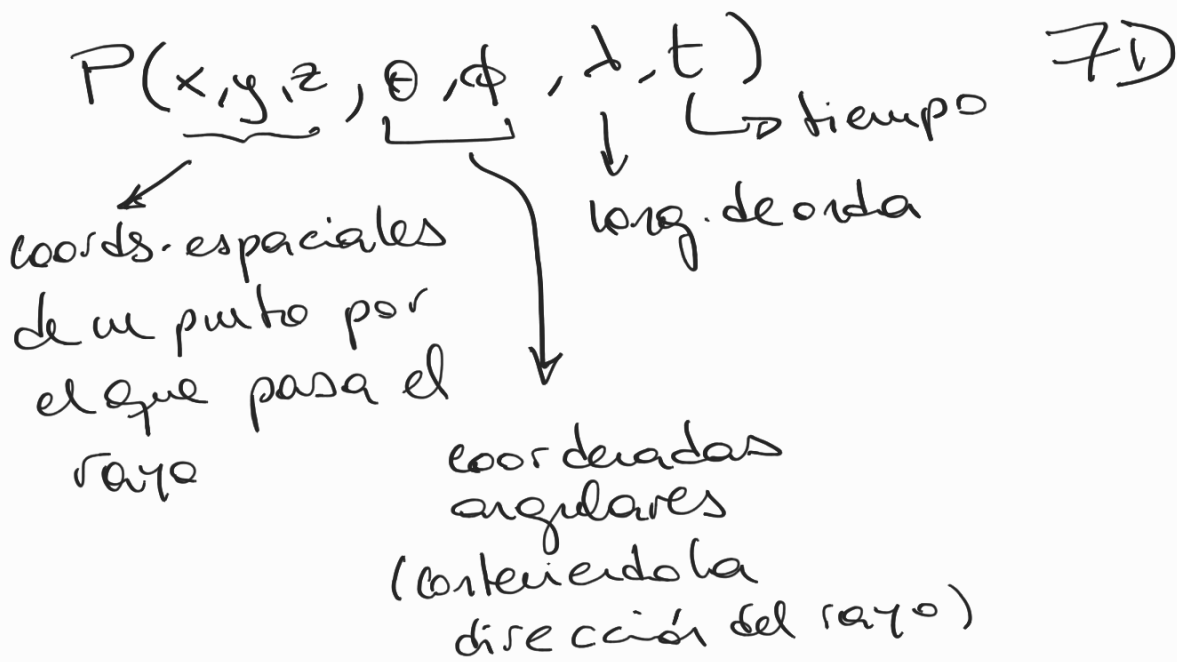


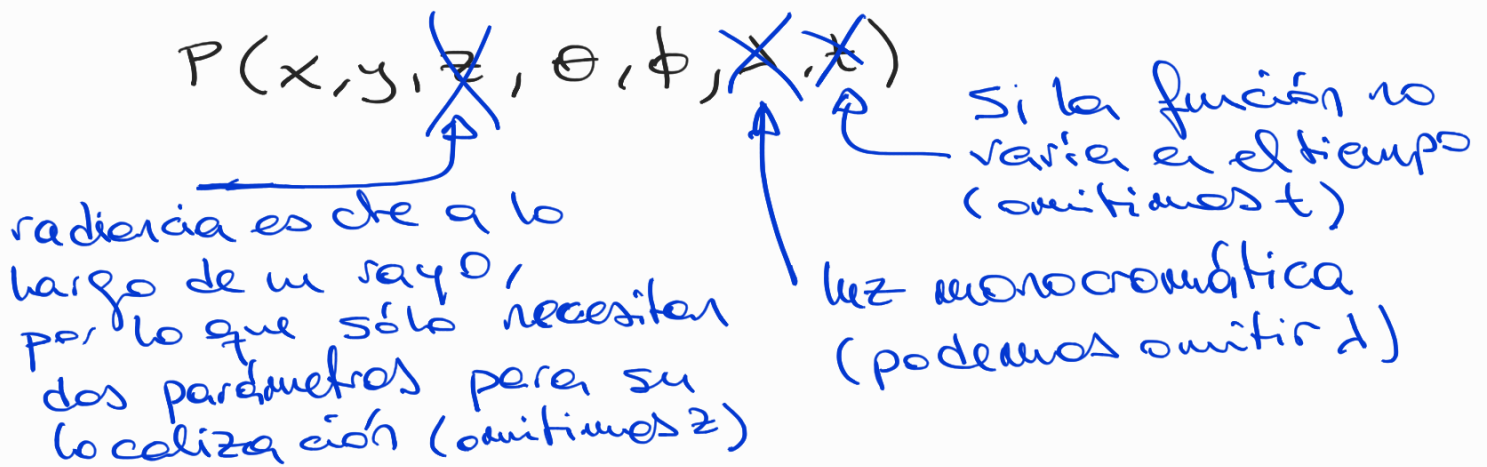
# Light field imaging

Adelson y Berger en 1991 introdujeron la función pleróptica, que describe la radiancia de  $c/\text{rayo}$  de luz en el espacio.

pleroptic ← "plenus" del latín: completo o lleno.



Muchas veces se puede reducir la dimensionalidad de la función pleróptica con las siguientes condiciones:



Además, es común reemplazar las coords. angulares  $(\theta, \phi)$  por coords. cartesianas  $(u, v)$ .

Bajo esas condiciones, se habla de una simplificación 4D de la función plenóptica, conocida debido al trabajo de Levoy y Hanrahan como "light field":

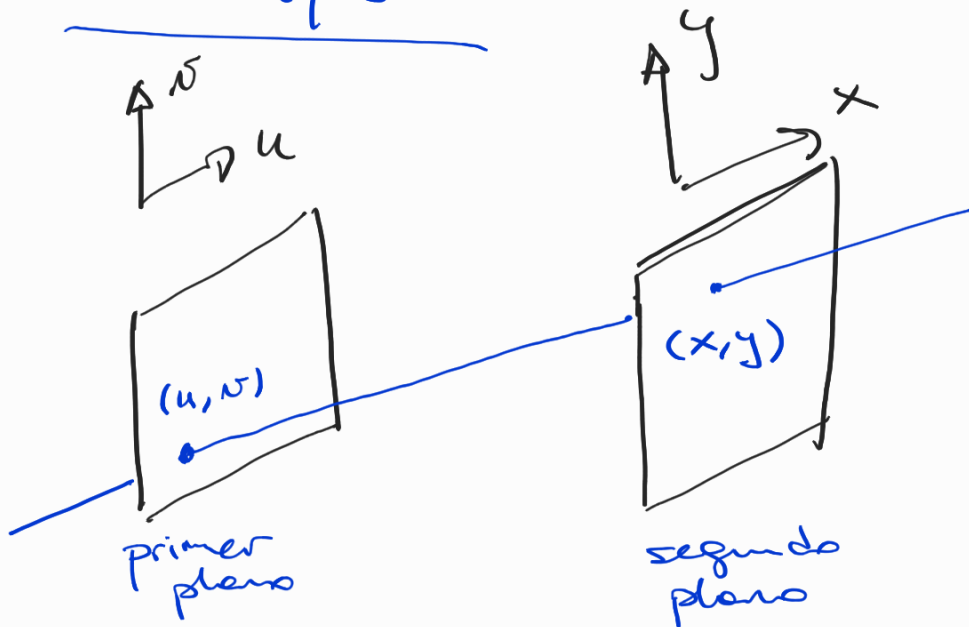
$L(u, v, x, y)$  light field (4D)

