



INTRODUCCIÓN A LA NATURALEZA RETINIANA DUAL

AUTOR

Thomas Salmon: Northeastern State University, EEUU

PAR REVISOR

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, EEUU

ESTE CAPÍTULO INCLUIRÁ UNA REVISIÓN DE

- Naturaleza dual de la retina
- Comparación entre conos y bastones
- Rodopsina
- Sensibilidad espectral del sistema escotópico

NATURALEZA DUAL DE LA RETINA

Al final del capítulo 6, se discutió acerca de la iluminancia retiniana, que es la cantidad de luz que incide en la retina. La unidad de **iluminancia retiniana es el troland** y el cálculo de la iluminancia retiniana es simple: (Schwartz, 2004 C. 3

Iluminancia retiniana (en trolands) = luminancia del objeto (en nits) x área pupilar (in mm²)

En un ejemplo en el capítulo anterior, se encontró que al observar un trozo de papel blanco a la luz del sol (10000 nits, 2mm diámetro pupilar), la iluminancia retiniana es igual a 31400 trolands. Al observar un trozo de papel a la luz de la luna (00001 nits, 8mm de diámetro pupilar), la iluminancia retiniana es de 0005 trolands.

¿Qué tan mayor es la iluminancia en condiciones fotópicas versus escotópicas?

Razón = $31\,400 / 0.005 = 6\,280\,000$

No tenemos ninguna dificultad para ver un trozo de papel bajo la luz del sol o de la luna, a pesar de que la iluminancia retiniana para un trozo de papel bajo la luz del sol es aproximadamente 6.3 millones más brillante (31400/0.005 veces; 6.8 unidades logarítmicas) que la iluminancia bajo la luz de la luna.

El sistema visual humano es capaz de funcionar en rangos impresionantemente grandes de iluminación- más de 10 unidades log (100dB) de cambio en la iluminación! Es decir, 10 000 000 000 (10 billones) de unidades en el cambio del nivel de luz! Las cámaras hechas por el humano que usan rollo, video o electrónica digital tienen dificultades para igualar el **rango dinámico** del humano. Citando de un artículo en línea acerca de un sensor de imagen de rango dinámico amplio.

NATURALEZA DUAL DE LA RETINA (CONT.)

El rango dinámico es la razón desde la imagen más brillante hasta la imagen más oscura que pueda ser capturada por un sistema de imagen. Una intensidad luminosa mayor a la imagen más brillante posible hace que el sensor se sature, mientras que una intensidad luminosa menor que la imagen más oscura posible no será registrada por el sensor. Ambas condiciones distorsionan la imagen, escondiendo información vital que está por fuera del rango dinámico del sensor (<http://www.videsignline.com/showArticle.jhtml?articleID=181502565>).

Otro artículo del 5 de febrero del 2008, describió como un ingeniero de panasonic estaba intentando mejorar el rango dinámico de las cámaras digitales combinando múltiples fotos, cada una tomada a un distinto nivel de exposición. Al hacer esto se logró conseguir un rango dinámico de 140 decibelios contra un rango de 60 dB de sensores comunes. A pesar de los esfuerzos realizados como los super sensores CCD Fujifilm, el brillo de las cámaras se ve frustrado por el rango dinámico de los sensores de las imágenes que son significativamente más débiles de lo que el ojo humano puede detectar. Aunque la investigación de Panasonic es prometedora, los resultados solo muestran imágenes en blanco y negro aplicables para cámaras de seguridad y automotrices “ de acuerdo con los investigadores” (http://news.cnet.com/8301-13580_3-9864843-39.html).

Las pantallas de los computadores también tienen un problema. ¿Cómo pueden mostrar un amplio rango de niveles de brillo, si tienen un rango dinámico que es mucho menor al del ojo humano?

También citando de un artículo de wikipedia sobre rango dinámico:

En la práctica es difícil conseguir un rango dinámico completo visto por seres humanos usando dispositivos tecnológicos, ya que la mayoría de los equipos de reproducción electrónica son lineales en lugar de logarítmicos como la percepción humana. El audio y el video reproducidos electrónicamente generalmente llevan algún truco para encajar material original con un amplio rango dinámico en un rango más limitado que pueda reproducirse con mayor facilidad: esto se conoce como compresión dinámica. Por ejemplo, una pantalla LCD de buena calidad tiene un rango dinámico de alrededor de 1000 o 30 dB.

