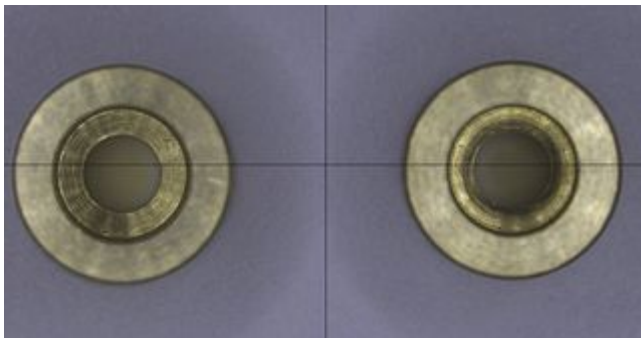


## USO DE SISTEMAS ÓPTICOS TELECÉNTRICOS PARA OPTIMIZAR LA PRECISIÓN Y REPRODUCIBILIDAD DE IMÁGENES INDUSTRIALES

### Cómo eliminar los errores ocultos en fabricación

#### Introducción

Tras la invención en 1590 del primer microscopio compuesto, la comunidad científica quedó maravillada ante la posibilidad de ver pequeños objetos y aspectos de la naturaleza que antes eran invisibles a simple vista y, por tanto, aparentemente inexistentes. Con la constante miniaturización de piezas y productos de fabricación automatizada que se ha experimentado en las últimas cinco décadas, el uso de microscopios se ha extendido del ámbito científico al industrial. Hoy en día, es posible encontrar microscopios en numerosas aplicaciones de montaje e inspección, dondequiera que se necesite visualizar y medir características minúsculas.



Las imágenes disponibles en la actualidad son grandes, nítidas y bien iluminadas. Con estas imágenes tan impresionantes, es fácil asumir que la representación que vemos también tiene precisión dimensional, pero esto no es

necesariamente cierto. Si estudiamos un punto cuya distancia al objetivo no se conoce con precisión o que no está ubicado directamente en el eje óptico del sistema de lentes del microscopio, la óptica y sus principios fundamentales pueden introducir distorsiones que provocan errores de observación y de medición.

Una óptica estándar puede ser suficiente para inspeccionar objetos prácticamente bidimensionales, como las pistas de un circuito impreso, o para analizar de forma cualitativa objetos que no sean planos. Sin embargo, para poder medir con precisión o comparar características de objetos tridimensionales, como la superficie curva de una pieza moldeada por inyección, este tipo de errores resulta problemático.

La elección de un microscopio con la óptica adecuada puede reducir de forma considerable estos errores ocultos y proporcionar resultados que sean al mismo tiempo más precisos y más reproducibles: dos atributos que resultan esenciales en los modernos sistemas de inspección y medición óptica.

---

#### Autor

Clinton Smith  
Senior Product Manager Stereo & Digital Heerbrugg,  
Leica Microsystems

## Tipos de error

### Error de aumento

El error de aumento es un fenómeno que hace que un objeto colocado delante del objetivo parezca más grande o más pequeño cuando el propio objeto se encuentra más cerca o más lejos (figura 2). Este error es habitual en los microscopios que utilizan una óptica estándar. Hay que tenerlo en cuenta cuando se intenta medir de forma repetida una serie de objetos que no siempre están a la misma distancia de la lente del objetivo o cuando se miden varias características que están a distintas alturas en un producto claramente tridimensional.

El error de aumento reduce la precisión de la medición de características y puede ocasionar que un equipo de inspección declare no aptas las piezas que son correctas o que valide las que son incorrectas, provocando con ello un aumento de los costes de reajuste y de rechazo en la fase de montaje. También se reduce la reproducibilidad de los resultados cuando varía la distancia de la muestra al objetivo, como en las inspecciones a mano, las segundas inspecciones tras el reajuste o las segundas inspecciones tras una etapa del montaje que cambia la altura relativa de la muestra.

