



ESTEREOPSIS I

AUTOR

Thomas Salmon: Northeastern State University, USA

PAR REVISOR

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, USA

GENERALIDADES DE LA PERCEPCIÓN DE PROFUNDIDAD

PERCEPCIÓN VISUAL

- A. Lo que son las cosas (procesamiento de las imágenes)
 - 1. Visión espacial (formación de la imagen retinal, procesamiento neural, sensibilidad al contraste, etc.)
 - 2. Percepción del color
 - 3. Visión temporal
 - 4. Adaptación visual
- B. Dónde están (percepción espacial)
 - 1. Dirección visual
 - Localización oculo céntrica
 - Localización egocéntrica
 - 2. Percepción de la profundidad
 - Claves monoculares de profundidad
 - Claves pictóricas (tamaño, interposición, perspectiva linear, sombras, etc.)
 - Movimiento de paralaje
 - Efecto cinético de profundidad
 - Percepción binocular de profundidad
 - Estereopsis

GEOMETRÍA DE LA ESTEREOPSIS

Como se afirmó antes, la **estereopsis** se considera el beneficio más importante de la visión binocular. Entre los diferentes niveles de la fusión binocular (grados de fusión de Worth), el más alto es la estereopsis. La estereopsis nos proporciona la percepción de profundidad extremadamente fina de cerca y mejora significativamente la percepción del espacio. La prueba de estereopsis es una de las pruebas más importantes que puede hacer en un examen visual pediátrico, ya que proporciona mucha información sobre el desarrollo del sistema visual del niño. La **estereopsis** es el único sentido de la percepción de profundidad que es estimulada por medio de la **disparidad retiniana**.

P Qué es la disparidad retiniana?

R La estereopsis se basa en el hecho de que cada ojo ve el mundo desde una posición ligeramente diferente. Mientras que el movimiento de paralaje, es una señal de profundidad monocular, ofrece diferentes vistas de un objeto en diferentes momentos, la estereopsis se aprovecha del hecho de que nuestros ojos proporcionan diferentes vistas de un objeto a la vez. Esto se conoce como **paralaje binocular**.

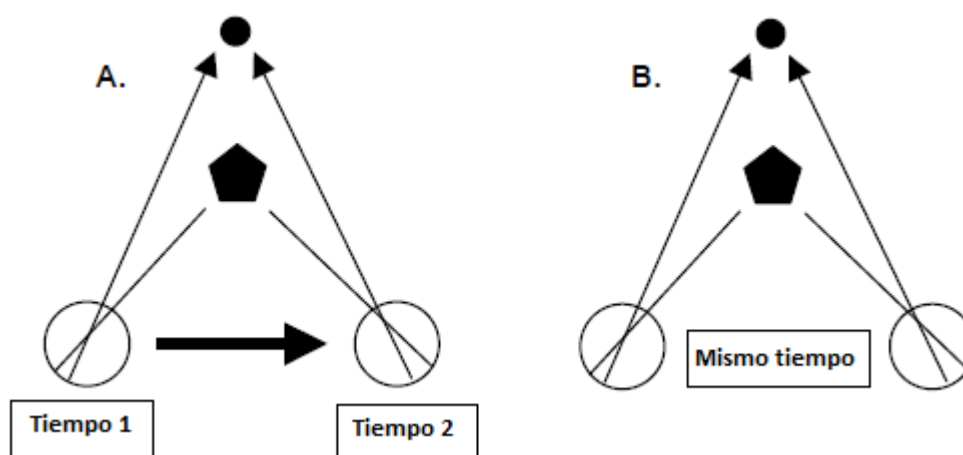


Figura 26.1 Comparación del movimiento de paralaje (A) con el paralaje binocular (B).

Como la estereopsis proporciona un sentido de la percepción de profundidad relativo (no absoluto), sólo puede existir cuando se observan al menos dos objetos. Considerando el caso de los ojos fijando un objeto cercano (se asumirá que no hay disparidad de fijación). Para cualquier otro objeto que se ve en profundidad estereoscópica, éste debe encontrarse antes o detrás del punto de fijación. En el caso de los objetos situados en el campo periférico, deben estar situados distal o proximal a la horóptero para estimular estereopsis.

