



La visión del movimiento (I)

M.D. de Fez* y P. Capilla**

*E.U. de Óptica y Optometría. Universitat de Alicante

**Departament. d'Òptica. Universitat de Valencia

La sensibilidad al movimiento es un aspecto fundamental de la visión. Por un lado analizamos el movimiento de los objetos de nuestro campo visual para poder interaccionar con ellos. Por otro, al movernos dentro de nuestro entorno, se producen también cambios en la imagen retiniana de los objetos que nos rodean aunque éstos permanezcan estáticos. En ambos casos se producen cambios espaciotemporales de luminancia en la imagen percibida y estos cambios son la fuente de información sobre la disposición del entorno y el movimiento del observador con respecto a ese entorno. El análisis de esta información permite establecer la existencia de los límites de detección del movimiento y las características diferenciales entre los movimientos reales y los movimientos aparentes.

Análisis del movimiento por el sistema visual

El análisis del movimiento de los objetos de nuestro entorno es una de las tareas más importantes y complejas que realiza nuestro sistema visual. Para los animales y para nosotros, los cambios en el mundo exterior son mucho más importantes que las condiciones estáticas; pensemos tanto en la supervivencia del depredador como en la de la presa. La interacción con nuestro entorno va a depender del conocimiento y del análisis de la información

obtenida a partir de los cambios que se produzcan en las imágenes proyectadas en nuestra retina. La finalidad principal de obtener la información sobre el movimiento es, sin lugar a dudas, la interacción de la persona con los objetos del entorno. Se pueden contemplar dos casos diferentes, un observador estacionario o un observador que se mueve en un entorno estacionario.

Para un observador estacionario

Si el observador es estacionario, la información que se deduce de los cambios espaciotemporales que ocurren en la retina nos sirve para saber cómo se mueven los objetos del entorno y poder interaccionar con ellos. Obviamente estos cambios van a depender de la distancia al objeto (fig. 1). Hay razones por las que resulta importante conocer la velocidad de los movimientos, por ejemplo, para poder realizar movimientos oculares de fijación o de

Correspondencia

M.D. de Fez
Escuela Universitaria de Óptica y Optometría
Apartado 99
03080 Alicante
Dolores.Fez@ua.es

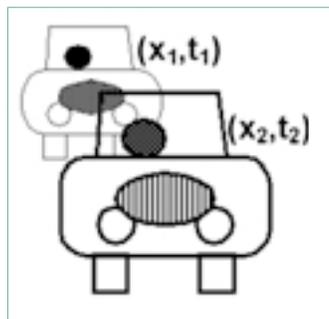


Fig. 1. Para un observador estacionario, la información de los cambios espaciotemporales en la retina sirve para saber cómo se mueven los objetos del entorno y poder interactuar con ellos.

rastreo y no precisar de movimientos bruscos (sacádicos), para evitar un choque con un objeto que se nos viene encima, para conducir, etc. El objetivo es mantener la imagen en la fóvea por razones obvias: es aquí donde disponemos de las mejores prestaciones de nuestro sistema visual (máxima agudeza visual, máxima sensibilidad al contraste, mejor detectabilidad en general de patrones espaciotemporales). En la extrafóvea estas características decaen de manera importante.

Para un observador moviéndose en un entorno estacionario

Si el entorno es estacionario y es el observador el que se mueve, el mismo análisis nos servirá para posicionar los objetos en el entorno y poder interactuar con ellos. Las velocidades de las distintas partes de la imagen retiniana están relacionadas con la distancia de los objetos correspondientes y con la velocidad del propio observador (en módulo y dirección). Haciendo uso pues de tal información, el observador puede controlar la trayectoria de su propio movimiento (en módulo y dirección) en aquellas tareas que lo requieran, por ejemplo, para modificar el tiempo de impacto contra una superficie. Se puede interpretar que el observador móvil genera un patrón de movimientos (o de velocidades) de los objetos que están en su campo visual y ese patrón es lo que utiliza de forma dinámica para ajustar su trayectoria. En las figuras 2 y 3 se muestran dos ejemplos en los que un sujeto se está desplazando horizontalmente hacia el horizonte (típicamente un desplazamiento en coche) y verticalmente hacia el suelo (un helicóptero aterrizando).