(http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_range#Photography)

Las cámaras de rollo tienen un rango dinámico de alrededor de 3 unidades logarítmicas (30dB) y los sensores electrónicos como los que tienen las cámaras digitales o de video tienen un rango de alrededor de 6 unidades logarítmicas (60dB) ¿Cómo se puede maximizar el rango dinámico de una cámara? Esto puede lograrse de las siguientes formas:

1. Cambiando la apertura de la cámara
2. Cambiando la velocidad del obturador (tiempo de exposición)
3. Por ejemplo en las cámaras de rollo, un rollo ISO 400 es más sensible y útil para tomar fotografías en condiciones de baja iluminación. El rollo ISO 100, por otro lado, es útil para tomar fotografías en condiciones de alta luminosidad.

¿Cómo hace el sistema visual para adaptarse a un rango tan extremo (10 billones) de niveles de luz? ¿Qué tanto puede lograr el cambio del tamaño pupilar? ¿Puede esto explicar la capacidad del ojo para operar en dicho rango de iluminación? ¿Cambiando el tamaño pupilar, el ojo puede ajustar la iluminancia retiniana en este rango? Esto puede investigarse calculando la iluminancia retiniana para tamaños pupilares extremos, dado un objeto con una luminancia determinada.

Ejemplo

Suponga que tiene un trozo de papel con una luminancia de 100 nits. Calcule la iluminancia retiniana para un diámetro pupilar de 9 mm.

$$\text{trolands} = (\text{luminancia en nits}) \times (\text{área pupilar en mm})$$

$$\text{área pupilar} = \pi r^2 = (3.14)(4.5)^2 = 63.62 \text{ mm}^2$$

$$\text{trolands} = (100)(63.62) = 6,362 \text{ trolands}$$

Repita el mismo cálculo para el mismo objeto, pero, con un diámetro pupilar de 2mm.

$$\text{trolands} = (\text{luminancia en nits}) \times (\text{área pupilar en mm})$$

$$\text{área pupilar} , \pi r^2 = (3.14) (1)^2 = 3.14 \text{ mm}^2$$

$$\text{trolands} = (100)(3.14) = 314 \text{ trolands}$$

NATURALEZA DUAL DE LA RETINA (CONT.)

La razón entre estas dos iluminancias causadas por diámetros pupilares extremos es de $6\,362:314 = \sim 20:1$. Es decir, que la pupila es capaz de ajustar la iluminancia retiniana en un factor de 20, lo que es igual a 1.3 unidades log (13 dB). ¿Cómo puede entonces el ojo adaptarse a un rango de 10 unidades log (100dB) de iluminancia retiniana?

El resto del proceso de adaptación a los diferentes niveles de luz lo realiza la retina. Es como si la retina tuviera diferentes tipos de rollos para diferentes niveles de luz, excepto, que el sistema de adaptación de la retina a diferentes niveles de luz es mucho más complejo que el rollo de una cámara.

La adaptación visual es tan efectiva porque tenemos dos tipos de fotorreceptores que están diseñados para actuar a diferentes niveles de luz. Cada tipo de fotorreceptor es capaz de adaptarse a un amplio rango de niveles de luz y en conjunto le brindan al sistema visual un rango dinámico enorme:

- El **sistema fotópico** está diseñado para operar en condiciones de alta luminosidad y recibe el estímulo de los fotorreceptores cono.
- El **sistema escotópico** está diseñado para operar bajo condiciones de baja iluminación y recibe el estímulo de los fotorreceptores bastones.

Ya que tenemos dos sistemas diseñados para operar a lo largo de diferentes rangos de iluminancia retiniana, los científicos dicen que tenemos una **retina dual**. El rango de iluminación en el que los sistemas fotópico y escotópico operan, coinciden un poco, así que para niveles intermedios de iluminación, tanto el sistema fotópico como escotópico operan al mismo tiempo. La visión en estos dos rangos de iluminación se llama visión **mesópica** (ver tabla de Schwartz, 2004, 3-1)

COMPARACIÓN ENTRE CONOS Y BASTONES

Los fotorreceptores retinianos, conos y bastones, tienen similitudes, asimismo tienen características diferentes en términos de estructura celular y función fisiológica.