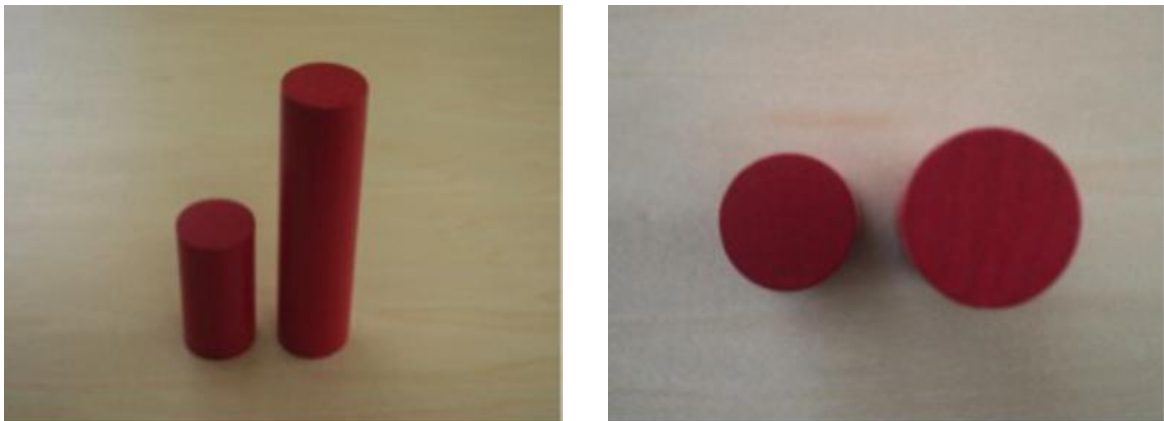


Fig.2: Ejemplo de error de aumento utilizando dos espigas de igual diámetro pero distinta altura. La vista en perspectiva muestra la diferencia de tamaño (izquierda). En la vista superior de los mismos elementos (derecha), la espiga más alta parece más grande porque está más cerca del objetivo.

### Error relacionado con el zoom

El error de aumento también causa un error secundario cuando se utiliza la función de zoom. El zoom y el enfoque con objetivos no telecéntricos puede provocar variaciones imprevistas e incontrolables del aumento. Esto reduce la precisión de la medición en la inspección.

El «zoom libre» manual tiene un impacto negativo adicional sobre la reproducibilidad. La reproducibilidad se define como la capacidad de recuperar la misma configuración en pruebas reiteradas y de repetir de forma fiable un examen con los

mismos resultados en una fecha posterior. Dado que lo habitual en una estación de inspección es cambiar constantemente entre distintas configuraciones según cambian las piezas y los montajes, es fundamental que la reproducibilidad sea elevada. Recuperar de forma fiable la misma configuración de ensayo con un zoom libre manual resulta muy difícil y la variación resultante puede provocar irregularidades diferencias en las mediciones entre un ensayo y el siguiente.

### Error de paralaje

El error de paralaje (también llamado «error de perspectiva») está causado por un error de aumento cuando se visualizan objetos con mucho relieve o cuando se comparan objetos que están a distintas alturas en el alcance óptico. Los puntos del campo visual que están alineados en vertical no aparecen alineados en la imagen.

Este error se genera cuando se observa el objeto con un cierto ángulo de inclinación (no en perpendicular) (figura 3). Un ejemplo común en microscopía es el aparente movimiento de una retícula en un visor óptico respecto a la muestra analizada cuando el usuario mueve la cabeza de lado a lado. Puede verse el mismo efecto cuando se mide una característica de una muestra sujetándola delante o detrás del borde de una regla o entre las mordazas de un calibre, ya que se produce un desajuste entre las alturas del objeto y del dispositivo de medición.