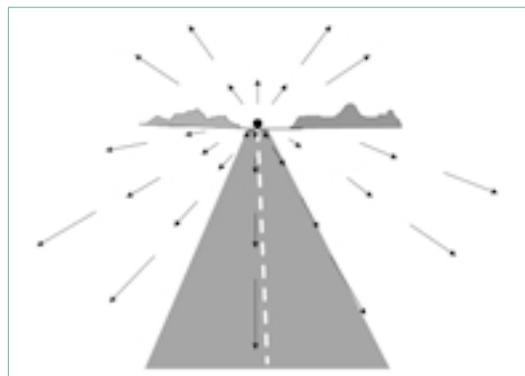


Fig. 2. Observador moviéndose en un entorno estacionario, desplazándose horizontalmente hacia el horizonte (típicamente un desplazamiento en coche).

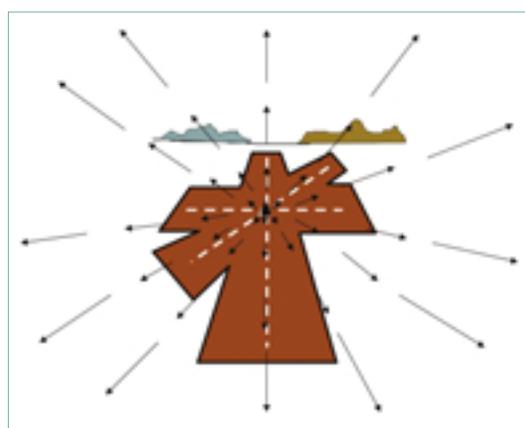


Fig. 3. Observador moviéndose en un entorno estacionario, desplazándose verticalmente hacia el suelo (por ejemplo, un helicóptero aterrizando).

Sobre la complejidad de la tarea: interacciones del movimiento con otras dimensiones de la percepción

La percepción del movimiento es una tarea compleja. En la figura 4 se muestran algunos ejemplos. Si fijamos la mirada en el pájaro y el coche atraviesa nuestro campo visual, la imagen del coche proyectada en la retina sufre un desplazamiento, marcado por la flecha (fig. 4a). El movimiento de la imagen proyectada en retina nos permite decir que el coche se mueve de derecha a izquierda. Supongamos ahora que fijamos la mirada en el coche, ¿qué es lo que ocurre con la imagen en la retina? (fig. 4b). Ahora el ojo debe girar para seguir el movimiento y mantener la imagen en la misma zona de la retina, pero es ésta la que ha cambiado



de posición. La traslación de la retina nos permite decir que el coche se mueve de derecha a izquierda. Pero aún nos queda una tercera forma de seguir el movimiento del coche (fig. 4c). Supongamos que los ojos permanecen quietos y es la cabeza la que gira para seguir el movimiento. De nuevo, el desplazamiento experimentado, en este caso por la cabeza, nos permite decir que el coche se desplaza de derecha a izquierda. Otro aspecto que el sistema visual tiene en cuenta es la distancia a la que se encuentra el objeto del ojo (fig. 4d). Supongamos el caso en el que fijamos la mirada en el pájaro y pensemos en dos coches a diferentes distancias. Si los coches se mueven a la misma velocidad, el ángulo subtendido por el desplazamiento entre dos instantes determinados es diferente en cada caso, es decir, la información sobre la retina es diferente. Sin embargo, el observador percibe la misma velocidad para ambos. Lo que está ocurriendo es que la información de la profundidad también está de alguna manera actuando. Y es que la información sobre el movimiento interacciona con la información relativa, no sólo a la profundidad, sino a cualquier otra dimensión de la percepción visual, incluida la forma o el color. Más adelante veremos algunos ejemplos.

