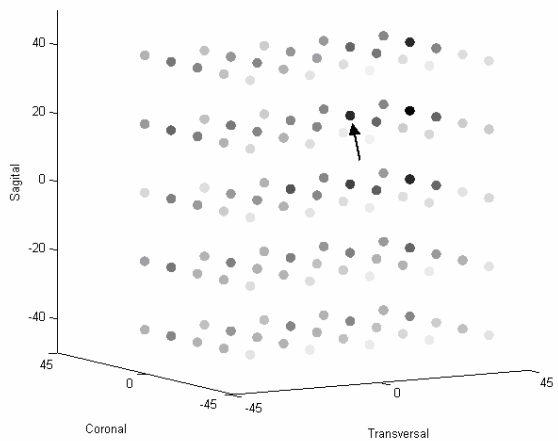
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.7: Integral de línea para imágenes de las secuencias de video con rotación 3D. (a), (c) y (e) muestran los valores de la matriz integral de línea en los tres ejes para las imágenes de las Figuras (b), (d) y (f). Los valores de las integrales de línea se representan con círculos en niveles de gris, los niveles de gris más oscuros representan a los valores más altos de integral de línea. El máximo de los valores de las integrales de línea se ha indicado con una flecha.

3.3.2 Seguimiento de secuencias de video en 3 dimensiones

Se calculó la integral de línea en los tres ejes para una porción de una secuencia de video con movimientos 3D. Se evaluaron integrales de línea para ángulos coronales entre -45° y 45° con paso 15° , transversal entre -40° y 40° con paso 20° y ángulos sagitales entre -40° y 40° con paso 20° . Para este fin se construyeron moldes para rotación 3D como se explico en 2.2.2. Los valores de estimación de ángulos entregados por el método se graficaron en la Figura 3.8(a).

La Figura 3.8 muestra los ángulos estimados al procesar una secuencia de video con rotación en los 3 ejes. La Figura 3.8(b) muestra 3 curvas con el ángulo de rotación estimado en cada eje. La Figura 3.8(b) muestra el rostro en el instante inicial. Se observa que el rostro mira hacia abajo, está un poco inclinado en el eje coronal. Los ángulos estimados en ese instante son coronal 15° , Transversal 0° y sagital en 20° . La Figura 3.8(c) muestra la imagen a los 1,7 s. Esta imagen presenta rotación sagital y casi no presenta rotación coronal. La Figura 3.8(a) en el instante 1,7 s presenta un ángulo coronal de 0° , transversal de 0° y coronal de -20° . La Figura 3.8 (d) muestra un rostro con rotación coronal, sagital mayor que el de la Figura 3.8(c). El rostro de la Figura 3.8(d) es al instante 2,5 s. Los ángulos estimados para este instante en la Figura 3.8(a) son coronal 15° , transversal 20° y sagital -40° . Para el instante 4 s se tiene la imagen de la Figura 3.8(e), se observa que presenta rotación coronal y sagital. Los ángulos estimados son 15° coronal y -40° sagital. Observando la Figura 3.8(a) se puede decir que el rostro se mueve hacia la izquierda, pues la rotación coronal desaparece al instante 4.5.