obs: el término de "light field" fue originalmente usado en la traducción de un trabajo sobre ingeniería de la iluminación en 1930, pero no tiene el sentido de un campo electromagnético como lo entiende la Física.

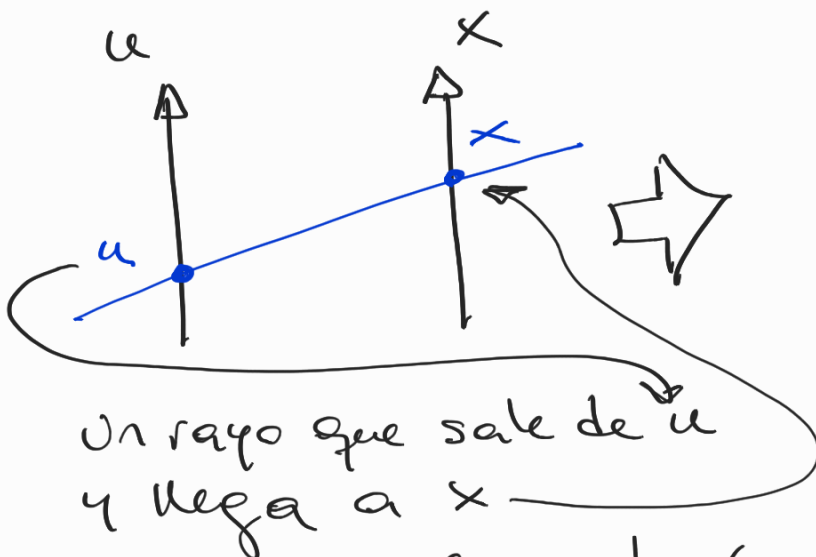
El valor de  $L(u, v, x, y)$  es la "cantidad" de luz (radiancia) de un rayo de luz monocromático.

obs: Para considerar imágenes a color, se asume que el light field es un vector con 3 componentes con información de radiancia para el rojo, verde y azul (o las longitudes de onda correspondientes)

# Representación de rayos en un diagrama de rayos



con la finalidad de comprender los conceptos básicos, consideramos sólo una coordenada de c/plano



Un rayo que sale de  $u$  y llega a  $x$

corresponde al punto  $(u, x)$  en el diagrama de la dcha.

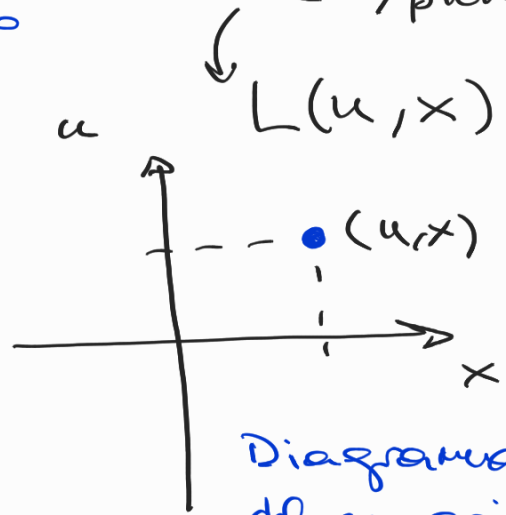
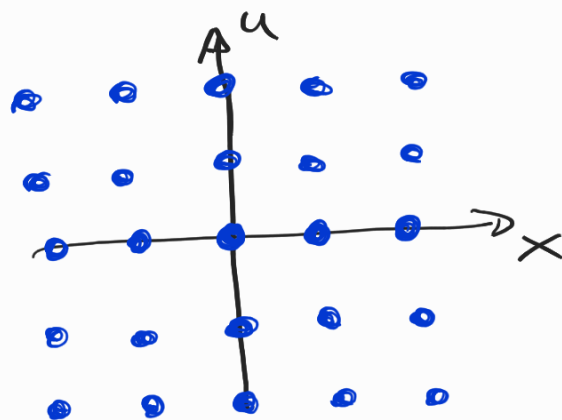
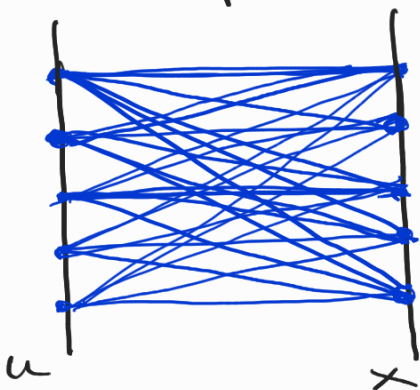
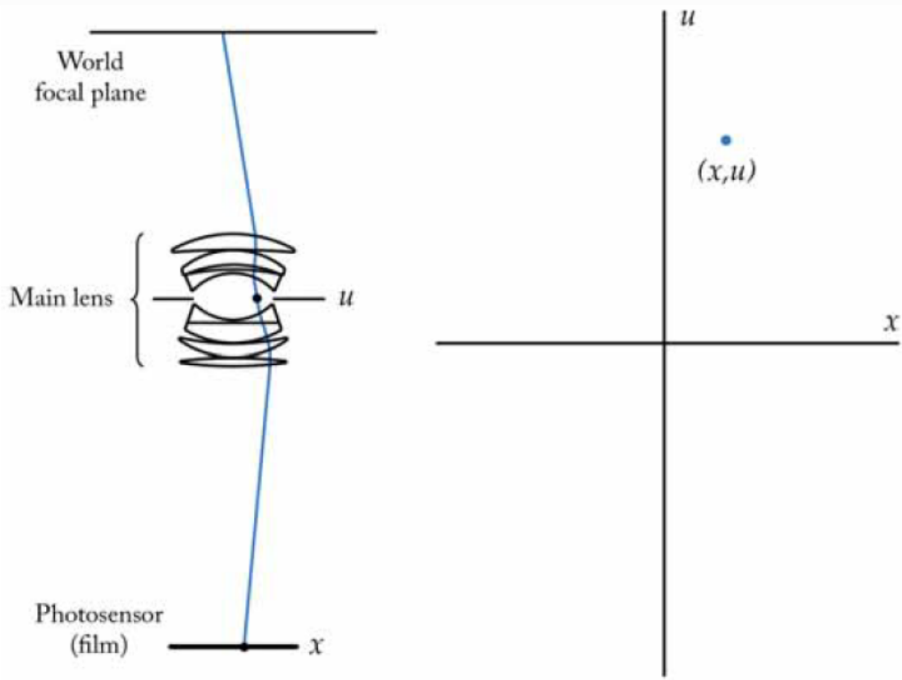