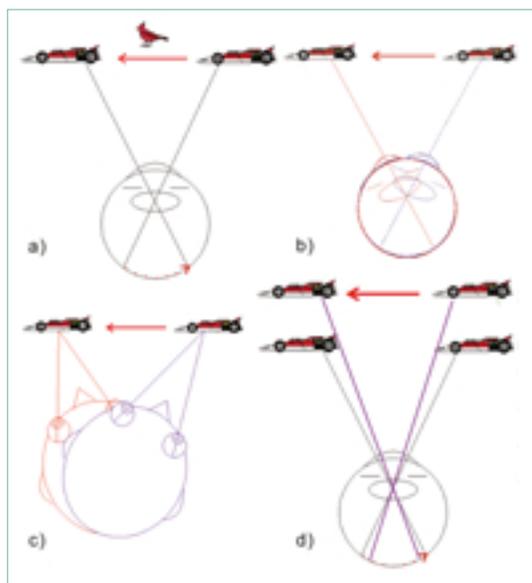


Fig. 4. Complejidad de la tarea. a) Punto de fijación en el pájaro, el coche atraviesa el campo visual y la información se recoge directamente en la retina. b) Punto de fijación en el coche, la información del movimiento la proporciona el giro del ojo. c) Punto de fijación en el coche, la información del movimiento la proporciona el giro de la cabeza. d) La información de la profundidad también está de alguna manera actuando.

Los límites del movimiento

La detección de un movimiento depende de una gran cantidad de factores. Consideremos un objeto sencillo, por ejemplo, un circulito o una barra, que se desplaza delante de los ojos de un observador, desde el instante $t=0$, durante un tiempo Dt . Para saber cual ha de ser la velocidad a la que, como mínimo, ha de desplazarse el objeto para que el movimiento sea percibido, le pediremos a nuestro observador que nos diga hacia que lado, derecha o izquierda, se ha desplazado el objeto. Repetiremos el ejercicio N veces con diferentes valores de la velocidad y en cada presentación cambiaremos aleatoriamente el sentido del movimiento. Aquella velocidad para la que el observador acierte, por ejemplo, un 75% de las veces, cual ha sido el sentido del movimiento, lo consideraremos como el "umbral del movimiento". Sin embargo, se pueden definir hasta cuatro tipos distintos de límites de movimiento, a saber:

- *Límite inferior de movimiento*: la velocidad mínima a partir de la cual percibimos el movimiento.
- *Límite superior de movimiento coherente*: velocidad máxima a la que todavía percibimos un movimiento coherente del objeto, esto es, el objeto se percibe sin distorsiones espaciales.
- *Límite superior de movimiento conservando el patrón espacial*: velocidad máxima a la que percibimos movimiento, aunque ya sin información sobre la forma del objeto.
- *Límite de visibilidad absoluta del movimiento*: velocidad a partir de la cual ya no somos capaces de percibir el movimiento.

Aunque el estudio de estos cuatro límites permite analizar diferentes aspectos de la naturaleza de los mecanismos de visión de movimientos, centraremos nuestra atención en el límite inferior. Las medidas realizadas con redes sinusoidales que se muestran en la figura 5 indican que para un amplio rango de frecuencias espaciales y contrastes, empezamos a ver movimiento cuando la velocidad alcanza un cierto valor mínimo y constante (Harris, 1984, Johnston y Wright, 1985). Este resultado sugiere la existencia de un mecanismo limitado por la velocidad. Como veremos más adelante, este comportamiento es sorprendente ya que

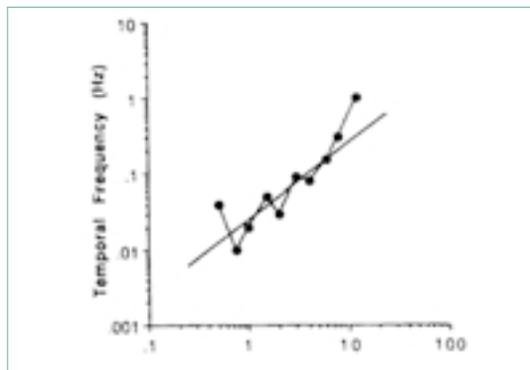


Fig. 5. Límite inferior de movimiento (Harris, 1984).