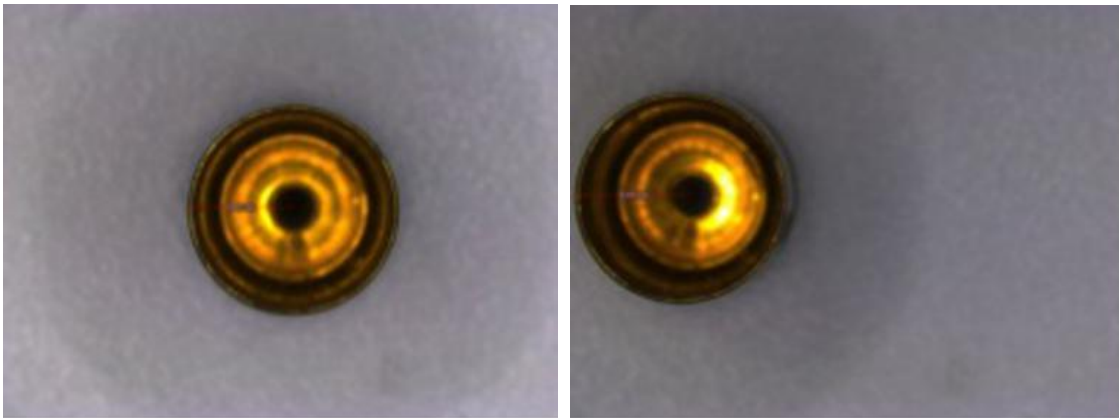


Fig. 3: Error de paralaje que provoca falta de precisión en la medición. En la imagen izquierda, la vaina del cartucho está centrada en el campo visual y la medición en pantalla es de 4.62 mm desde el centro del orificio (lejos del objetivo) hasta el borde de la vaina (cerca del objetivo). En la imagen derecha, la misma medición se realiza descentrada y la lectura es de 5.12 mm.

El error de paralaje también provoca que las características que sobresalen de la superficie del producto aparezcan desviadas del eje óptico (del centro del campo visual). La dirección y magnitud de esta desviación aparente varía con la posición de la característica dentro del campo visual (figura 4). Esta distorsión dificulta la reproducibilidad de los ensayos a menos que la muestra esté fijada y colocada siempre en la misma posición.

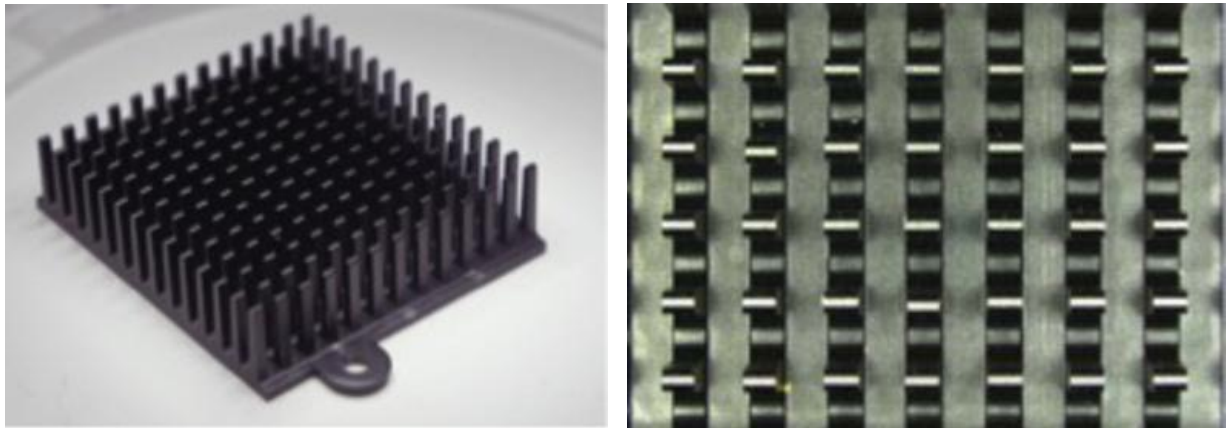


Fig.4: El error de paralaje hace que las zonas más altas (izquierda) aparezcan inclinadas respecto al centro del campo en la vista superior (derecha).