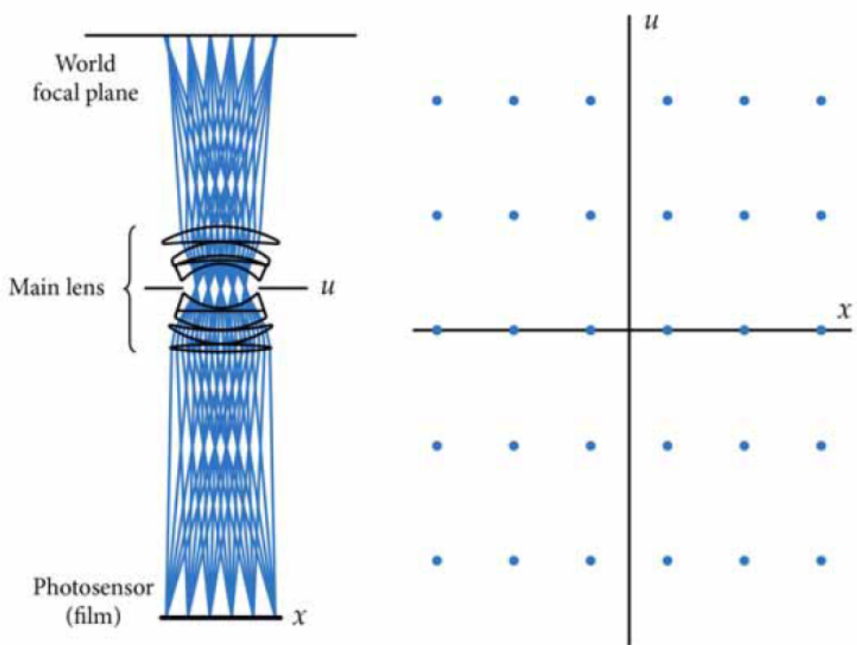
Diagrama 2D del espacio de rayos

Rayos desde un conj. de puntos en el "plano"  $u$  y van a un conj. de puntos en el "plano"  $x$

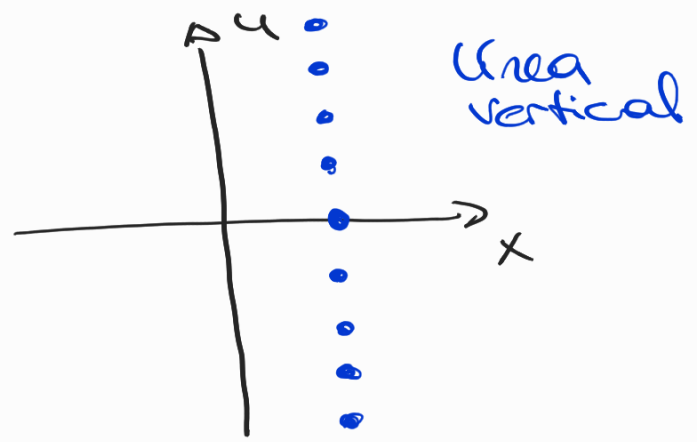
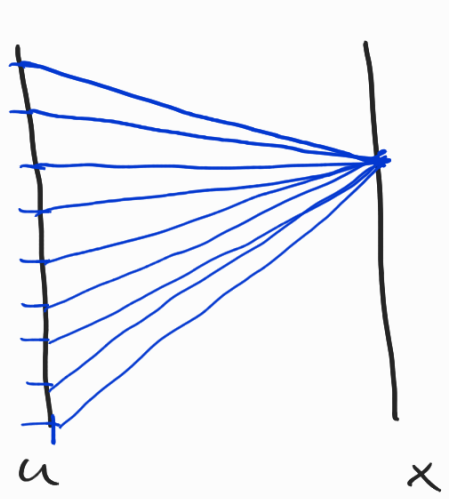


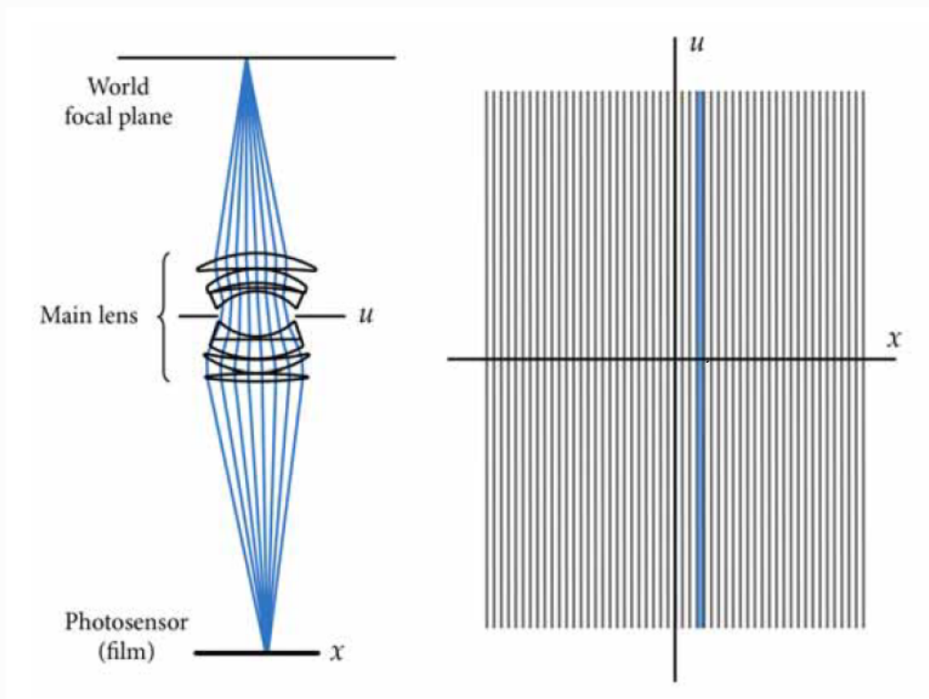


cámara convencional



c/rajo se muestra como un posible punto  $(x, u)$  en el espacio cartesiano de rayos 2D