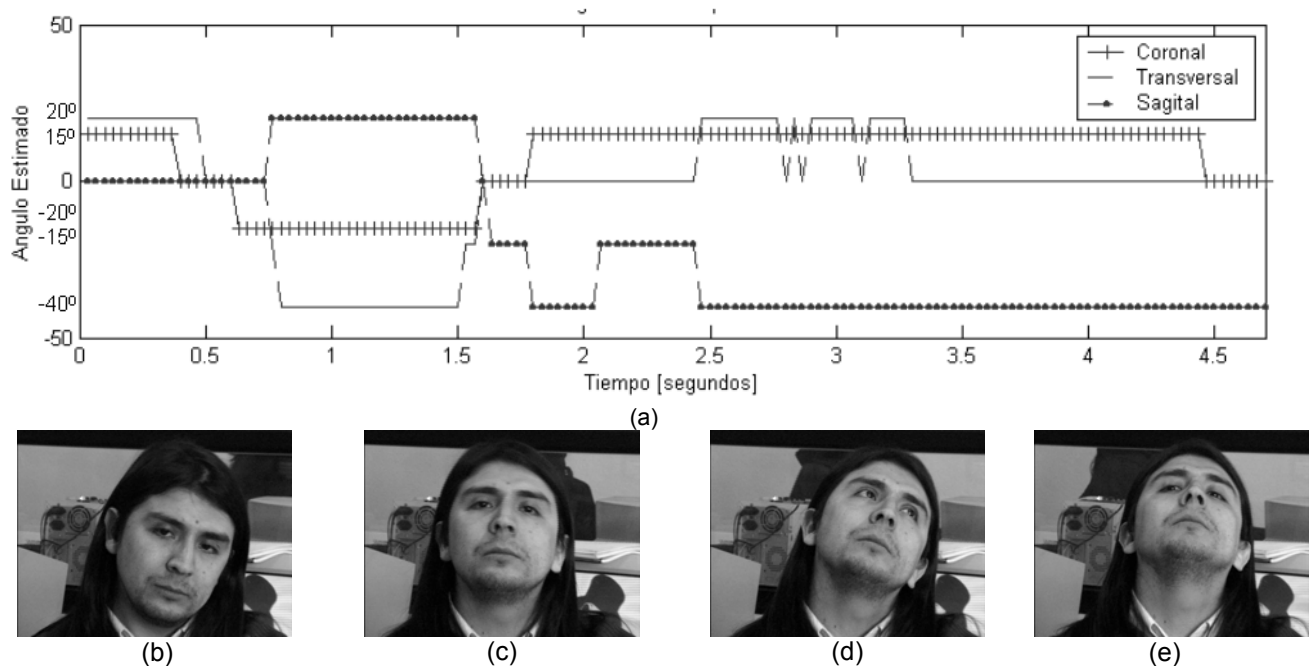


Figura 3.8: Ángulo del rostro estimado en una secuencia de video de 4,7 s de duración, (a) Gráfico de la estimación de la inclinación del rostro. (b) Imagen del rostro en el instante inicial la que presenta rotación coronal y sagital. (c) Imagen del rostro en el instante 1,7 presenta rotación sagital. (d) Imagen del rostro en el instante 2,5 s, presenta rotación sagital, coronal (e) Imagen del rostro en el instante 4,5 s, presenta rotación sagital.

3.3.3 Medición de porcentajes de error en detección de rostro y ojos

Se midieron los porcentajes de error en las 4 secuencias de video con rotación 3D. La medición de detección correcta del iris incluye los dos ojos en un individuo [5][13],

Se catalogaron 4 tipos de error para el rostro y el iris:

- i. Rostro mal detectado: La detección fina no detecta correctamente el tamaño o la posición del rostro.
- ii. Rostro no detectado: En una imagen que presenta rostros de tamaño en el rango de detección y no se detecta ningún rostro.
- iii. Iris mal detectado: El algoritmo detecta mal el tamaño y posición del iris.
- iv. La región de búsqueda no calza con la posición del iris.

Para las 4 secuencias de video se midieron los errores de tipo i y ii que se muestran en la Tabla 3.4 y los errores de tipo iii y iv se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4: Medición de porcentajes de error de detección de rostros para 4 secuencias de video con rotación 3D.

Error	Video 1		Video 2		Video 3		Video 4	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
i	17	8	7	2	21	7	8	3
ii	22	11	0	0	0	0	2	1
Total	39	19	7	2	21	7	10	3

Tabla 3.5: Medición de porcentajes de error de detección de iris para 4 secuencias de video con rotación 3D.

Error	Video 1		Video 2		Video 3		Video 4	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
iii	1	1	10	3	0	0	0	0
iv	17	10	1	0	7	3	7	2
Total	18	11	11	4	7	3	7	2