diferentes experimentos psicofísicos (medidas de sensibilidad al contraste, postefectos de movimiento) parecen, por el contrario indicar que es la frecuencia temporal y no la velocidad el parámetro realmente relevante. Por otra parte, existen asimismo evidencias que apuntan hacia un mecanismo diferente que operaría en visión central y especialmente para estímulos breves (hasta 0,5 segundos) y que no estaría limitado ni por la velocidad, ni por la frecuencia temporal, sino por el desplazamiento (Boulton, 1987). Presumiblemente estos dos mecanismos operarían en paralelo y el límite estaría determinado por el más sensible de los dos. El mecanismo limitado por la velocidad podría ser el dominante cuando el estímulo es visto durante un tiempo prolongado y el mecanismo limitado por el desplazamiento sería más sensible cuando el movimiento percibido es especialmente breve. Esta posibilidad es consistente con los resultados que se muestran en la figura 6 (Leibowitz, 1955). Alternativamente, se ha sugerido una segunda hipótesis según la cual, el mecanismo limitado por el desplazamiento sería más sensible con frecuencias espaciales altas y frecuencias temporales bajas, o lo que es lo mismo, para movimientos lentos, mientras el mecanismo limitado

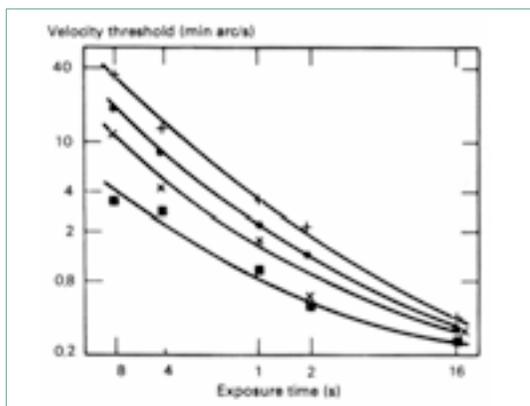


Fig. 6. Velocidad límite en función del tiempo de exposición (Leibowitz, 1955).

por la velocidad lo sería con frecuencias espaciales bajas y frecuencias temporales altas, o lo que es lo mismo, con movimientos de velocidades medias y altas (Bonnet, 1977). Evidencias en favor de esta hipótesis proceden de distintas medidas del umbral de contraste realizadas con un amplio conjunto de combinaciones de las frecuencias espacial y temporal en las que se pedía al observador que detectara el movimiento del patrón espaciotemporal. Téngase en cuenta que en el umbral de detección de un patrón espaciotemporal, puede detectarse el movimiento o el patrón espacial, por lo que es importante que el observador entienda cual es la tarea que ha de realizar. Cuando las medidas de Burr y Ross se representan en función de la frecuencia temporal para cada valor constante de la velocidad (fig. 7) se encuentra que todas las velocidades producen una misma función de sintonizado salvo justamente cuando la velocidad es especialmente baja (Burr y Ross, 1982). Por otra parte, los umbrales que se obtienen cuando la velocidad es baja se desvían de manera significativa de las predicciones que se derivarían de un modelo tradicional para la detección del movimiento (Murray et al., 1983).

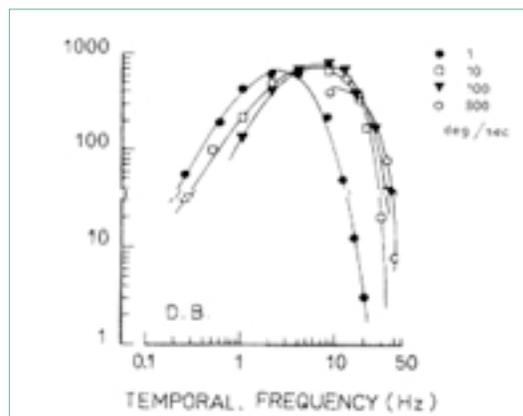


Fig. 7. Medida del contraste umbral en función de la frecuencia temporal para diferentes velocidades (en grados/seg). Sólo para velocidades bajas la función de sintonizado es sensiblemente diferente al resto (Burr y Ross, 1982).

Movimiento real y movimiento aparente

Existen dos tipos de movimiento. Por una parte, un movimiento real que es percibido como tal: cuando el coche, (esto es, un estímulo físico), se mueve, cambia su posición realmente en el espacio objeto. Pero también hemos de tener en cuenta que muchos de los movimientos que experimentamos pueden ser clasificados como aparentes, es decir, que es posible percibir



movimiento cuando el estímulo no se está moviendo, cuando no hay cambio de posición en el espacio objeto. Veamos a continuación algunos ejemplos.