SIMILITUDES EN ESTRUCTURA CELULAR ENTRE CONOS Y BASTONES

(Ver Schwartz, 2004 C. 3, Figs. 3-1, 3-2)

- Células tubulares largas
- **Segmento externo** (cerca al EPR) contienen pilas de componentes en forma de disco
- **Segmento interno** (hacia el vítreo) Contiene organelos celulares como en núcleo y las mitocondrias
- Procesos ciliares que conectan los segmentos internos y externos
- Sinapsis con células bipolares y otras células **en la capa plexiforme externa**

SEGMENTOS EXTERNOS

Enfocaremos nuestra atención en el segmento externo de los fotorreceptores, porque los discos en los segmentos externos contienen los **fotopigmentos** que inician el proceso fisiológico de la visión capturando la luz. El segmento externo de los conos es cónico (forma de cono), mientras que el segmento externo de los bastones es más tubular (Schwartz Fig 3.1) Sin embargo, esto no es igual para todos los conos; en la fovea, donde los conos están mayormente agrupados, existen más tipos de conos con forma de bastón.

COMPARACIÓN ENTRE CONOS Y BASTONES

Discos en los segmentos externos:

- Contienen los fotopigmentos que capturan la luz y empiezan la **fototransducción**. La fototransducción es el proceso mediante el cual la energía lumínica es convertida en una señal eléctrica que es transmitida a través de las neuronas al cerebro. Ahondaremos en este proceso más adelante.
- Formado por un plegamiento hacia adentro de las membranas celulares de los segmentos externos cercanos a los procesos ciliares.
- Se producen continuamente y migran hacia el EPR formando una pila de discos.
- En el segmento externo de los bastones, los discos se separan de la membrana celular y se convierten en estructuras flotantes. Un bastón tiene alrededor de 1000 discos
- En los conos, los discos se mantienen unidos a la membrana celular.
- Al final de la célula, los discos gastados se pierden y son fagocitados por el EPR.
- La fagocitosis es fundamental para mantener la salud y el metabolismo normal del fotorreceptor. Sin la fagocitosis, los desechos metabólicos como los radicales libres se acumulan y dañan los fotorreceptores. Este es uno de los mecanismos posibles para las alteraciones retinianas en la retinitis pigmentosa (RP)
- Los discos se gastan durante el día alrededor de un 10%
- Los conos generalmente se terminan de gastar en la noche.
- La terminación sináptica del bastón tiene forma esférica (esférula), la terminación sináptica de los conos es más plana (pedículo)

DISTRIBUCIÓN RETINIANA DE LOS CONOS Y BASTONES

Schwartz en la Fig 3-7 muestra la distribución relativa de los bastones y los conos en una zona de la retina. Esto es similar a la Fig 4.2 en el capítulo 4. Como se discutió anteriormente, los bastones alcanzan su concentración máxima a los 20° periféricos de la fovea. En este punto existen alrededor de 150000 bastones por mm². En dos zonas de la retina no hay bastones- en el nervio óptico y en la fovea.

Los conos tienen una densidad máxima en la fovea (150 000 conos por mm²), pero, note que los **conos siguen estando presentes en la periferia**, aunque su concentración es menor. Esta es la razón de por qué tenemos visión del color en la periferia. Si usted considera el número total de conos en toda la retina, solo el 4% de los conos están en la fovea y el 96% están en la periferia.

RODOPSINA

Cuando la luz llega a la retina, el proceso fisiológico de la visión inicia cuando una molécula de fotopigmento en el segmento externo captura un fotón. Esto dispara la reacción en cadena biomecánica conocida como fototransducción. El fotopigmento que captura los fotones en los bastones se llama rodopsina.

En su estado de reposo, antes de absorber la luz, la rodopsina es morada y también se le conoce como el morado visual. Al exponerse a la luz, la rodopsina la absorbe y luego cambia tornándose de color amarillo. Una molécula de rodopsina es capaz de capturar un solo fotón y una vez que ha cambiado su estructura no es capaz de capturar otro fotón. Ya que la rodopsina activa es transparente, la luz puede pasar a través de ella y ser capturada por la siguiente molécula de rodopsina disponible

Con el tiempo, la rodopsina se regenera y vuelve a su estado de reposo (morado) en donde está lista de nuevo para absorber la luz. La vida media para la recuperación de la rodopsina es de 5 minutos, por tanto la mitad de la rodopsina que se activó vuelve al reposo a los 5 minutos.