P Por qué no hay sensación estereoscópica de profundidad entre el punto de fijación y otro punto que esté localizado en el horóptero?

R Cualquier objeto situado fuera de la horóptero tendría un poco de disparidad en las imágenes de la retina de los dos ojos. Es decir, las imágenes de la retina tendrán direcciones visuales (direcciones oculocéntricas) ligeramente diferentes entre los dos ojos. Esta disparidad en la retina es lo que estimula la estereopsis, y la cantidad de disparidad puede ser calculada en el espacio objeto por medio de la geometría mostrada en la figura 26.2.

Cuando dos objetos se encuentran a diferentes distancias, el ángulo de convergencia para cada uno es diferente. El intervalo de profundidad se puede cuantificar como una distancia lineal (dpt Δ), pero por lo general la disparidad se expresa como una diferencia angular. A la disparidad angular en el espacio objeto se le conoce como la **disparidad geométrica**.

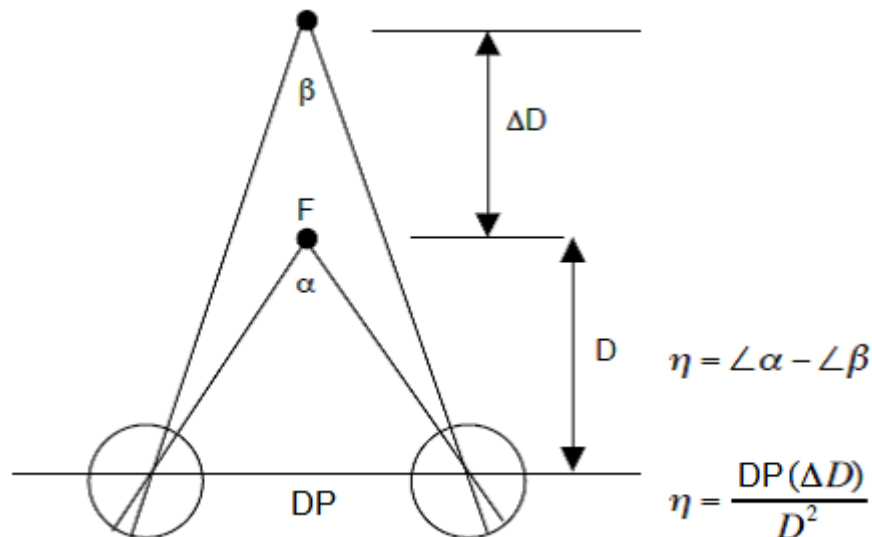


Figura 26.2 Geometría de la estereopsis.

La disparidad geométrica (η) es la diferencia entre los ángulos α y β , que se muestra en la Figura 26.2, arriba. También se puede estimar la disparidad angular usando la fórmula inferior, que utiliza la distancia de desplazamiento (Delta D, ΔD), la distancia de fijación (D) y la Distancia Pupilar. Si todas las unidades lineales son las mismas (es decir, milímetros o metros), el valor de η estará en radianes. La fórmula para el cálculo de la disparidad binocular (η) de la compensación (ΔD) lineal se deriva de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\angle \alpha &= \frac{DP}{D} & \angle \beta &= \frac{DP}{(D + \Delta D)} \\ \eta &= \angle \alpha - \angle \beta \\ \eta &= \frac{DP}{D} - \frac{DP}{(D + \Delta D)} = \frac{DP(D + \Delta D) - DP(D)}{(D + \Delta D)} \\ \eta &= \frac{DP(D) + DP(D + \Delta D) - DP(D)}{D(D + \Delta D)} \\ \eta &= \frac{DP(\Delta D)}{D^2 + D(\Delta D)}\end{aligned}$$