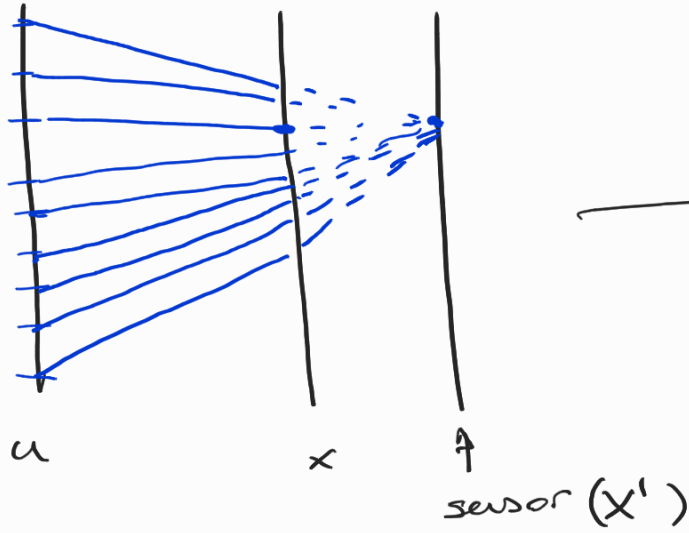




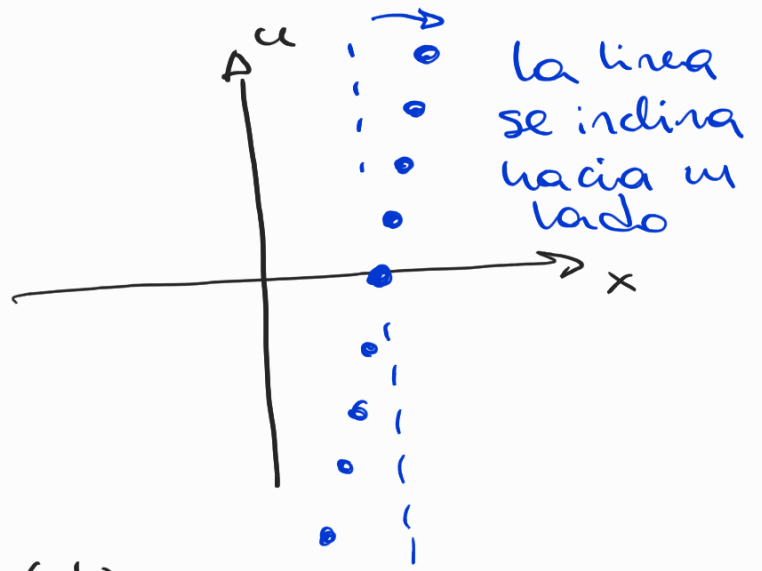
Está en azul el conj. de rayos que contribuyen a un píxel del sensor. Corresponde en 2D a la raya vertical (distintos  $u$  que llegan a un mismo  $x$ ). A su vez diferentes píxeles ( $\neq x$ ) corresponden a distintas líneas verticales en el espacio de rayos.

Importante: la formación de una imagen sobre el sensor (plano  $x$ ) en el diagrama a la proyección vertical de los valores del light field. La proyección preserva el valor de  $x$  pero destruye la información sobre  $u$ .

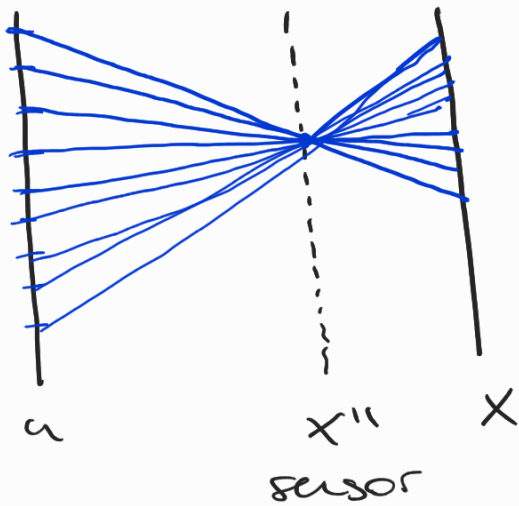
Obs: la discusión previa está limitada al caso en que el sensor coincide con el "plano" de parametrización  $x$ , pero eso puede no ocurrir.



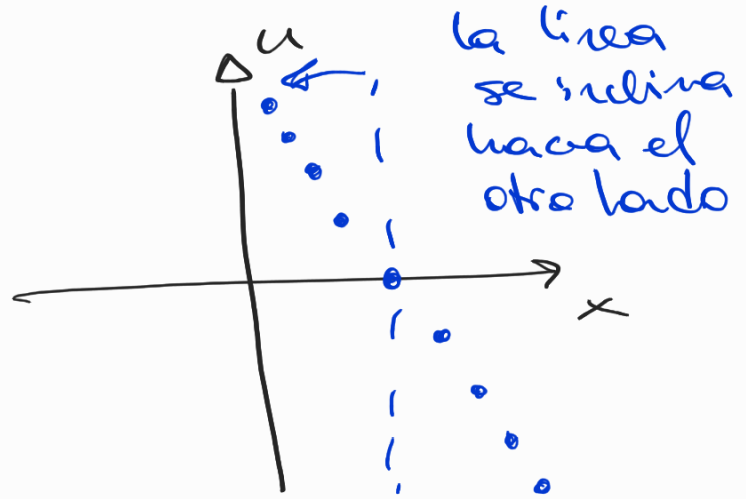
rayos que convergen  
detrás del "plano"  $x$