3.3.4 Ejemplos de detección errónea

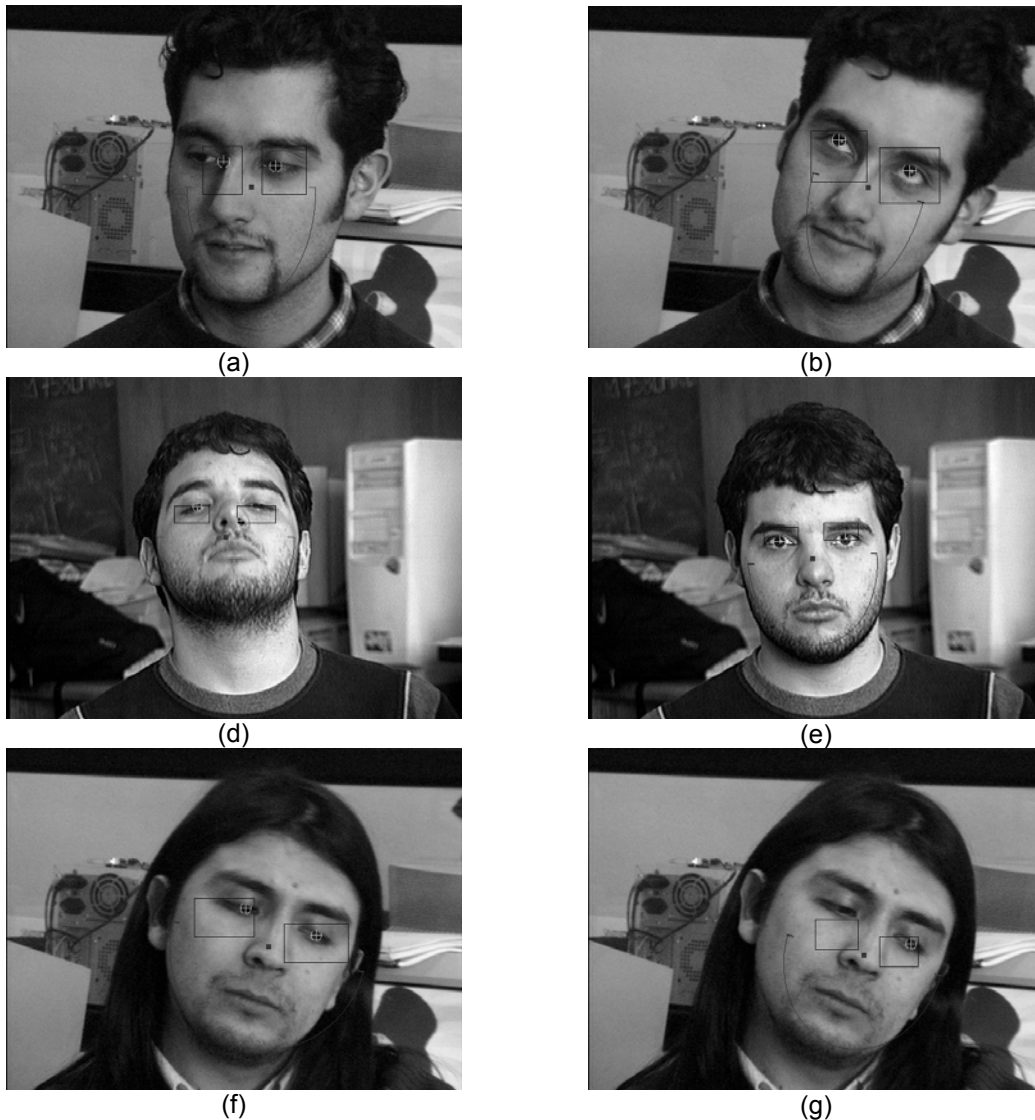


Figura 3.9: Ejemplos de imágenes con error de detección para la rotación 3d(a) Error en la estimación del centro del rostro. (b) Error en la estimación del tamaño del rostro. (d) Error en la estimación del centro del rostro. (e) Error en la estimación del tamaño del rostro. (f) Error en la estimación del tamaño del rostro. (g) Error en la estimación del tamaño del rostro.

3.4 Tiempos de procesamiento

Para la validación de las secuencias de video y para el método Online se utilizó un computador Pentium IV, de 3.2 GHz de frecuencia de reloj y 512 MB de memoria RAM en Bus de 333 MHz.

Para la medición de los tiempos de detección de rostro se utilizó la función QueryPerformanceCounter, provista por el API de Microsoft Windows, y que en el caso del computador utilizado permite una resolución de 5 μ s.

Rotación coronal-transversal

Se midió el tiempo de detección de rostro e iris para la rotación coronal-transversal. Para esta rotación se obtuvo un tiempo de 0.020 s en el procesamiento Online, con una varianza de 0.001 s, lo que permitiría procesar hasta 50 imágenes por segundo.

Rotación 3D

Se midió el tiempo de detección de rostro e iris para la rotación 3D, obteniéndose un tiempo de 0,028 s en el procesamiento Online, con una varianza de 0,006 s, lo que permitiría procesar hasta 35 imágenes por segundo.

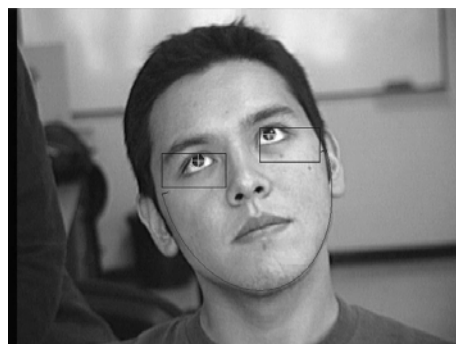
El máximo tiempo obtenido para el procesamiento Online fue de 0,054 s y el mínimo fue 0,017 s.

Los tiempos de procesamiento se obtuvieron para las imágenes distintas a la inicial. La imagen inicial tiene un tiempo de detección de rostro muy alto debido a que se realiza las etapas de detección gruesa y detección fina en forma completa.

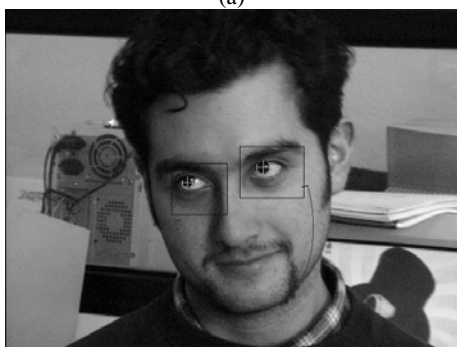
Las Figura 3.10 y 3.11 muestran resultados exitosos de detección de rostros con rotación en 3D. Las imágenes se extrajeron de las secuencias procesadas.