Movimientos aparentes clásicos

Quizás el movimiento aparente por antonomasia es el denominado efecto ϕ , descubierto por Wertheimer en 1912 (Wertheimer, 1912). Por ejemplo, cuando dos luces separadas una cierta distancia son encendidas secuencialmente con determinado intervalo, se tiene la sensación de movimiento aunque ningún objeto se está desplazando. Este efecto se denomina también movimiento estroboscópico y, comúnmente, es usado para crear esa ilusión de movimiento mediante luces en la televisión, películas y monitores de ordenador. También lo hemos visto en la iluminación festiva de calles o en la navideña de algunos establecimientos comerciales que todos tenemos en mente. Supongamos un círculo de luz (aunque no es relevante la forma) con luminancia L_1 y longitud de onda λ_1 , que se enciende durante un instante t_1 . Un tiempo Dt después de que éste se apague, se enciende otro círculo de luz, con luminancia L_2 y longitud de onda λ_2 durante un tiempo t_2 . Los dos círculos están separados espacialmente una distancia Dx . Tenemos un montón de parámetros con los que jugar, así es que simplifiquemos el asunto. Supongamos que las luminancias y los colores son iguales. Supongamos que los tiempos de encendido son también iguales y además muy cortos en comparación con Dt . Si la distancia Dx es constante, sólo nos queda como variable el intervalo de tiempo Dt . Si Dt es mayor que, por ejemplo, 200 ms, los estímulos se perciben sucesivamente, o sea, uno después del otro. Si por el contrario, Dt es menor que por ejemplo, 30 ms, los estímulos se perciben simultáneamente. Entre ambas situaciones, en torno a un Dt de 60 ms parece que el estímulo se desplaza realmente de un lado al otro. Es, naturalmente, un movimiento aparente: el movimiento ϕ . En 1915, Korte estableció un conjunto de reglas empíricas que gobernarían este efecto, en función de todos y cada uno de los parámetros comentados anteriormente (Korte, 1915). Estas reglas se conocen hoy como leyes de Korte.

Un ejemplo especialmente ilustrativo de este tipo de movimiento es la técnica utilizada en

los dibujos animados: dibujos ligeramente diferentes presentados con una cadencia rápida aparentan un movimiento continuo.

Cinematogramas

Consideremos la experiencia conocida como el cuadrado de puntos que se mueven: consiste en un conjunto de imágenes de puntos aleatorios que se presentan secuencialmente, con una zona cuadrada que se repite, desplazada espacialmente, una pequeña cantidad respecto de la imagen anterior, (del orden de 15° de arco). En ningún fotograma puede verse contorno alguno. Pero cuando el sistema visual compara imágenes consecutivas detecta un movimiento aparente: parece que el cuadrado se ha movido. Así pues, la percepción del movimiento (comparación entre imágenes) precede a la percepción de la forma dentro de cada imagen (véase la web).

Consideremos ahora una variante de la experiencia anterior: una secuencia de imágenes de puntos aleatorios pero ahora con la zona cuadrada compuesta de pequeños puntos con diferente textura o color que los del fondo (fig. 8). Lo que ocurre ahora es que el sistema visual identifica en primer lugar la forma dentro de la imagen y luego la localiza en la imagen siguiente: la percepción de forma precede en este caso a la percepción del movimiento. El sistema visual percibe movimiento por agrupamiento de imágenes idénticas, lo que nos indica también que tiene cierta tolerancia a la deformación, ya que los bordes del cuadrado no tienen por qué ser los mismos en todas las imágenes (véase la web).

Algunas características de los movimientos aparentes con estímulos clásicos (por ejemplo, el efecto ϕ) son sin embargo distintas a las de los movimientos aparentes producidos con cinematogramas de puntos aleatorios. Por ejemplo, la distancia máxima entre imágenes que puede haber en un cinematograma, denominada D_{\max} , es del orden de 15 minutos de arco, lo que significa que el límite espacial para percibir esta clase de movimiento aparente es mucho menor que el que se requiere para percibir, por ejemplo, efecto ϕ . Basándose en estas y otras características diferenciales, Braddick propuso la existencia de dos tipos de mecanismos o de procesos para el análisis del movimiento, denominados de corto alcance y de largo alcance (Braddick, 1974). Sin embargo, el punto de vista moderno es que, en realidad, estas diferencias se pueden analizar en términos