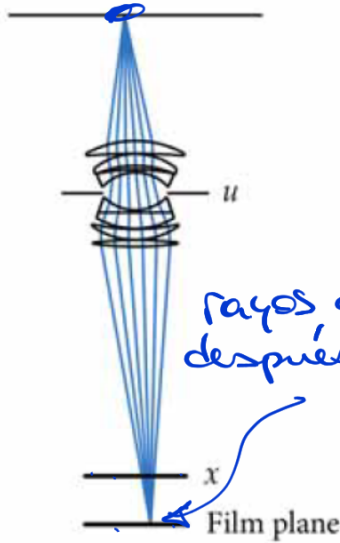
la línea  
se inclina  
hacia el  
lado



rayos que convergen  
delante del "plano"  $x$

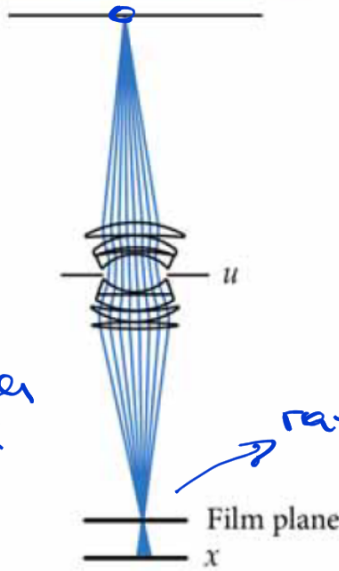


la línea  
se inclina  
hacia el  
otro lado

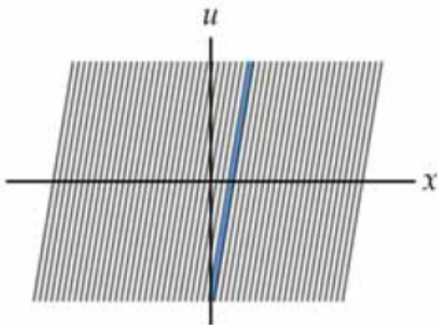


rayos convergen después de X

x  
Film plane

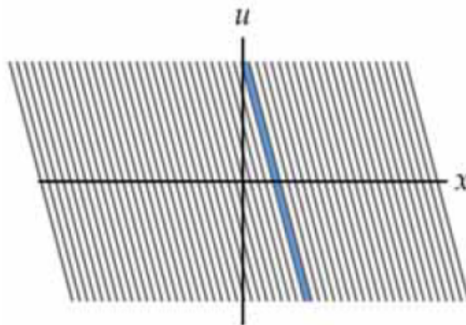


rayos convergen antes del plano X (de parametrización)



(A)

(enfocado después de x)



(B)

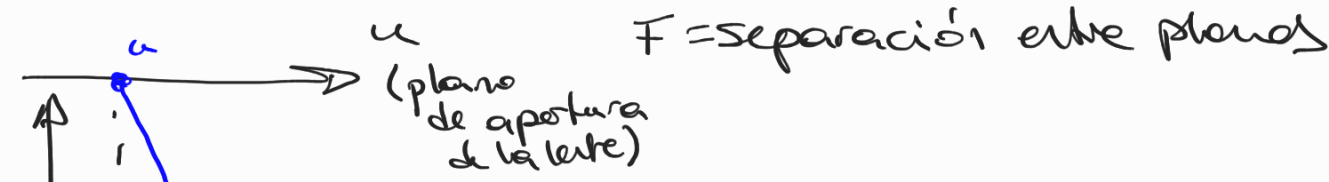
(enfocado antes de x)

Quando los rayos no convergen al plano X (de parametrización), se dice que el light field sufrió una deformación de cizalla

# Del light-field a la imagen

(Cámara convencional)

La imagen que se forma dentro de una cámara convencional es proporcional a la irradiancia en el sensor. Vamos a considerar el sensor en el plano  $(x, y)$ .



$F =$  separación entre planos

~~$\cos^4 \theta$~~  (consid. aprox. paraxial)  
 $T(u, v)$  apertura lente circular  
 $T(u, v) = \text{circ}(u/v) = \begin{cases} 1; & u^2 + v^2 < \frac{r^2}{2} \\ 0; & \text{de otro modo} \end{cases}$

$$E_F(x, y) = \frac{1}{F^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} L_F(x, y, u, v) du dv \quad (1)$$

irradiancia en el sensor en la posición  $(x, y)$

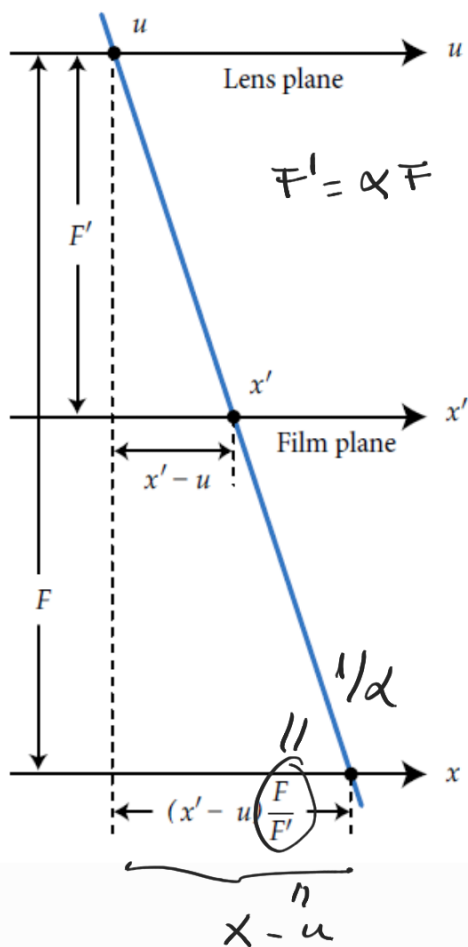
↑ light field parametrizado por los planos en la separación  $F$

Eso sería una fotografía enfocada para una distancia  $F$  entre la lente y el sensor.



Enfocar a diferentes profundidades corresponde a cambiar la distancia entre la lente y el sensor (recordemos  $\frac{1}{s_i} + \frac{1}{s_o} = \frac{1}{f}$ )

Esto resulta en una transformación de cizalla de la trayectoria de las líneas de rayos de integración en el espacio de rayos (algo de eso vimos antes).



Si consideramos el sensor en  $x'$ , lo acercamos a una distancia  $F' = \alpha F$  del plano  $u$  (lente).

Queremos  $L_{F'}(x', u)$  en términos de  $L_F(x, u)$  y volver a la ec. (1).

$$x - u = \frac{x' - u}{\alpha} \rightarrow x = u + \frac{x' - u}{\alpha}$$

Entonces,

$$L_{F'}(x', y', u, \nu) = L_F \left( u + \frac{x' - u}{\alpha}, \nu + \frac{y' - \nu}{\alpha}, u, \nu \right)$$

