Captura multifoco

La linealidad y la invariancia espacial en la PSF son condiciones deseadas para aplicar la OTF y simplificaciones introducidas por las operaciones de convolución.

Se ha modelado la formación de imágenes a partir de una escena 3D a partir de la convolución de la escena (u objeto 3D) con una PSF 3D:

$$i(x,y,z) = \iiint_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{h(x-x_0, y-y_0, z-z_0)}_{\substack{\text{3D PSF} \\ \text{PSF invariante en profundidad}}} \underbrace{f(x,y,z)}_{\substack{\text{distribución de intensidad} \\ \text{del objeto}}} dx_0\, dy_0\, dz_0$$

$$= h(x,y,z) * f(x,y,z)$$

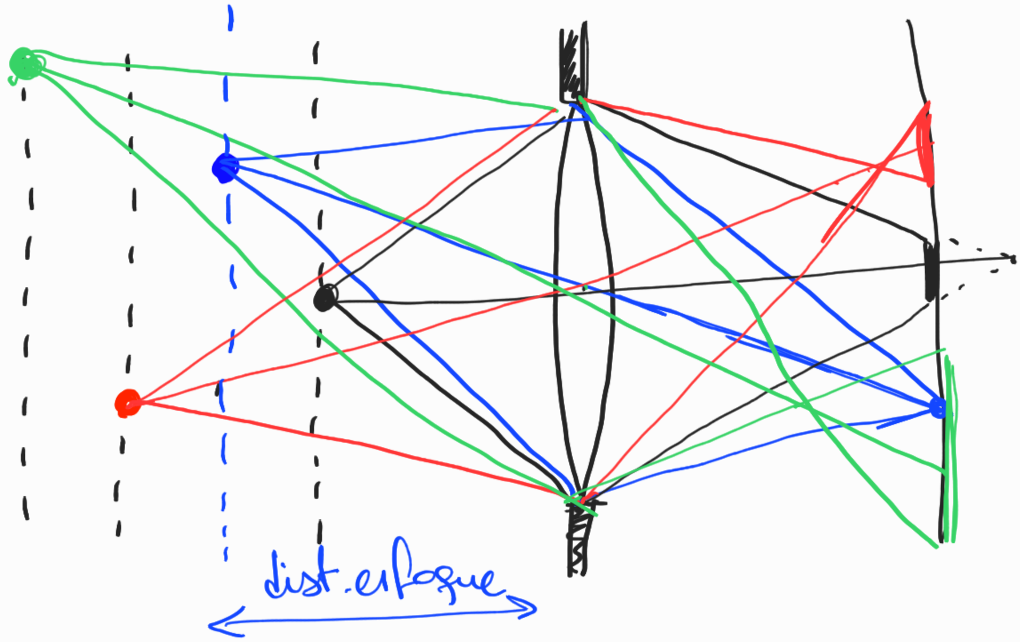
y así se intenta reconstruir la distribución de intensidad de la escena (f) a partir de una deconvolución 3D.

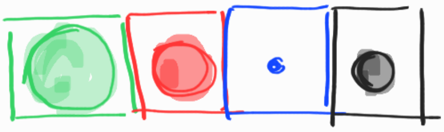
Este acercamiento al problema ha sido muy utilizado en microscopía pero es una simplificación que resulta de considerar desenfoques pequeños o especímenes biológicos relativamente delgados.

Para muestras gruesas o escenas 3D con gran desenfoque esta aproximación al problema no funciona.

Un modelo más general consiste en pensar la escena 3D formada por estratos o capas 2D (planos perpendiculares al eje óptico del sistema) donde c/u involucra una PSF 2D lineal e invariante en (x, y) pero no invariante en la profundidad.

Dada una distancia de enfoque, los objetos a diferentes profundidades son convolucionados con diferentes PSFs 2D.