...Ecuación 26.1

Cuando la distancia de fijación está cerca, por ejemplo dentro de la longitud del brazo de distancia, el valor de ΔD será muy pequeño en comparación con D , por lo que el segundo término del denominador, $D(\Delta D)$, será muy cercano a cero. A veces omite para simplificar la fórmula de disparidad así:

$$\eta = \frac{DP(\Delta D)}{D^2}$$

...Ecuación 26.2

Esto le permite calcular la disparidad en radianes (si PD, ΔD y D están todos en las mismas unidades). Para convertir el valor de η a segundos de arco, que es la unidad utilizada normalmente para la disparidad estereoscópica, se debe multiplicar η por 206.265. Por lo tanto a veces se puede ver esta fórmula escrita de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{PD (\Delta D)}{D^2} (206,265) \quad \dots \text{Ecuación 26.3}$$

Note que, para este caso, el valor de η será en segundos de arco.

En algunas referencias de visión binocular, el ángulo de disparidad geométrico se calcula por la diferencia entre los ángulos i y d que se muestran en la figura 26.3. Esto da la misma respuesta que la diferencia entre los ángulos α y β , siempre y cuando se observe una convención de signos consistentes al medir los ángulos.

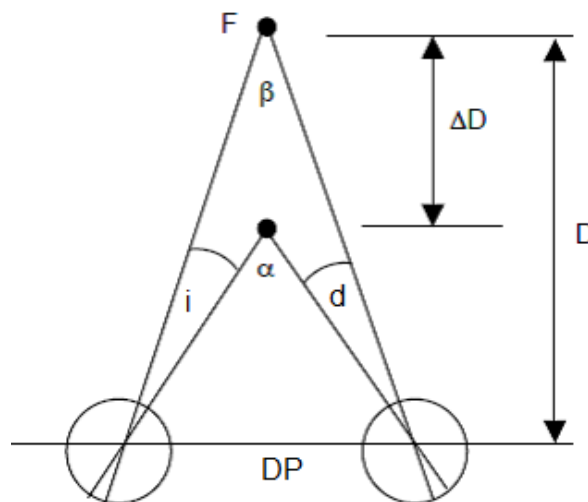


Figura 26.3 Los ángulos referidos en los problemas de cálculo de la estereopsis.

RELACIÓN ENTRE LA DISPARIDAD GEOMÉTRICA Y LA RETINAL

La **disparidad geométrica** es la diferencia de vergencia en los ángulos al punto fijación y de otro objeto. Cuando se habla de estereopsis usualmente se calcula la disparidad del objeto en el espacio, pero se asume que la disparidad geométrica y retinal son iguales. Este es un valor real? , o es sólo una aproximación?

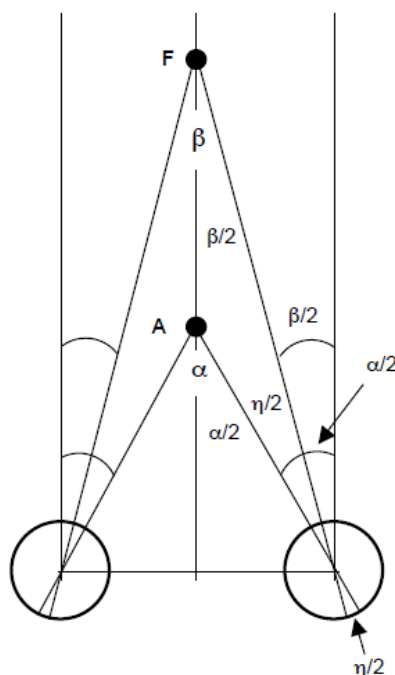


Figura 26.4 Disparidades geométrica y retinal.