(a)



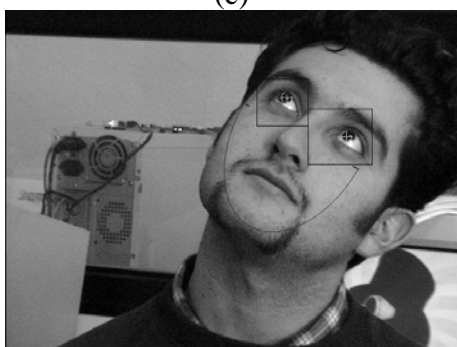
(b)



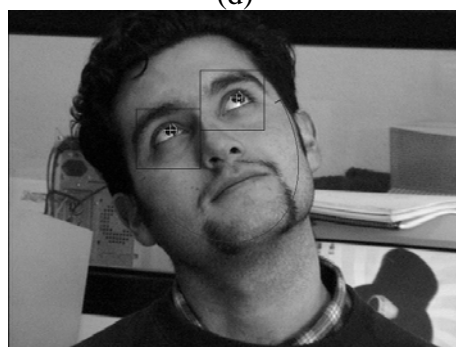
(c)



(d)



(e)

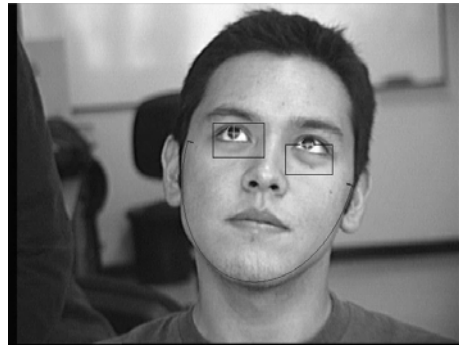


(f)

Figura 3.10 Imágenes de detección 3D exitosa en las secuencias de video procesadas.



(a)



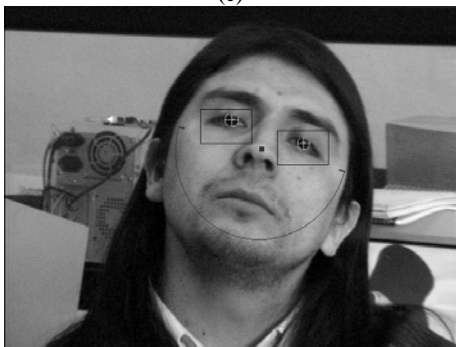
(b)



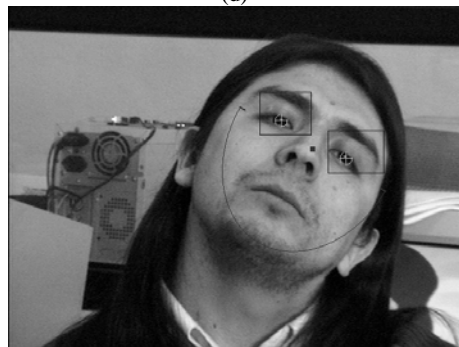
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.11 Imágenes de detección 3D exitosa en las secuencias de video procesadas.

4. CONCLUSIONES

Se logró construir un sistema de seguimiento de iris y rostros rotados en 3D. El sistema funciona considerando moldes antropométricos del rostro para su detección. Se extendió el trabajo realizado para rotaciones coronales en [17] [5] a los ejes transversal y sagital y sus combinaciones.

La metodología desarrollada por Palma [13] detectaba solo rostros frontales, La nueva metodología desarrollada libera las restricciones de los rostros frontales.

Para el desarrollo de los moldes antropométricos y validación de la metodología se construyeron bancos de imágenes estáticas de 5 individuos con rotaciones en el eje transversal y coronal. Los individuos rotaron sus rostros desde -45° a 45° con un paso de 15° . Además se construyeron 4 secuencias de video para los mismos individuos, que rotan sus rostros en el eje transversal y coronal. La cantidad de imágenes en estas secuencias con rotación coronal-transversal van desde los 215 a los 568. Se construyeron 4 secuencias de video de individuos que rotan su rostro en el eje sagital. La cantidad total de imágenes es de 963. Se construyeron 4 secuencias de video de individuos que rotan su rostro en los 3 ejes. La cantidad de imágenes de las secuencias va de 246 a 300 imágenes. Con estos bancos de imágenes se construyeron modelos empíricos de la variación de las posiciones de las características antropométricas del rostro y la excentricidad del rostro, frente a las rotaciones, transversales y sagitales. Con estos modelos fue posible construir moldes del rostro para el seguimiento del rostro en secuencias de video. La metodología desarrollada permite generar a partir de la vista frontal, moldes antropométricos del rostro con rotaciones coronales, transversales, sagitales y las posibles combinaciones. Para la rotación coronal se pueden generar moldes entre -45° y 45° con un paso de 15° , para la rotación transversal se pueden generar moldes entre -40° y 40° con un paso de 20° , y para la rotación sagital es posible generar moldes entre -40° y 40° con paso de 20° . Los valores especificados de rango de ángulos son los ángulos máximos en que se evaluó el método y que permite detección de rostro e iris. El valor de paso entre los ángulos es el valor mínimo que permite selectividad de las matrices de integrales de línea

Se construyó una estructura de datos, cuyos elementos tienen un conjunto de moldes del rostro para un ángulo de rotación 3D fijo de diferentes tamaños que van desde 50 a 150 pixeles. Cuando se selecciona un elemento de la estructura de datos que contiene un molde del rostro que representa mejor la inclinación del rostro en una imagen, se define una vecindad de $3 \times 3 \times 3$ en torno a este elemento, de esta forma al realizar seguimiento Online de rostros se analizan los 26 vecinos al elemento seleccionado.