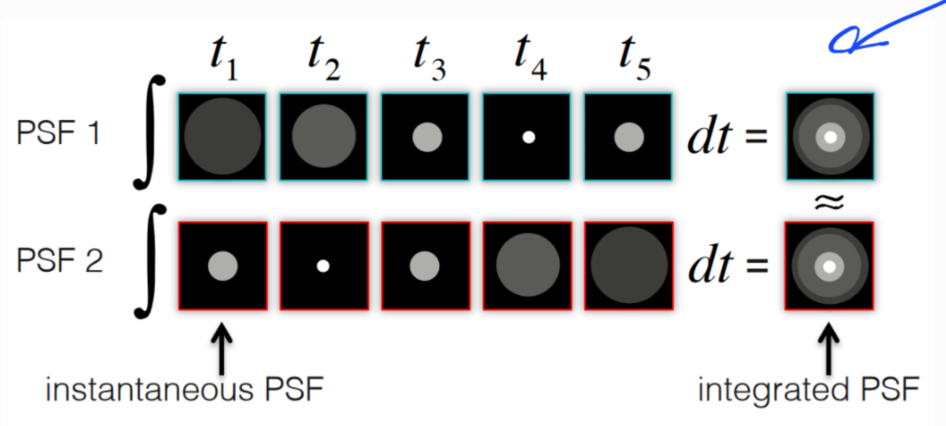


PSF depth-variant

DV-PSF (varía con la profundidad)

Focal sweep

PSF efectiva



Asumen:

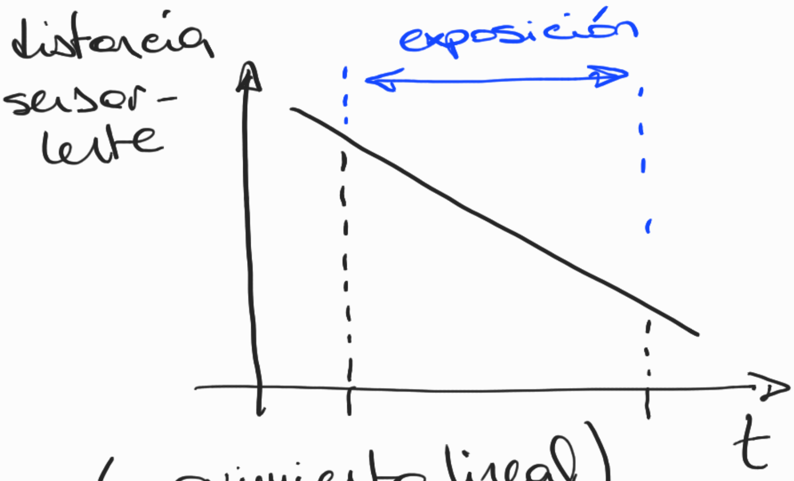
La PSF efectiva es invariante en profundidad
→ todos los puntos son convolucionados con la misma PSF efectiva independientemente de su profundidad.

La imagen capturada no está nítida en ningún lugar pero es posible hacer una deconvolución simple (global) para restaurar una imagen con todo en foco (ej usando Wiener)

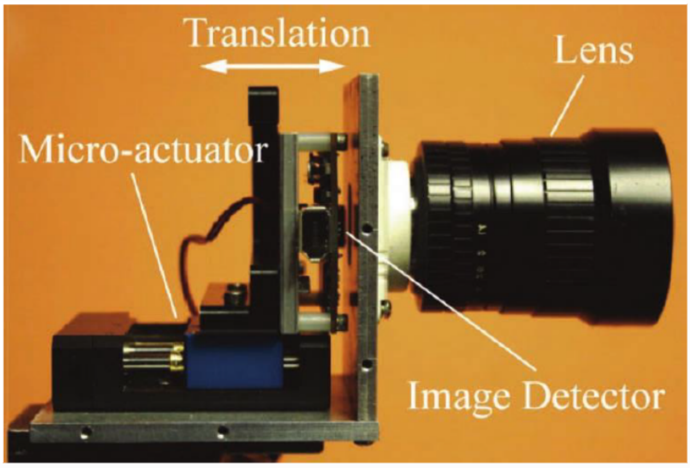
* DI-PSF (depth-invariant PSF) implica la pérdida de información con respecto a la profundidad.