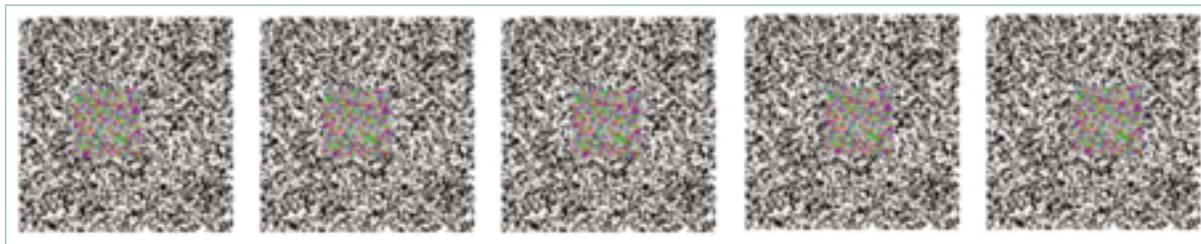


Fig. 8. Secuencia de cinematogramas de puntos aleatorios en los que aparece un cuadrado con diferente color al fondo, desplazado ligeramente en cada fotograma respecto al anterior. La presentación secuencial de los fotogramas produce la sensación de movimiento.

de los distintos espectros espaciotemporales de cada escena que deben ser analizados por una organización única de mecanismos espaciotemporales (Cavanagh y Mather, 1989).

Postefectos

Otro efecto de percepción de movimiento sin que realmente se mueva un objeto, son los postefectos de movimiento. Podemos encontrar infinidad de ejemplos que se han estudiado desde hace mucho tiempo. Por ejemplo, el efecto que se conoce como ilusión de la cascada (fig. 9), que se produce cuando miramos a una



Fig. 9. Ilusión de la cascada. Si nos adaptamos al movimiento del agua de la cascada hacia abajo y miramos luego la imagen estática, se produce un postefecto de movimiento y nos parece que el agua sube hacia arriba.

imagen estática después de habernos adaptado mirando a la cascada: "parece que el agua sube hacia arriba" (véase la web). La interpretación de este efecto es sencilla. Basta con asumir que existen detectores de movimiento "hacia arriba" y "hacia abajo", es decir, selectivos a la orientación del movimiento. La adaptación mirando el movimiento del agua de la cascada hacia abajo, reduce la sensibilidad de los detectores de movimiento en ese sentido (satura los detectores). El desequilibrio que se produce se manifiesta al mirar la imagen estática. Como los detectores hacia abajo están saturados, sólo darán señal los detectores hacia arriba y, por consiguiente, se percibe la cascada subiendo hacia arriba.

Movimientos inducidos

Cuando un estímulo estacionario está superpuesto sobre un objeto grande en movimiento, parece que es el estímulo el que se mueve en sentido contrario; esto es lo que ocurre cuando miramos a la luna cubierta parcialmente por nubes que se desplazan en un sentido: parece que es la luna la que se desplaza en sentido contrario.

Los enigmáticos

Por último un apartado especial para una serie de efectos que no pueden ser clasificados en las categorías anteriores, ya que se percibe un movimiento al mirar una imagen totalmente estática. Estos efectos son comúnmente llamados ilusiones enigma (Zeki et al, 1993). Existen numerosos ejemplos, de los que presentamos dos en la figura 10. En ambos casos, al fijar la mirada en cualquier punto de la imagen, se percibe un giro de los objetos distribuidos en las regiones extrafoveales.

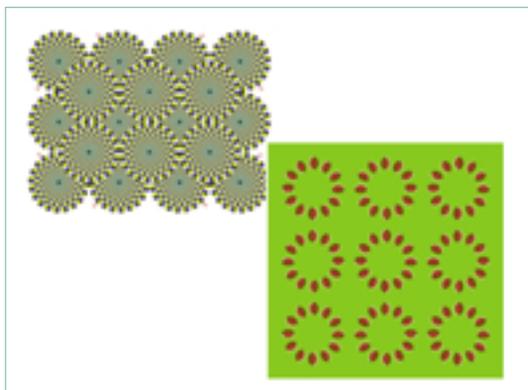


Fig. 10: Ilusiones enigma. Al mirar una imagen totalmente estática, se percibe un movimiento de giro en regiones extrafoveales.