La metodología desarrollada para el seguimiento de rostros en secuencia de video es selectiva en el eje transversal con un paso de 20° , en el sagital con paso de 20° y en el coronal con paso de 15° .

Se midieron los tiempos de procesamiento para rotaciones coronal-transversal y 3D. Para estos ejes se obtuvo un tiempo promedio de 0,020 s, y 0,028 s respectivamente, pudiéndose procesar hasta 50 imágenes y 35 imágenes por segundo respectivamente. Estos tiempos se midieron en un computador Pentium 4 de 3,2 GHz. Estos resultados permiten aplicar la metodología en tiempo real.

Lacascia [4] reconstruyó una malla 3D del rostro ajustada a partir de una vista frontal del rostro obteniendo tiempos de procesamientos elevados, no alcanzándose tasas superiores a tiempo real. Rowley [18] entrenó redes neuronales para la detección de rostros rotados pero con tiempos de procesamiento del orden de minutos, los que son demasiado altos para una implementación en tiempo real. Los métodos con luz infrarroja [24][25] entregan buena estimación de la posición del iris y de la inclinación del rostro y procesamientos en tiempo real, pero esta técnica es considerada invasiva al irradiar al sujeto con este tipo de luz, y se requiere un hardware adicional para generar

la luz infrarroja. Lin [8] presentó un método de detección de rostros con rotación en el eje transversal, el tiempo involucrados para la detección de un rostro en un Pentium II de 233 MHz fue de 2,4 s. Considerando un factor 15 en el aumento de velocidad de procesamiento, con un computador de 3,4 GHz, se podría tener un tiempo de detección de rostro de 0,16 s, o 6 cuadros por segundo no logrando 30 cuadros por segundo. Este método no considera rotación sagital o coronal. En [11] usando visión estereoscópica y filtros de partículas se obtuvo buenos resultados en seguimiento de rostros y bajos tiempos para la detección de rostro pero se requieren dos cámaras y hardware adicional para manejar las cámaras.

El banco de imágenes de 5 individuos fue suficiente para generar modelos empíricos de la evolución de las posiciones de las características antropométricas. Los pasos de ángulos entre las imágenes permiten una resolución mínima de 15°. Lo que impacta en la el paso mínimo para la generación de moldes.

La selectividad de 15° en eje coronal, 20° en transversal y 20° en sagital. Será suficiente dependiendo de la aplicación. Si la aplicación es para un sujeto que cambia la orientación de su rostro muy frecuentemente y con grandes amplitud se podría obtener una detección del iris exitosa y si por otro lado se quiere detectar iris y la inclinación del rostro con mucha precisión, por ejemplo para identificación, este método no es lo suficientemente preciso.

Para seguimientos de rostros en las secuencias construidas para la rotación coronal transversal se obtuvo que todas las secuencias el desempeño fue mayor que 89% y en 2 alcanza el 100%. Para el caso de la detección del iris se observa que el porcentaje de detección correcta fue mayor que 75% y en 2 secuencias fue mayor que 90%. Para el seguimiento sagital se obtuvo que la detección de rostros en tres de las secuencias fue más de 89% sólo en una se tiene 78%, en una alcanza 99%. Para el caso de la detección del iris se observa que el porcentaje de detección correcta fue mayor que 88% en 3 de las secuencias y en 1 secuencia mayor que 86%.

En la rotación 3D se obtuvo valores de la tasa de detección correcta del rostro en tres secuencias mayores que 90% y en sólo una es de 88%. La tasa de detección correcta del iris sólo en una secuencia presenta un valor menor al 80%, en otra se alcanza 89% y en dos de ellas se supera el 90% de detección correcta.

Los valores obtenidos para la detección de rostro e iris en este trabajo son menores a los obtenidos para la rotación coronal en [17] pero se incorporan rotaciones en los ejes transversal y sagital.

Los errores de detección de rostros e iris ocurren principalmente en la estimación de la inclinación del rostro, este tiene un impacto al ajustar un molde en una inclinación que no corresponde al rostro en la imagen, definiendo una región de búsqueda del iris errada. La forma de disminuir estos errores sería mejorando la selectividad de la integral de línea de cada molde. Los mayores errores de detección se producen debido a las condiciones de iluminación de la secuencia de video. Si las condiciones de poca iluminación son bajas impactan negativamente en la estimación de la inclinación, tamaño y posición del rostro, generando una detección errada del iris.