Considerando un objeto que está siendo fijado por la fóvea (F) y otro ubicado en la línea media (A). En un diagrama previo, se definió la disparidad geométrica horizontal (η) como ángulo α - ángulo β :

$$\eta = \angle \alpha - \angle \beta \quad \dots \text{Ecuación 26.4}$$

Si se dividen los ángulos α y β en la línea media, se nota que los ángulos interiores alternativos ($\alpha/2$) y ($\beta/2$) se pueden medir desde la línea derecha, la cual va paralela a la línea media. Para el ojo derecho, el medio intervalo angular entre los puntos F y A es:

$$\eta/2 = \angle \alpha/2 - \angle \beta/2 \quad \dots \text{Ecuación 26.5}$$

Nótese que el ángulo $\eta/2$ es el tamaño angular del intervalo (FA) en la retina de cada ojo. En la retina derecha, la imagen del punto A está ubicada a un ángulo de $\eta/2$ hacia la derecha (temporal) a la fóvea. Lo mismo aplica para el ojo izquierdo, excepto que la imagen será una imagen en espejo de la de la derecha. Por lo tanto, en la retina izquierda, la imagen A estará ubicada en un ángulo de $\eta/2$ a la izquierda de la fóvea. La imagen de A cae en un punto retinal no correspondiente, y la disparidad angular total es igual a:

$$\eta/2 + \eta/2 = \eta \quad \dots \text{Ecuación 26.6}$$

Por lo tanto, la disparidad retinal total para el punto A (cuando se fija el punto F) es igual al ángulo de disparidad geométrica η , el cual es la diferencia entre los ángulos α y β . En resumen:

- Cualquier objeto que se encuentra más cerca o más lejos que el punto de fijación tendrá algún ángulo de disparidad geométrica, con respecto al punto de fijación.
- Dado que las fóveas se dirigen hacia el punto de fijación, cualquier objeto situado más cerca o más lejos estimula puntos retinianos no correspondientes.
- Los puntos retinianos no correspondientes son puntos dispares, esto es, tienen diferentes direcciones visuales en cada retina
- La disparidad retiniana angular total (sumada entre los ojos) será igual a la disparidad geométrica

DISPARIDAD BINOCULAR Y PERCEPCIÓN DE LA PROFUNDIDAD

Debido a la separación horizontal de los ojos, las disparidades geométricas horizontales dan lugar a la percepción de profundidad estereoscópica. Disparidades geométricas horizontales son una señal mucho más poderosa de profundidad de cerca.

- Para un intervalo fijo entre dos puntos, los ángulos de paralaje binocular son más grandes para los objetos cercanos.
- Por lo tanto las diferencias entre ángulos de paralaje (disparidad geométrica) son también más grandes. Esto se ilustra en la figura. 5-5 en Borish Clinical Refraction.
- En la figura, la disparidad geométrica está relacionada con la longitud del lápiz.
- El ángulo de disparidad es menor cuando el lápiz está más lejos.
- Si el ángulo de la disparidad se hace más pequeño, parecerá que el lápiz se acorta cuando se mueve más lejos?
- Si las distancias percibidas entre objetos fueran una función directa de la disparidad geométrica horizontal, entonces el lápiz debe parecer acortarse a medida que se aleja.

El hecho de que esto no suceda es evidencia de que el sistema visual depende de otra información además de la disparidad para calcular las distancias relativas o los tamaños de los objetos. El sistema visual hace uso de todas la señales, monoculares y binoculares, (así como otra información, tal como el conocimiento del tamaño del objeto) cuando se calcula la percepción de la distancia.

RESUMEN SOBRE ESTEREOPSIS

- Sensación especial de la percepción de profundidad que es exclusiva de la visión binocular.
- La percepción de profundidad es relativa, no absoluta.
- Requiere de por lo menos dos objetos para comparar.
- Es posible debido al paralaje binocular; lo que quiere decir, que los dos ojos ven los objetos desde diferentes posiciones.
- La imagen del objeto de fijación cae en puntos correspondientes (fóveas), pero los objetos más cercanos o lejanos de la fijación en puntos retinales dispares.
- La disparidad retinal es el estímulo para la estereopsis.
- La disparidad retiniana se puede medir en el espacio objeto. Esto se conoce como la disparidad geométrica. Como se muestra en la Figura 26.3, la disparidad geométrica es igual al ángulo α - β o también se puede especificar como el ángulo i - d . Esto también es válido para dos objetos en la línea media, pero en ese caso el ángulo, i y d tienen signos opuestos. También puede especificar la disparidad en términos lineales, como la distancia ΔD .