¿Cómo se puede implementar el "focal sweep"?

1) - plataforma traslatoria para mover el sensor relativo a la lente, fija durante la exposición.



(movimiento lineal)



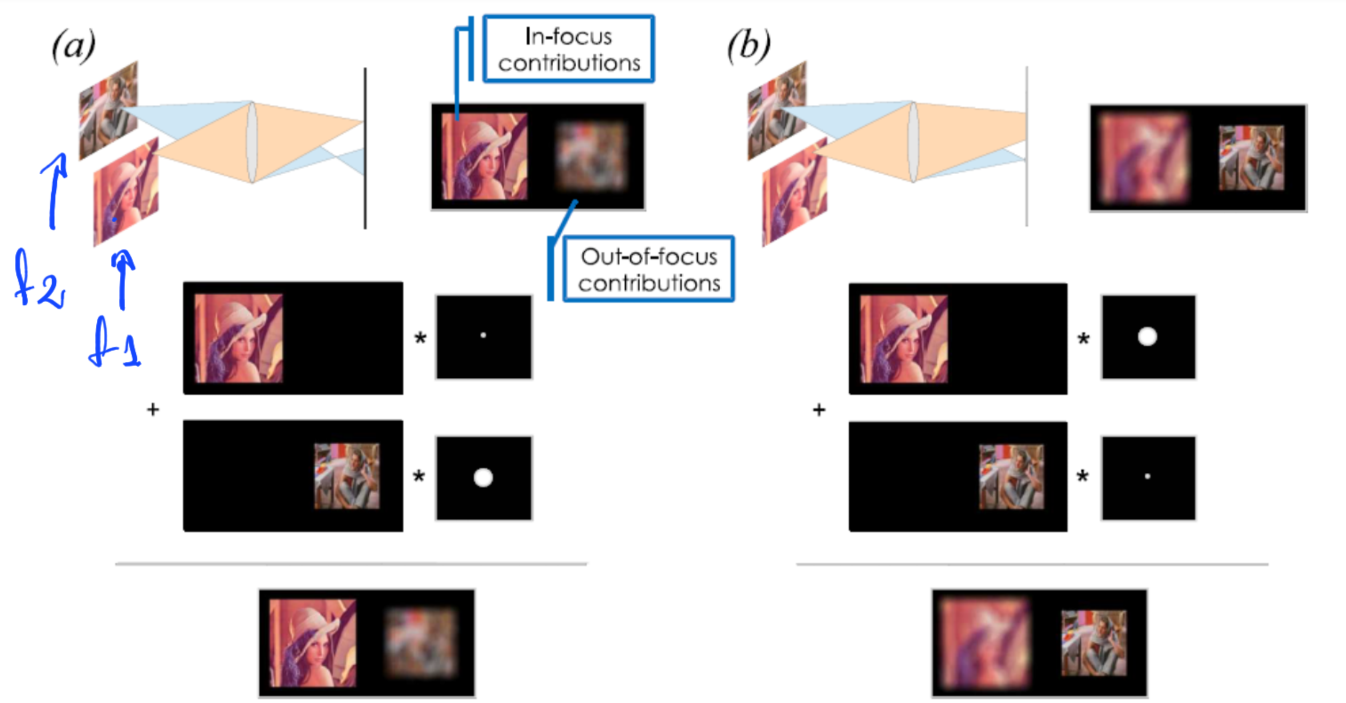
Consideraciones: - movimiento mecánico
→ vibraciones, "motion-blur"
- PSF depth-invariant
→ veloc. cte (mismo tiempo de exposición en c/punto del objeto)
- se pierde información de la profundidad.