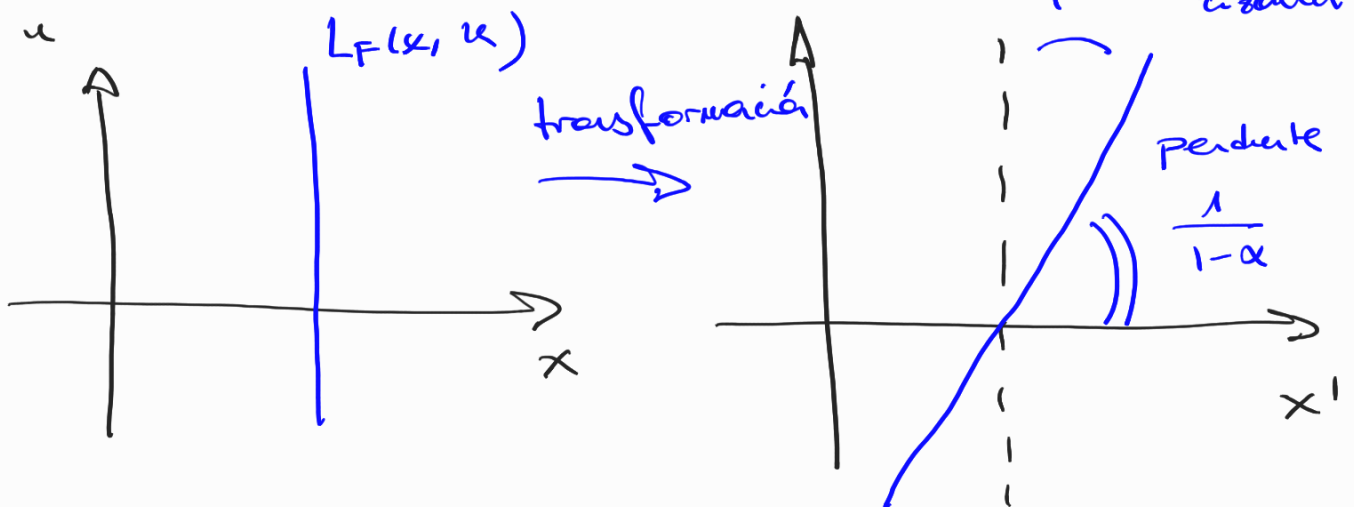
$$= L_F \left[ u \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{x'}{\alpha}, \nu \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{y'}{\alpha}, u, \nu \right] \quad (2)$$

Sustituyendo en (1):

$$E_{(\alpha F)}(x', y') = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} L_F \left[ u \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{x'}{\alpha}, v \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{y'}{\alpha}, u, v \right] dx dy \quad (3)$$

↓ irradiación en  $(x', y')$  en un plano virtual a distancia  $\alpha F$  de  $(\alpha, v)$ .

La imagen se puede pensar como una transformación de cizalla del light field  $2D$  que se proyecta luego a  $2D$



$$\psi = \frac{\pi}{2} - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{1}{1-\alpha} \right) = \operatorname{tg}^{-1} (1-\alpha) \quad (4)$$

Resumiendo:

Proceso de formar una imagen  $2D$  a partir del light field en una cámara convencional.

≡ Capturar una imagen es esencialmente la integración del light field en las variables  $(u, v)$  como sugiere la ec. (2). En la representación del diagrama de rayos 2D es la proyección sobre el eje horizontal  $x$ .

≡ Si cambiamos la posición virtual del sensor, el light field sufre una transformación de cizalla. Acercar el sensor a la lente resulta en una cizalla hacia la derecha de ángulo  $\psi$  dado por la ec. (4). Poner el sensor virtual más lejos de la lente se produce el efecto opuesto.

≡ Si  $(x, y)$  representa el plano ideal de enfoque con respecto al objeto, mover el sensor a otro plano significa primero considerar la deformación de cizalla y luego la proyección horizontal y el resultado sería una imagen borrosa.

## Cámaras plerópticas (Plenoptic camera)

≡ Gabriel Lippman (físico), que en 1908 ganó el Nobel en Física por su invento de la fotografía a color basada en interferencia, también publicó en ese mismo año un trabajo sobre una técnica de "fotografía integral".

Se trataba de un arreglo de pequeñas lentiillas donde las imágenes se forman sobre un film detrás de las lentiillas, ya con una perspectiva ligeramente diferente.

≡ En 1930's, Herbert Ives, quien fuera presidente de la OSA (Optical Society of America), mejoró el diseño de Lippmann. Agregó una lente principal con diámetro mayor y propuso un método para invertir la profundidad y corregir la pseudoscopia.

≡ Unas décadas más tarde Chutjan y Collier desarrollaron un método para hacer posible la imagen integral generada por computadora (Computer-generated integral imaging - CGI).

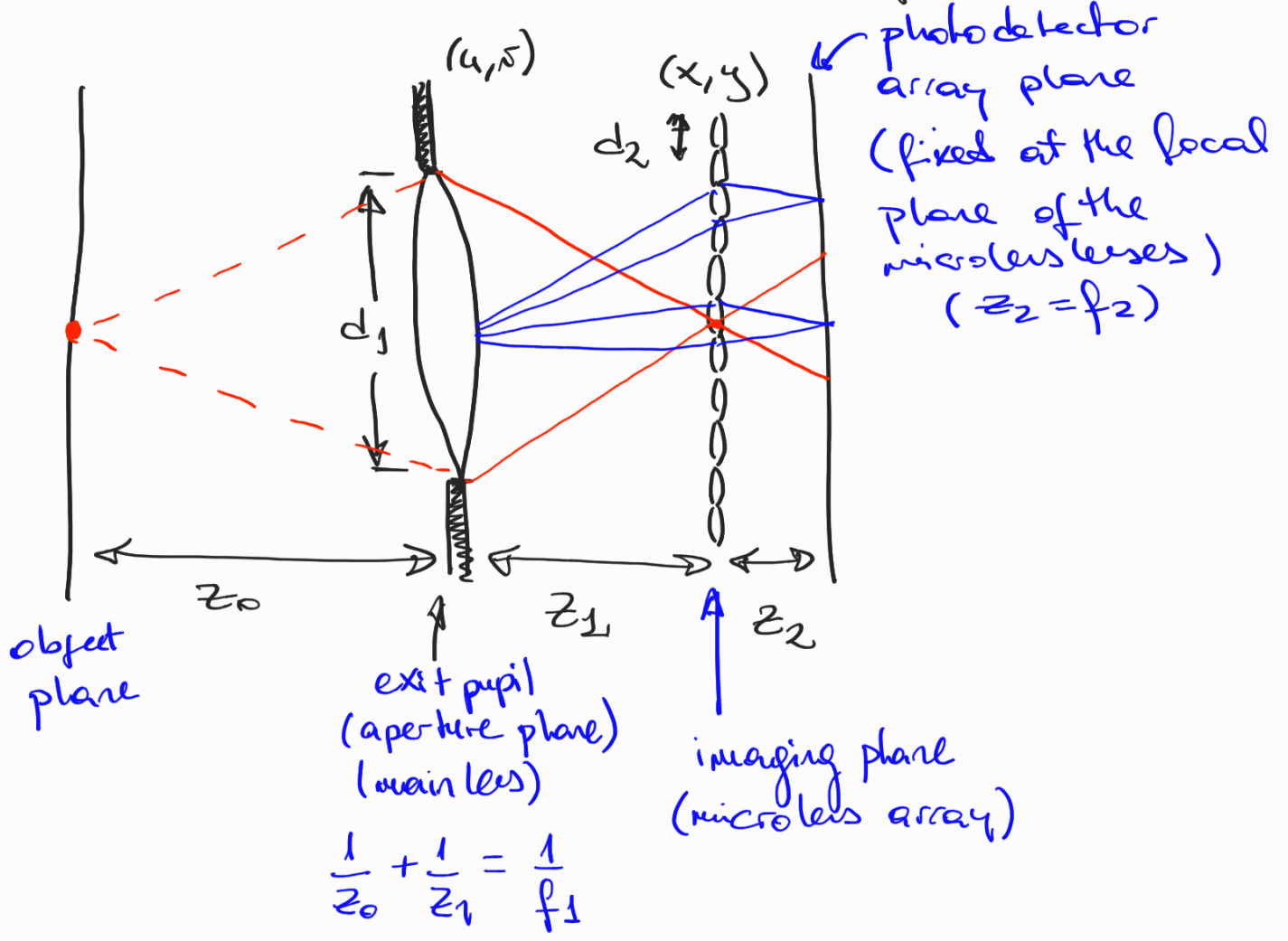
≡ El siguiente desarrollo significativo emerge principalmente de las áreas de 'Computer Vision' y 'Computer Graphics'. En seguida de