### **Telecentricidad en el diseño de microscopios modernos**

Con tantos errores ocultos en la óptica de los microscopios estándar, puede parecer imposible realizar una inspección fiable de algo que requiera un informe cuantitativo. Sin embargo, un estudio cuidadoso del diseño óptico del microscopio puede evitar este problema. Por ejemplo, algunos microscopios están disponibles con óptica telecéntrica que elimina o reduce drásticamente la falta de precisión y la pérdida de reproducibilidad ocasionada por los errores de aumento, de zoom y de paralaje.

Los objetivos telecéntricos llevan décadas de existencia, pero durante el siglo XX se consideraron como algo «exótico» y quedaron arrinconados para aplicaciones marginales. Esta tecnología empezó a extenderse en los últimos diez años con la expansión de los procesos de medición para el control de calidad basados en sistemas de visión artificial en los entornos de fabricación industriales.

La telecentricidad es la característica de un sistema óptico que hace que todos los rayos principales (el rayo central de cada haz de rayos) que pasan por el sistema queden prácticamente colimados y paralelos al eje óptico. Un sistema óptico puede ser telecéntrico en el espacio de imagen (lado de ocular/cámara), el espacio del objeto (lado del objetivo) o en ambos. La telecentricidad se consigue colocando una apertura óptica (una pantalla opaca con un pequeño orificio en el centro) en el punto focal posterior de la lente compuesta (figura 5).

En términos más sencillos, cuando se visualiza un objeto a través de un objetivo telecéntrico, el observador mira «en línea recta» hacia todos los puntos del campo visual. Por el contrario, con una óptica no telecéntrica, el observador mira en línea recta solo por el centro del campo visual y mira en ángulo todo lo que está fuera del punto central.

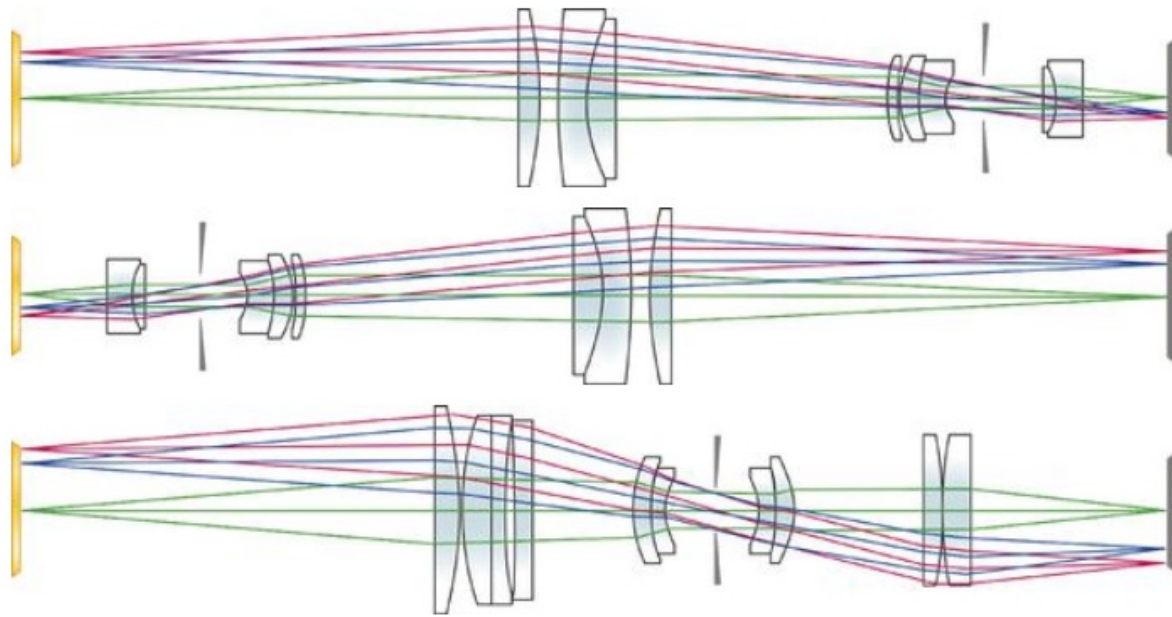


Fig.5: Diagramas de trayectoria de rayos en un sistema óptico telecéntrico. Los rayos principales son paralelos al eje óptico en el espacio del objeto (arriba), el espacio de imagen (centro) o ambos (abajo).