2) rotar el anillo de enfoque de la lente para mover la lente relativa al sensor fijo durante la exposición

3) usar lente de foco ajustable eléctricamente (ETL) manteniendo todo fijo.

DV-PSF (caso con gran desenfoque)

Secuencias multi-foco (z-stacks)



$$i_1(x,y) = f_1(x,y) + h_{12}(x,y) * f_2(x,y) \qquad i_2(x,y) = h_{21}(x,y) * f_1(x,y) + f_2(x,y)$$

Figure 3.2: In-focus and out-of-focus contribution to image formation for $N = 2$ with the optical system focusing at (a) foreground and (b) background

se adquieren imágenes a medida que se barre la escena 3D en profundidad (z-stack o stack multi-foco).

N imágenes $(k=1,\dots,N) \longleftrightarrow z_k$ distancias de enfoque

$$i_k(x,y) = \underbrace{f_k(x,y)}_{\text{contribución en foco a } i_k} + \underbrace{\sum_{k'\neq k}^{N} \underbrace{h_{kk'}(x,y)}_{\text{PSF 2D (vincula } z_k \text{ y } z_{k'})} * f_{k'}(x,y)}_{\text{contribución fuera de foco a } i_k}$$

imagen adquirida enfocando en z_k

PSF geométrica

$$h_{kk'}(x,y) = \frac{1}{\pi r_{kk'}^2}\, \underbrace{\mathrm{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{r_{kk'}}\right)}$$

$$\hookrightarrow \begin{cases} 1, & \sqrt{x^2+y^2} \leq r_{kk'} \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

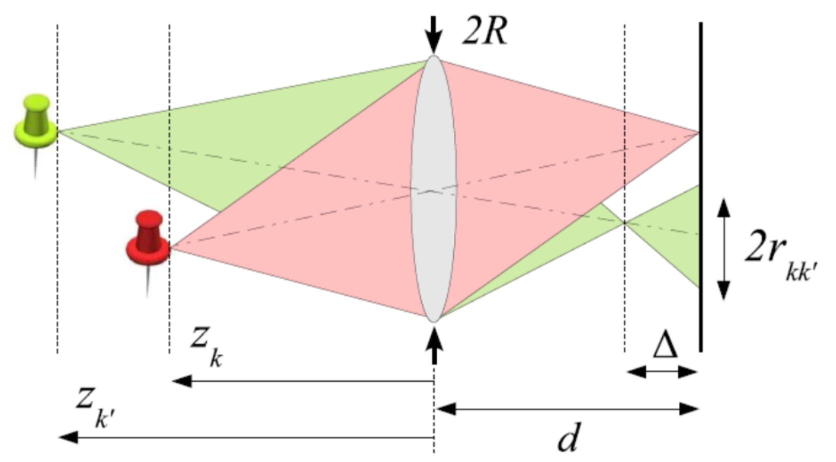


Figure 3.3: Optical system focusing at z_k (the red push pin is in focus, and the green one at $z_{k'}$ is out-of-focus).

¿cómo es $r_{kk'}$ debido a z_k y $z_{k'}$?

distancia lente al sensor

$$r_{kk'} = R\,d \left| \frac{1}{z_k} - \frac{1}{z_{k'}} \right|$$

radio apertura lente

Obs: $r_{kk'} = R\,d \left| \frac{z_{k'} - z_k}{z_k z_{k'}} \right|$ "depth-variant"

OTF (Transf. de Fourier de la PSF)

$$H_{kk'}(u,v) = \frac{2 J_1\left(2\pi r_{kk'}\sqrt{u^2+v^2}\right)}{2\pi r_{kk'}\sqrt{u^2+v^2}}$$

con J_1 función de Bessel de 1er orden

1) Imagen todo en foco / Fusión / Extensión de la profundidad de campo (EDOF)

$$s(x,y) = \sum_{k=1}^{N} f_k(x,y)$$ contribución de todas las regiones en foco

caso $N=2$ $\quad s(x,y) = f_1(x,y) + f_2(x,y)$