Se han presentado curvas en el tiempo de integrales de línea en 3.1.2 y 3.2.2 para seguimiento en el eje transversal y sagital. Estas curvas demuestran que la metodología es selectiva entre los diferentes moldes para un eje de rotación.

Para la rotación en 3D se generó una curva de estimación de rotación del rostro en los tres ejes a través del tiempo. Si el individuo se mantiene dentro de los límites de rotación la metodología es capaz realizar la estimación del ángulo de inclinación.

A futuro para lograr disminuir el paso entre ángulos para la generación de moldes para la detección de rostros rotados, las integrales de línea calculadas para estos moldes deberían generar curvas más selectivas entre ángulos consecutivos, de esta forma se podría disminuir el paso entre moldes.

Para disminuir el paso de selectividad se requeriría mejorar los modelos y recopilar más imágenes por individuos con un paso más fino en los tres ejes y generar una metodología automática para la

construcción de estos moldes a partir de las imágenes tomadas. La generación automática de los moldes antropométricos más selectivos se podría hacer planteando un funcional de mérito que considere aumentos en la selectividad, valores de la imagen direccional en las regiones de las características antropométricas y este funcional se podría optimizar por algún algoritmo genético, como en [20].

Al aumentar la cantidad de individuos en el banco de imágenes permite generalizar la metodología, considerando una distribución demográfica más amplia, como niños, personas de edad y de diferentes etnias. La demografía de los individuos limita solo los resultados a personas jóvenes o a aquellas que tengan bien marcadas características antropométricas como: cejas, esperándose inferiores resultados en personas de edad avanzada.

Estudios posteriores deberían evaluar el desempeño de la metodología ante cambios de iluminación y desarrollar algoritmos que hagan la metodología robusta ante este tipo de variaciones.

Se podría utilizar la metodología para el desarrollo de una interfaz hombre máquina para apoyo a discapacitados o detector de somnolencia en conductores. Realizar prueba de largo aliento de detección de iris y evaluar la factibilidad de la metodología para un producto comercial.

Para mejorar los resultados de tracking del rostro se podría considerar la trayectoria del individuo y, a través de un modelo dinámico del individuo, y de esta forma disminuir la cantidad de evaluaciones de moldes vecinos al considerado. Disminuyéndose los tiempos de procesamiento.

Los resultados de este trabajo se presentaron en el congreso del SPIE en Sapporo Japón en 2005.

5. REFERENCIAS

- [1] C. Chiang, W. Tai, M. Yang, Y. Huang, C. Huang, "A novel method for detecting lips, eyes and faces in real time", *Real Time Imaging*, 2003, vol. 9, pp. 277-287.
- [2] C. Colombo, A. Del Bimbo, "Real-time head tracking from the deformation of eye contours using piece affine camera", *Pattern Recognition Letters*, 1999, pp. 721-730.
- [3] Daugman J., "High Confidence Visual Recognition of Persons by a Test of Statistical Independence", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, n° 11, Nov. 1993, pp. 1148-1152.
- [4] M. LaCascia, S. Sclaroff, and V. Athitsos, "Fast, Reliable Head Tracking under Varying Illumination: An Approach Based on Registration of Texture-Mapped 3D Models", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, N° 4 April 2000, pp. 322-336.
- [5] V. Lazcano. "Seguimiento de iris en rostros rotados mediante moldes antropométricos en imágenes digitales", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, Universidad de Chile, Septiembre 2003.
- [6] R. Liang, C. Chen, Z. Pan and Jiajun Bum, "Robust real-time face tracking and modeling from video", *ICCSA, Montreal, Canada, May. 18-21, 2003*, pp. 114-123.
- [7] R. Liang, C. Chen, Z. Pan, J. Bu, "Robust real-time face tracking and modeling from video", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2667 / 2003, 2003, pp. 114-123.
- [8] C. Lin, K. Fan, "Pose classification of human faces weighting mask function approach", *Pattern recognition letters*, vol. 2003, pp. 1857-1869.
- [9] D. Maio, D. Maltoni, "Real-time face location on gray-scale static images", *Pattern Recognition*, vol. 33, 2000, pp. 1525-1539.
- [10] R. Martínez, R. Benavente, "The AR face database", *CVC Tech. Report #24, Face data base of University of Purdue*, http://rv11.ecn.purdue.edu/~aleix/aleix_face_DB.html, 1998.
- [11] K. Oka, Y. Sato, Y. Nakanishi and H. Koike, "Head Pose estimation system based on particle filtering with adaptive diffusion control", *Proc. IAPR Conf. Machine vision applications, Tokyo, 2005*, 2005, pp. 586-589.
- [12] N. Oliver, A. Pentland, F. Bérard, "LAFTER: a real face and lips tracker with facial expression recognition", *Pattern Recognition*, vol. 33, 2000, pp. 1369-1382.
- [13] A. Palma. "Sistema de seguimiento de movimientos oculares en imágenes digitales", Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Stgo. de Chile, Enero 2003.
- [14] C. Perez, A. Palma, C. Holzmann, C. Peña, "Face and eye tracking algorithm based on digital image processing", *Proc. Of 2001 International Conference of the IEEE, System, Man & Cybernetics*, Tucson, Arizona, USA, Oct. 2001, pp. 1178-1183.
- [15] C. Perez, V. Lazcano, P. Estévez, C. Held, "Real time iris detection on rotated faces", *Optomechatronics Systems IV, Proceedings of the SPIE*, Vol. 5264, Providence, Rhode Island, USA, 28-29 Octubre, 2003, pp. 42-53.