La estereopsis es posible en un rango de disparidades de la retina. La disparidad mínima que se puede utilizar para desarrollar un sentido de la estereopsis es de 2-10 segundos de arco. Es posible ver las imágenes en estereopsis con disparidades tan grandes como 600 segundos de arco (10 minutos de arco). En teoría, la zona de estereopsis a cada lado de la horóptero excede el área de Panum ligeramente. Por lo tanto, todavía se puede percibir la profundidad estereoscópica incluso cuando hay diplopía.

La fórmula que relaciona la profundidad linear con la disparidad de fijación.

$$\eta = DP(\Delta D)/D^2$$

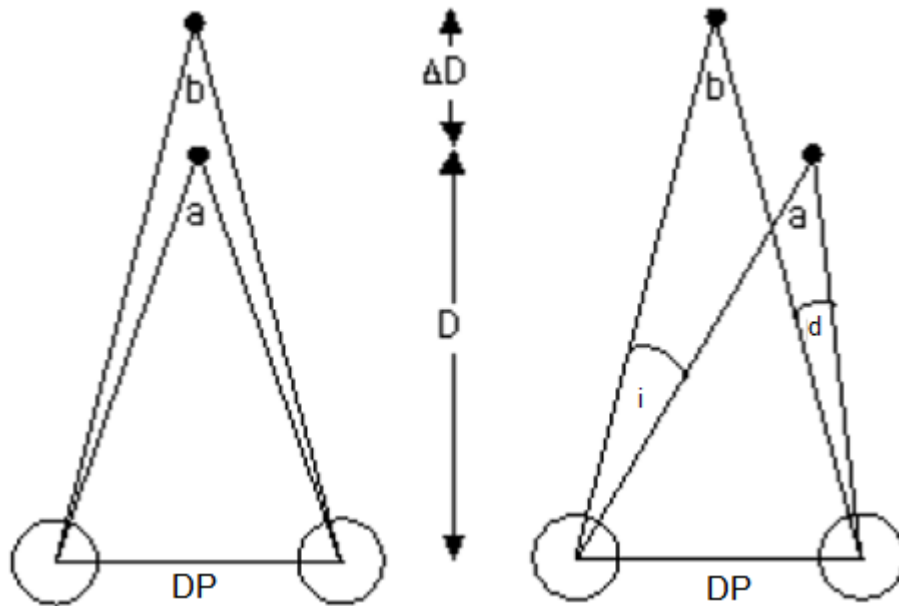


Figura 26.5 Las disparidades provocadas por los objetos a diferentes distancias originan las disparidades retinales y la estereopsis.

Para tener una idea de que tan buena es la estereopsis, se puede calcular lo siguiente:

- P** Cuál es la disparidad angular de un objeto situado 1 mm (ΔD) más cerca del punto de fijación, si la distancia de fijación es 40 cm (400 mm) y la DP es 64 mm?

$$\eta = DP(\Delta D) / D^2 = 64(1) / (400)^2 = 64 / 160000 = 0.0004$$

Esta es la respuesta en radianes. Convertido a segundos de arco. Es equivalente a 82.5, una disparidad amplia!

- P** En teoría, una persona con visión binocular normal estaría en capacidad de detectar una estereopsis tan pequeña como de 10 segundos de arco de disparidad. A cuánto corresponde la distancia lineal (ΔD) para esta cantidad de disparidad? Utilizando los mismos parámetros para DP y D del problema anterior.

Primero, se convierten los 10 segundos de arco a radianes. Lo cual es igual a 0.000048 radianes. Despejando la ecuación para hallar ΔD .

$$\eta(D^2) / DP = \Delta D = (0.000048)(400^2) / 64 = 0.12 \text{ mm}$$

Por lo tanto a una distancia de 40 cm una persona normal debe estar en capacidad de decir que un objeto está más cercano que el punto de fijación, utilizando la estereopsis cuando este ha sido desplazado sólo 0.12 mm. Esto demuestra lo sorprendentemente efectiva que es la estereopsis binocular para juzgar la profundidad a distancias próximas.