definir la Función Plenóptica, Abelson y Wang desarrollaron un sistema de captura para coleccionar los datos y lo nombraron 'Cámara Plenóptica'.

Cámara plenóptica convencional, 'Focused Plenoptic Camera'.

Cámara plenóptica 1.0

Se puede pensar como una versión de campo lejero de 'integral imaging'.



En esta configuración, el arreglo de microlentes se coloca en el plano imagen de la lente principal (es decir a una cámara comercial, pondríamos el fotodetector en ese plano para obtener una imagen en foco del objeto.)

Entonces, si la lente principal tiene distancia focal  $f_1$ ,  $\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_1} = \frac{1}{f_1}$ .

El fotodetector se ubica a distancia  $z_2$  detrás del arreglo de lentiillas. Entonces los rayos de luz que convergen en el plano de los microlentes van a diverger nuevamente y llegarán al sensor en diferentes localizaciones. La imagen así capturada contiene información direccional (angular) del objeto.

Como los microlentes son muy pequeños en comparación con la lente principal,  $z_1$  se encuentra a efectos prácticos en el infinito óptico, por lo que si las microlentes tienen distancia focal  $f_2 \Rightarrow z_2 = f_2$ .

Para evitar cross-talk, los rayos no deberían extenderse a los píxeles asociados (detrás) de microlentes adyacentes.

Éso se logra si  $\frac{d_1}{z_1} = \frac{d_2}{z_2}$  (f-Number de la lente principal coincide con f-Number de microletra)

Esta configuración óptica particular, permite capturar el light field con el fotodetector.

## 'Subarray images' y 'Subaperture images'

↓ (parecido a imágenes elementales de I<sub>2</sub>I<sub>1</sub>)  
región del fotodetector detrás de  $\varphi$  microletra

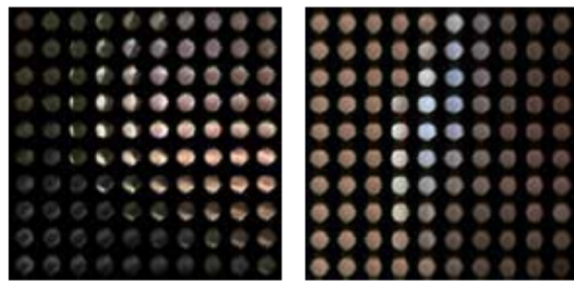
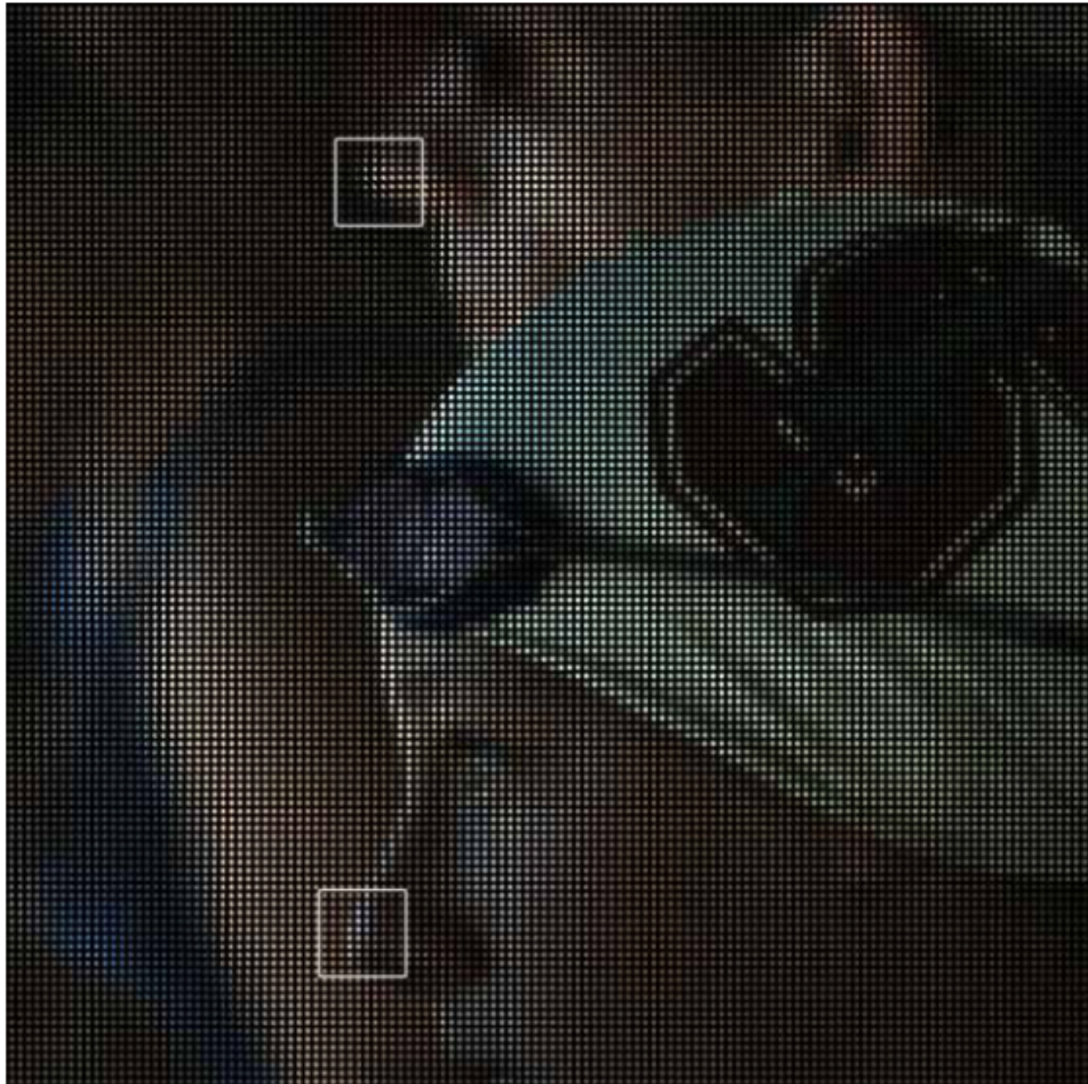
Si  $\varphi$  microletra lo pensamos como un pequeño píxel virtual, la imagen 'sub-arreglo' captura la información direccional de los rayos que pasan por ese píxel.