### **Ventajas de la telecentricidad en el espacio del objeto (lado del objetivo)**

El diseño de un microscopio para que sea telecéntrico confiere al sistema varias propiedades ópticas que resultan muy ventajosas para la precisión de las mediciones, la reducción de la distorsión y la reproducibilidad de los resultados.

#### **Aumento constante**

La propiedad más importante de los sistemas ópticos telecéntricos es el aumento constante incluso con variación de distancia entre la muestra y el objetivo del microscopio. Este concepto puede ser difícil de comprender porque nuestra visión no es telecéntrica. Para el ojo humano, los objetos próximos aparecen más grandes que los que están más alejados.

Esto funciona bien para la visión normal, pero cuando se crean imágenes de productos que luego será necesario medir con precisión y repetir con fiabilidad, el aumento constante resulta crucial. El aumento constante ofrece mejor repetibilidad cuando se inspeccionan muestras de distinta altura porque el tamaño aparente del objeto no cambia con la distancia respecto a la lente del objetivo (figura 6). También permite realizar mediciones más precisas de formas 3D complejas, como las de una pieza grande con superficies a diferentes alturas.

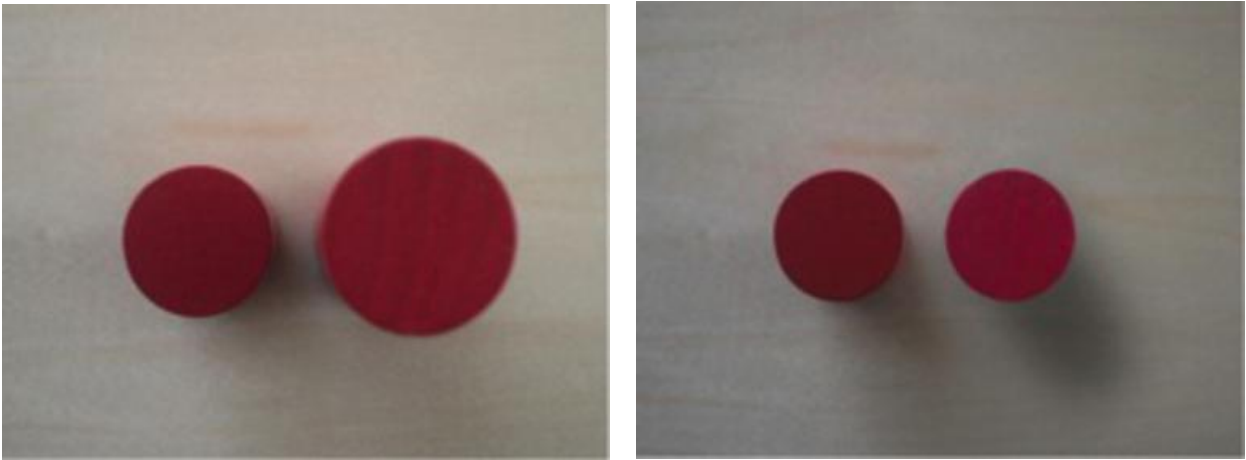


Fig. 6: Objects of same diameter at different distances from the lens (from Figure 2), as seen through standard camera optics (left) and telecentric camera optics (right).

Cuando se miden características utilizando una retícula óptica o digital, el aumento constante garantiza que la distancia entre los puntos de una característica alta no aparezca artificialmente más grande que la misma distancia en una característica más baja. También ofrece mejor reproducibilidad cuando se revisa una muestra visualizada previamente a distinta altura.