Una última reflexión

Podríamos plantearnos si tenemos en nuestro sistema visual un único mecanismo con el que vemos el movimiento real y el aparente, o un mecanismo distinto para cada tipo de movimiento. Veremos que esta posibilidad se puede descartar. De lo dicho hasta el momento, parece que el sistema visual trata exactamente igual los movimientos reales que los movimientos aparentes. Por ejemplo, un movimiento aparente puede generar postefectos de movimiento. Sin embargo, cabría preguntarse entonces por qué en ciertas condiciones un movimiento aparente no se percibe suave o continuo como uno real, lo que ofrecería todavía algunas dudas sobre si existe en el sistema visual un mecanismo específico para los movimientos aparentes. En la próxima lección analizaremos

cuales son estas condiciones en el contexto de los fundamentos fisiológicos para el análisis del movimiento.

Bibliografía

- Bonnet C. Visual motion detection models: feature and frequency filters. *Perception* 1977;6:491-500.
- Boulton JC. Two mechanisms for the detection of slow motion. *J Opt Soc Am A* 1987;4:1634-1642.
- Braddick O. A short- range process in apparent motion. *Vision Research* 1974;14:519-527.
- Burr DC, Ross J. Contrast sensitivity at high velocities. *Vision Research* 1982;22:479-484.
- Cavanagh P, Mather G. Motion: the long and short of it. *Spatial Vision* 1989;4:103-129.
- Harris MG. The role of pattern and flicker mechanisms in determining the spatiotemporal limits of velocity perception 2. The lower movement thresholds. *Perception* 1984;13:409-415.
- Johnston A, Wright MJ. Lower thresholds of motion for gratings as a function of eccentricity and contrast. *Vision Research* 1985;25:179-185.
- Korte A. Kinematoskopische untersuchungen. *Z Psychol* 1915;72:193-206.
- Leibowitz HW. The relation between the rate threshold for the perception of movement and luminance for various durations of exposure. *J Exp Psy* 1955;49:209-214.
- Murray I, MacCana F, Kulikowski JJ. Contribution of two movement detecting mechanisms to central and peripheral vision. *Vision Research* 1983;2:151-159.
- Wertheimer M. Experimentelle studien uber das sehen von bewegung. *Zeitschrift F. Psychol* 1912;61:161-265. Experimental studies on the seeing of motion. Reprinted in T. Shipley (1961). *Classics in Psychology*. New York: Philosophical Library.
- Zeki S, Watson JPG, Frackowiak RSJ. Going beyond the information given: the relation of illusory visual motion to brain activity. *Proc Royal Soc London Series B* 1993;252:215-222.

M. Dolores de Fez Saiz, Doctora en Ciências Físicas por la Universidad de Valencia (orientación óptica). Profesora titular de la Escuela de Óptica y Optometría de la Universidad de Alicante, donde imparte docencia de las asignaturas del área de Óptica Fisiológica. Miembro del equipo de investigación GVC: Grupo de Visión y Color de la Universidad de Alicante.

Pascual Capilla Perea, es licenciado en Ciencias Físicas por la Universitat de València en 1984, Doctor en Ciencias Físicas por la Universitat de València en 1990, ayudante de la Escuela Universitaria de la Universidad de Alicante desde el 1 de diciembre de 1986. Titular de Universidad de la Universitat de València en 1995.

Ha sido en distintas ocasiones profesor en las asignaturas de Óptica Fisiológica, Psicofísica de la Visión, Percepción Visual y Colorimetría y Visión del color, todas ellas de la diplomatura de Óptica y Optometría, así como de la asignatura Teoría del color, de la Licenciatura en Física.

Es coautor de los libros Problemas de Óptica Fisiológica, Óptica Fisiológica, Psicofísica de la Visión, Fundamentos de Colorimetría y Tecnología del color.

Como investigador, ha dirigido 4 Tesis Doctorales, 2 Tesinas de Licenciatura y 4 de Diplomatura. Es autor de 28 publicaciones en revistas de investigación nacionales e internacionales y de 9 publicaciones en revistas de divulgación científica. Ha presentado 53 comunicaciones en congresos nacionales e internacionales.