- [16] C. Perez, V. Lazcano, P. Estévez, C. Held, "Real-time iris detection on faces with coronal axis rotation", [SMC 2004 - IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics](#), The Hague, Holland, 10-13 October 2004, pp. 6389-6394.
- [17] C. Perez, V. Lazcano, P. Estévez, C. Held, "Real time iris detection on coronal axis rotated faces", *System, Man and Cybernetics Part-C*, aceptado, 2006.
- [18] H. Rowley, S. Baluja, T. Kanade, "Rotation invariant neural network-based face detection", *Computer science technical report*, CMU-CS-97-201, 1997.
- [19] L. Vacchetti, V. Lepetit, P. Fua, "Stable Real-time 3D tracking using online and offline information", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Oct. 2004, pp. 1385-1391.
- [20] J. Vallejos, "Optimización por enjambres de partículas y maximización de componentes para detección de rostros e iris", *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista*, Universidad de Chile, Abril 2006, 54 pp.
- [21] E. Wahlstrom, O. Masoud, N. Papanikolopoulos, "Vision-based methods for driver monitoring", *IEEE 6th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Shanghai (China), Oct, 2003, pp. 903-908.
- [22] R. Xiao, M. Li, H. Zhang, "Robust multipose face detection in images", *IEEE Transaction on circuits and systems for video technology*, vol 14, January 2004, pp. 31-41.
- [23] M. Yang, D.J. Kriegman, N. Ahuja, "Detecting Faces in Images: A Survey", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, 2002, pp. 34-58 .
- [24] Z. Zhu, K. Fujimura, Q. Ji., "Real-time eye detection and tracking under various light conditions", *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, New Orleans, Louisiana, USA, 2002, pp.139-144.
- [25] Z. Zhu, Q. Ji, P. Lan, "Real time non-intrusive monitoring and prediction of driver fatigue", *IEEE Transaction on vehicular technology*, vol. 53, 2004, pp. 1052-1068.

ANEXO 1

Se determina el ángulo de la tangente a una elipse rotada en un ángulo ϕ .

La Figura A.1 muestra una elipse sin rotar en el eje x e y. Con respecto al centro se mide el ángulo paramétrico θ , y se tiene los semiejes mayor b y semieje menor a.

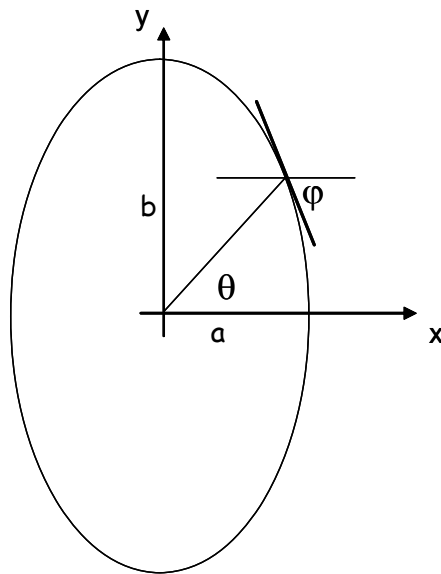


Figura A.1: Elipse vertical con semieje mayor b y semieje menor a.

Para la elipse de la Figura 1 se pueden plantear ecuaciones en forma paramétrica que se muestra en la expresión A.1.

$$\begin{aligned}x &= a \cos \varphi \\y &= b \sin \varphi\end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

en que a y b son el semieje menor y mayor respectivamente.

Si se considera una elipse rotada en ángulo ϕ , se debe rotar el sistema de coordenadas de la Figura A.1 como se muestra en la Figura A.2.

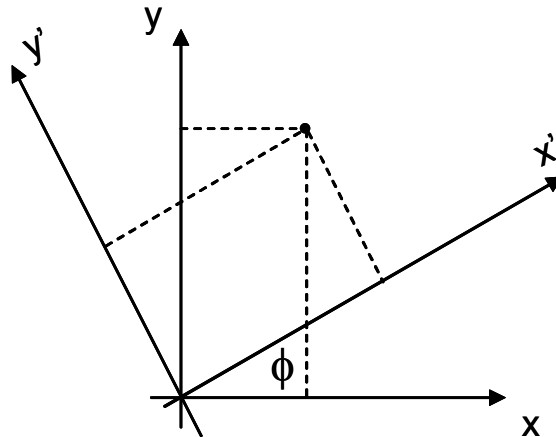


Figura A.2: Sistema de coordenadas rotado en ángulo ϕ .