- P** Cómo afectarán las diferencias en la DP la estereopsis? (Refiérase a la fórmula.)

LÍMITES DE LA ESTEREOPSIS

Si la cantidad de disparidad es demasiado pequeña, no es suficiente para estimular la estereopsis. Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los libros de texto consideran el umbral disparidad angular para la estereopsis, también conocido como **umbral de estereoagudeza**, de 2-10 segundos de arco, que es un ángulo muy pequeño.

Si un objeto se mueve más lejos del punto de fijación, sus disparidades geométrica y de la retina se incrementarán. Eventualmente la disparidad retiniana será tan grande que superará el área Panum, y el objeto se verá en diplopía. Esto se acerca a la cantidad máxima de disparidad que puede causar la estereopsis. La estereopsis es posible en un rango de distancias que se extienden tanto distales como proximales al horóptero. Esto se ilustra en la figura. 5-6 de Borish's Clinical Refraction, la cual muestra que:

- El punto de fijación y el horóptero se ubican en el centro de la zona de estereopsis.
- A cada lado del horóptero está la zona de fusión, donde las imágenes se ven en haplopi (visión sencilla). Esto corresponde a la extensión espacial del área de Panum.
- Más allá de esta, las imágenes se ven en diplopia.
- El lado izquierdo de la figura 5-6 de Borish's Clinical Refraction muestra una zona estrecha a cada lado del horóptero en el cual la estereopsis patente es posible. Este es el término utilizado por Ogle para la estereopsis de alta calidad, en la cual la magnitud de profundidad percibida del objeto (estereopsis cuantitativa) es proporcional a la disparidad. Esta zona se extiende por una corta distancia más allá del área de Panum.
- Más allá de esta zona en la cual los objetos se pueden percibir burdamente como más cercanos o alejados de la fijación, pero la magnitud de la profundidad no se puede percibir. Debido a que más allá del área de Panum también se ven en diplopia. Esta es conocida como la región de la estereopsis cualitativa o latente.
- Más allá de esto, la disparidad es demasiado grande; los objetos simplemente se ven dobles, pero sin percepción estereoscópica de profundidad.
- Nótese que las zonas son más amplias en el campo visual periférico.

BIBLIOGRAFÍA

- Schwartz S. **Visual Perception - 2nd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, CT, 1999. Chapter 10.
- Steinman et al. **Foundations of Binocular Vision**. McGraw-Hill, New York, 2000. Chapter 7.
- Cline D, Hofstetter HW and Griffin JR. **Dictionary of visual science. 4th Edition**. Butterworth-Heinemann, Michigan. 1997.
- Benjamin, W. **Borish's Clinical Refraction**. WB Saunders, Philadelphia. 2006. Chapter 21.
- Goss DA. **Ocular accommodation, convergence, and fixation disparity: A manual of clinical analysis**. Butterworth-Heinemann, Michigan. 1995.
- Kaufmann PL, Alm A and Francis HA. **Adler's Physiology of the Eye, 10th Ed**. Mosby, St. Louis, 2003.
- Schor CM and Cuifreda KJ. **Vergence eye movements: Basic and clinical aspects**. Butterworth, Michigan. 1983.
- Von Noorden GK. **Binocular Vision and Ocular Motility - 5th Edition**. Mosby, St. Louis. 1996.
- Ciuffreda KJ and Tannen B. **Eye Movement Basics for the Clinician**. Mosby, St. Louis, 1995.
- Griffin JF. **Binocular Anomalies - Diagnosis and Vision Therapy, 3rd Edition**, Butterworth-Heinemann, 1995.
- Kandel. **Essentials of Neural Science and Behavior**, Appleton & Lange, 1995.
- Reading RW. **Binocular Vision**. Butterworth Publishers, Woburn, MA, 1983.
- Hart W. **Adler's Physiology of the Eye, 9th Ed**. Mosby Yearbook, St. Louis. 1992.
- Moses, RA. **Adler's Physiology of the Eye, 8th Ed**. Mosby Yearbook, St. Louis. 1987.