El ojo contiene alrededor de 120 millones de bastones. Cada bastón contiene alrededor de 1000 discos y cada disco contiene alrededor de 10000 moléculas de rodopsina. Por tanto el ojo tiene un gran número de moléculas de rodopsina (10¹⁵) que están regenerándose continuamente. El ojo fue diseñado con una capacidad tremenda para absorber la luz

RODOPSINA (CONT.)

La eficiencia con la que la rodopsina absorbe la luz varía con la longitud de onda. La rodopsina es más efectiva absorbiendo la luz a 507 nm y su eficiencia en la absorción disminuye en longitudes de onda corta y larga. El espectro de absorción relativo de la rodopsina puede determinarse con el siguiente experimento ilustrado en Schwartz Fig 3-3.

- Haga incidir una luz monocromática (una longitud de onda) determinada sobre un frasco de rodopsina.
- Mida con un radiómetro la cantidad de luz transmitida
- La luz que no fue transmitida fue absorbida. Una alta transmisión se corresponde con una baja absorción y viceversa. La Fig 3-3 muestra la curva de transmisión de rodopsina. La curva de transmisión para la rodopsina se ve similar a la que se encuentra a la izquierda en la Figura 7-2.
- La curva recíproca a la curva de transmisión es la de la absorción, que para la rodopsina es similar a la gráfica de la derecha. Figure 7-2. (Schwartz Fig. 3-3 B)
- El pico de absorción para la rodopsina es a ~507 nm

Sin importar la longitud de onda, una vez que un fotón ha sido absorbido por la rodopsina, existe una sola respuesta, la rodopsina cambia su color y el proceso de la fototransducción inicia. Después de que la molécula se blanquea, sin importar la longitud de onda, el proceso fisiológico subsecuente es el mismo. Por tanto, el proceso de la fototransducción, una vez iniciado, no retiene ninguna información acerca de la longitud de onda que inició el proceso.

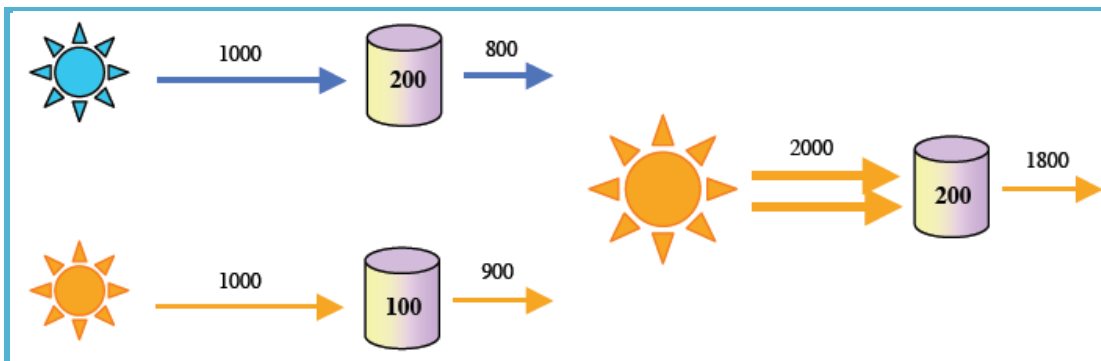


Figura 7-1: Principio de univariancia. La rodopsina puede absorber los fotones de manera más eficiente en ciertas longitudes de onda (en la zona superior izquierda; el color azul representa 507nm) que en otras (En la zona inferior izquierda que representa 580nm), pero, la respuesta de un bastón a una longitud de onda eficiente (507 nm) puede igualarse aumentando la radiancia de una longitud de onda (derecha, color naranja con mayor radiancia)

Ejemplo

Si se irradia una luz a la retina de 1000 cuantos con una longitud de onda de 507nm, se podrían activar satisfactoriamente aproximadamente 200 moléculas de rodopsina (absorción 200, transmisión 800). Si se irradia la misma parte de la retina con 1000 cuantos de luz a 580nm, se pueden activar 100 moléculas de rodopsina, ya que las longitudes de onda larga se absorben con menor efectividad. Si se duplica la irradiancia de 580 nm a 2000 cuantos, se activarían aproximadamente el doble de moléculas de rodopsina (200). Esto es igual al resultado de activación retiniana con 1000 cuantos a 507 nm. Por tanto, una vez absorbidos, la respuesta fisiológica del sistema visual es la misma. Esto se conoce con el nombre del **principio de la univariancia** (Fig 7-1)

Ya que el sistema escotópico (bastones) produce una respuesta fisiológica sin importar la longitud de onda y es posible igualar la respuesta de salida para todas las longitudes de onda ajustando el brillo de la luz, el sistema escotópico no transmite información sobre longitudes de onda y es ciego al color.