Con matriz de rotación que se muestra en la expresión A.2.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\text{sen} \phi \\ \text{sen} \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}, \quad (\text{A.2})$$

se debe calcular cual es la relación de una derivada calculada en el sistema de coordenadas original y el rotado, se calculan los diferenciales dy y dx en las expresión A.3,

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\text{sen} \phi \\ \text{sen} \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx' \\ dy' \end{pmatrix}, \quad (\text{A.3})$$

Tomando el cociente entre dy y dx se tiene la expresión A.4,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\text{sen} \phi dx' + \cos \phi dy'}{\cos \phi dx' - \text{sen} \phi dy'}. \quad (\text{A.4})$$

La expresión 4 se puede dividir por $\cos \phi dx'$, con esto se obtiene la expresión A.5.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\tan \phi + \frac{dy'}{dx'}}{1 - \tan \phi \frac{dy'}{dx'}}. \quad (\text{A.5})$$

Considerando que $\frac{dy'}{dx'}$ es la tangente del ángulo ϕ en el sistema de coordenadas original, se tiene la expresión A.6.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\tan \phi + \tan \phi}{1 - \tan \phi \tan \phi} \quad (\text{A.6})$$

recordando que la suma la tangente de la suma de 2 ángulo tiene la expresión 6, se obtiene la expresión A.7.

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\phi + \varphi), \quad (\text{A.7})$$

considerando que $\frac{dy}{dx}$ es la tangente del ángulo en el punto (x,y) en la elipse rotada. Si se llama η al ángulo de esta línea tangente, se tiene la expresión A.8,

$$\eta = \phi + \varphi. \quad (\text{A.8})$$

El ángulo de las tangentes de la elipse rotada se puede calcular utilizando la expresión A.9,

$$\eta = \phi + \arctan\left(-\frac{b}{a} \tan \theta\right), \quad (\text{A.9})$$

el ángulo de la tangente se calcula en función del ángulo paramétrico de la elipse no rotada más ángulo, ϕ , de rotación de los ejes.

ANEXO 2

Tabla N° A.2: Modelos empíricos para la variación de la posición de las características antropométricas en función del ángulo de rotación transversal

N° de Orden	Característica antropométrica	Modelo	Valor de parámetros
1	Excentricidad	$e' = a \theta + e$	$a = -\frac{5}{9}$
2	Límite izquierdo boca	$\text{lim_izq_bo}' = a\theta + \text{lim_izq_boc}$	$a = \frac{7}{18}$
3	Límite derecho boca	$\text{lim_der_bo}' = a\theta + \text{lim_der_boc}$	$a = \frac{7}{18}$
4	Límite izquierdo cejas	$\text{lim_izq_cej}' = a \text{lim_iz_cej}(- \theta + 45^\circ)$	$a = \frac{1}{45}$
5	Límite izquierdo central cejas	$\text{lim_izq_cent_cej}' = a\theta + \text{lim_izq_cent_cej}$	$a = \frac{7}{18}$
6	Límite derecho central cejas	$\text{lim_der_cent_cej}' = a\theta + \text{lim_der_cent_cej}$	$a = \frac{7}{18}$
7	Límite derecho cejas	$\text{lim_der_cej}' = \text{lim_der_cej} + (a - b \text{lim_der_cej}) \theta $	$a = \frac{20}{9}$ $b = \frac{1}{45}$

ANEXO 3

Tabla N° A.3: Modelos empíricos para la variación de la posición de las características antropométricas en función del ángulo de rotación sagital

N° de Orden	Característica antropométrica	Modelo	Valor de parámetros
1	Excentricidad	$e' = a\gamma^2 + e$	$a = 0.01375$
2	Límite superior boca	$\lim_sup_boca = a\gamma + \lim_sup_boca$	$a = \frac{1}{4}$
3	Límite inferior boca	$\lim_sup_boca = a\gamma + \lim_sup_boca$	$a = \frac{1}{4}$
4	Límite superior nariz	$\lim_sup_nariz = \begin{cases} \gamma > 0 & a\gamma + \lim_sup_nariz \\ \gamma < 0 & \lim_inf_nariz \end{cases}$	$a = \frac{1}{4}$
5	Límite inferior nariz	$\lim_inf_nariz = \begin{cases} \gamma > 0 & a\gamma + \lim_inf_nariz \\ \gamma < 0 & b\gamma + \lim_inf_nariz \end{cases}$	$a = \frac{1}{4}$ $b = \frac{2}{5}$
6	Límite superior cejas	$\lim_sup_cejas = \begin{cases} \gamma > 0 & a\gamma + \lim_sup_cejas \\ \gamma < 0 & \lim_sup_cejas \end{cases}$	$a = \frac{1}{4}$
7	Límite inferior cejas	$\lim_inf_cejas = \begin{cases} \gamma > 0 & a\gamma + \lim_inf_cejas \\ \gamma < 0 & \lim_inf_cejas \end{cases}$	$a = \frac{1}{4}$