### Zoom mejorado

Una ventaja crítica del aumento constante es que facilita la repetibilidad y precisión en la función de zoom. Al eliminar prácticamente el error de aumento, los objetivos telecéntricos minimizan las variaciones imprevistas e incontrolables del aumento provocadas por el desplazamiento del objetivo al aplicar el zoom y al enfocar. Esto mejora en gran medida la precisión de la medición óptica. Si se combina con una función de posicionamiento mecánico con tope de clic o zoom codificado, los objetivos telecéntricos pueden ofrecer una funcionalidad de zoom precisa y muy repetible a la vez.

### Difuminado simétrico

Con una óptica telecéntrica es posible medir con precisión características de la muestra aunque no estén enfocadas, ya que los objetos que no están en el punto de mejor enfoque se difuminan de manera simétrica. Esto mantiene constante la posición de I centroide y permite la ubicación precisa de características y bordes sin distorsión. De este modo se elimina el requisito de que el usuario mantenga todos los puntos de la muestra en enfoque simultáneo.

**Sin error de paralaje (error de perspectiva)**

La eliminación del error de paralaje resulta crítica para conseguir resultados que sean tanto precisos como reproducibles en el examen de objetos que tengan mucho relieve, como es el caso cuando se miden características pequeñas en varios puntos de una pieza más grande (figura 7). El uso de ópticas telecéntricas garantiza que la ubicación y forma aparente de las características del objeto no varíen si se desplaza la pieza a una ubicación distinta en el campo visual (o si la pieza se retira y se vuelve a inspeccionar más tarde en otra ubicación).

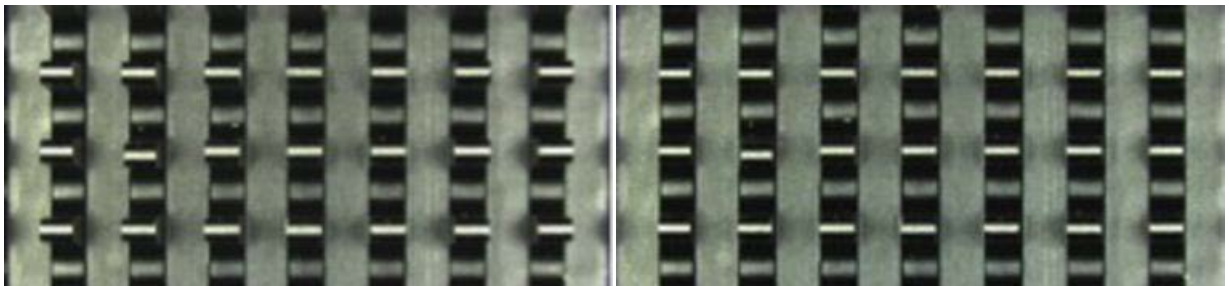


Fig.7: Comparación de características altas (de la figura 4) vistas a través de una óptica estándar (izquierda) y una óptica telecéntrica (derecha).

**Líneas de visión iguales hacia todos los puntos del campo visual**

Con las ópticas estándar, la línea de visión es perpendicular al plano de inspección solamente en el centro del campo visual y todos los demás puntos se visualizan con un cierto ángulo. Esto implica que las características de poco relieve que no estén centradas en el campo visual pueden quedar ocultas por otras características próximas más altas. Como las ópticas telecéntricas están diseñadas para ofrecer una visión en línea recta de todos los puntos dentro del campo visual, estos problemas quedan eliminados. Esto permite visualizar puntos difíciles, como el diámetro interior de dos tubos paralelos que están separados uno de otro o los fondos de agujeros profundos que quedan fuera de la línea óptica central (figura 8).