SENSIBILIDAD ESPECTRAL DEL SISTEMA ESCOTÓPICO

La absorción espectral de los bastones (rodopsina) está estrechamente relacionada con la sensibilidad espectral del sistema escotópico. Nuestra habilidad para ver las luces de baja intensidad usando el sistema escotópico varía en función de la longitud de onda. Si se realiza un experimento para determinar la mas baja iluminación de una longitud de onda que una persona puede detectar, se estaría midiendo su *umbral de detección* para dicha longitud de onda. La Figura 7-2 izq (similar a la figura 3.4 Schwartz A) muestra como varía el **umbral** en función de la longitud de onda. El inverso del *umbral* es la *sensibilidad* y la **sensibilidad** espectral del sistema escotópico se muestra en la figura 7-2 der (similar a Schwartz Fig. 3-4 B).

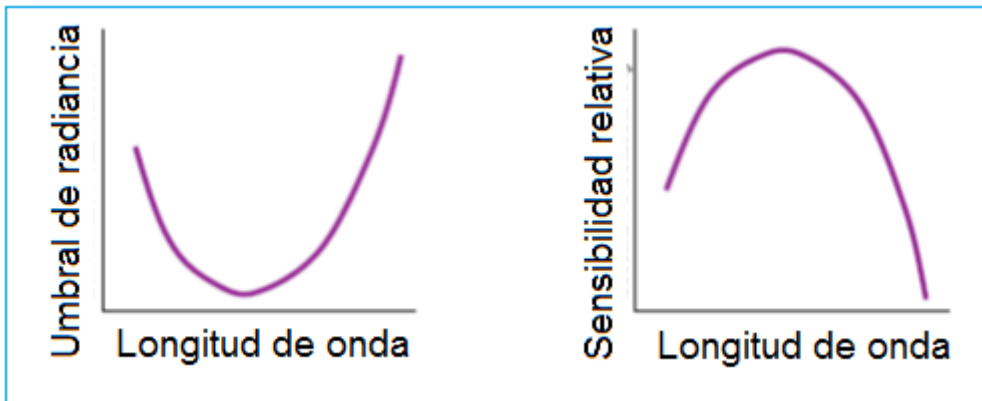


Figura 7-2: Derivación de la función de sensibilidad escotópica espectral

Muchos experimentos psicofísicos miden un umbral visual, pero, convierten el dato a sensibilidad para mostrarlo. Es importante recordar que **umbral y sensibilidad tienen una relación recíproca**. Ya se había hablado del mismo concepto cuando se tocó el tema de campos visuales. En un campo visual, se mide el umbral del paciente para detectar un pequeño punto luminoso, pero, lo que realmente se quiere saber es que tan sensible es el sistema visual en su campo.

Otro ejemplo clínico es un test llamado **sensibilidad al contraste**, que será estudiado en mayor detalle más adelante en este curso. La sensibilidad al contraste brinda información más detallada acerca del desempeño visual, incluso más detallada que la **agudeza visual**. La sensibilidad al contraste de un paciente se determina midiendo el mínimo contraste que éste puede ver, es decir, *el umbral de contraste*. El umbral del contraste (Michelson) debe ser un número pequeño como 0.01 y el inverso de este valor es la sensibilidad al contraste.

La función de umbral espectral y la transmisión espectral son similares, incluso la sensibilidad espectral y la absorción espectral son similares. Esto es porque la absorción de la rodopsina es mayor (pero no el único) factor que determina la sensibilidad del sistema escotópico.

LECTURAS RECOMENDADAS/REFERENCIAS

- Schwartz SH. Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004
- EE Times, 2006, Wide dynamic range image sensor-processor improves security video, other apps, accessed at http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273610
- Cnet news, 2008, *Panasonic sensor tackles key photo problem--dynamic range*, accessed at http://news.cnet.com/8301-13580_3-9864843-39.html