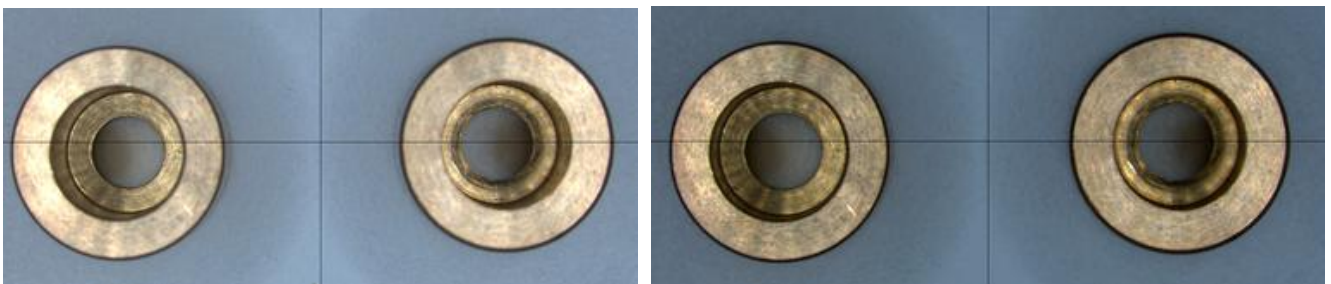


Fig.8: Comparación de vistas de formas complejas a través de óptica estándar y de óptica telecéntrica. La línea de visión hasta el fondo de los agujeros profundos queda parcialmente obstruida por los bordes superiores de los agujeros cuando se observan descentrados a través de una óptica estándar (izquierda). Cuando se observan a través de una óptica telecéntrica (derecha), se ve toda la superficie del fondo del agujero.

## Alternativa a los objetivos telecéntricos

### Software

Es un malentendido habitual entre los usuarios de equipos con óptica telecéntrica que hay un mecanismo de software que ajusta la imagen para conseguir un aumento constante y otras reducciones de errores. Aunque es posible conseguir alguna mejora por este medio, muchas de las ventajas de los objetivos telecéntricos no se pueden reproducir con precisión mediante software.

### Homologación y calibración de la óptica

Otro malentendido habitual entre la comunidad de microscopía es que la homologación por terceros de la óptica de cada microscopio garantiza la precisión y reproducibilidad de las inspecciones. En realidad, los organismos gubernamentales de normalización suelen homologar los equipos de calibración, pero no homologan instrumentos concretos.

Los fabricantes de microscopios pueden realizar calibraciones internas sobre instrumentos individuales, pero aquí vuelve a intervenir otro de los inconvenientes de la funcionalidad de zoom libre. Tras la calibración inicial del fabricante, la variación introducida por el ajuste de zoom hace difícil que se puedan reproducir las mismas condiciones de calibración sobre el terreno.

Las calibraciones realizadas en el momento de su fabricación pueden facilitar la reproducibilidad, ya que mejoran la uniformidad de las prestaciones entre distintos microscopios fabricados por el mismo proveedor. Sin embargo, ningún tipo de calibración puede eliminar los errores ocasionados por los principios ópticos fundamentales que rigen el funcionamiento de los objetivos no telecéntricos, como son los errores de paralaje y de aumento no constante.

## Conclusión

Los sistemas ópticos de los modernos equipos de microscopía pueden estar sujetos a distintos errores ocultos. Es decisivo realizar un estudio cuidadoso del diseño óptico utilizado en el equipo. El uso de microscopios con sistemas ópticos telecéntricos permite reducir o eliminar muchos de estos errores para optimizar la calidad de imagen, la precisión de las mediciones y la reproducibilidad.

## Lecturas adicionales

Klein C., Buttermore W., Doppler M.: [Using Telecentric Optical Systems to Optimize Forensic Image Accuracy and Reproducibility - How to eliminate hidden errors in forensics](#), Leica Science Lab, July 2015

Gislao M. J., Smith C.: [Webinar: How More Accurate and Reproducible Measurements can be Made through "Telecentricity"](#), Leica Science Lab, June 2013

Leica Microsystems (Schweiz) Ltd. · Max-Schmidheiny-Straße 201 · 9435 Heerbrugg, Schweiz  
T +41 71 726 34 34 · F +41 71 726 34 44

[www.leica-microsystems.com](http://www.leica-microsystems.com)