(  $L(u, v, x, y)$  con diferentes  $(u, v)$  pero el mismo  $(x, y)$  )

↓ (parecido a sub-imágenes en I<sub>2</sub>I<sub>1</sub>)  
Como las microletras son muy pequeñas entonces de un  $(u, v)$  llegan a  $\varphi$  lentilla rayos 'paralelos'.

(rayos  $L(u, v, x, y)$  con mismo  $(u, v)$  pero diferentes  $(x, y)$ )

## Sub array images



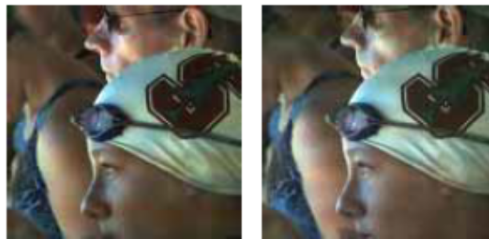
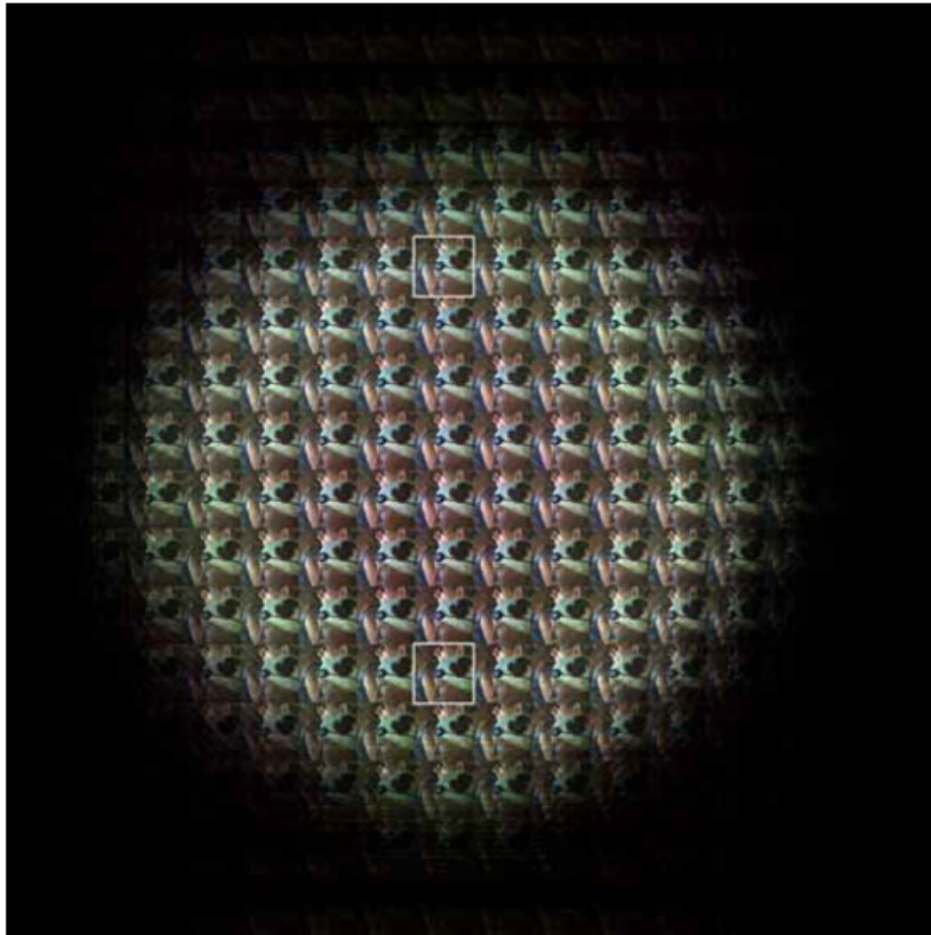
(z1)

(z2)

Figure 3.3: Raw light field photograph read off the photosensor underneath the microlens array. The figure shows a crop of approximately one quarter the full image so that the microlenses are clearly visible in print.



## Subaperture images



(z1)

(z2)

Figure 3.5: Sub-aperture images of the light field photograph in Figure 3.3. Images  $z_1$  and  $z_2$  are close-ups of the indicated regions at the top and bottom of the array, respectively.

Para crear una 'subaperture image', se considera un valor  $(u, v)$  y se lee el valor correspondiente a ese  $(u, v)$  en cada 'subarray image' y se 'pegan' juntos para formar la imagen de salida.



de ese objeto están indicados con las líneas sólidas en rojo. Estos rayos van a converger en el arreglo de microlentes en el plano  $x$  donde la fuente puntual estaría en foco (a distancia  $s_i$  de la lente principal).

Ahora consideremos otra fuente puntual ( $\bullet$ ), localizada en el eje óptico pero detrás del plano nominal focal de la cámara plenóptica. Los rayos provenientes de ese punto convergen a una cierta distancia a frente de los microlentes y divergen para cuando llegan al plano de microlentes.

Sin embargo, definiendo un nuevo plano (sensor virtual) en  $x'$  en el lugar donde convergen los rayos en  $s_i'$ , es posible obtener una nueva imagen reenfocada digitalmente para ver en foco la fuente puntual en  $s_o'$ .

La profundidad del plano de reenfoque se controla a través del parámetro  $\alpha$ .

Terminos de ec. (3) :

$\approx L_F(u, v)$

$$E_{(\alpha F)}(x', y') = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_F \left[ u \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{x'}{\alpha}, v \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{y'}{\alpha}, u, v \right] du dv$$

fotografía formada en el sensor virtual  $(x', y')$  a distancia  $\alpha F$  de  $(u, v)$

light field parametrizado por el plano  $(x, y)$  a distancia  $F$  de  $(u, v)$

El reenfoco digital es conceptualmente la suma dilatada y corrida de las imágenes subapertura sobre todo el plano  $(u, v)$  de la apertura

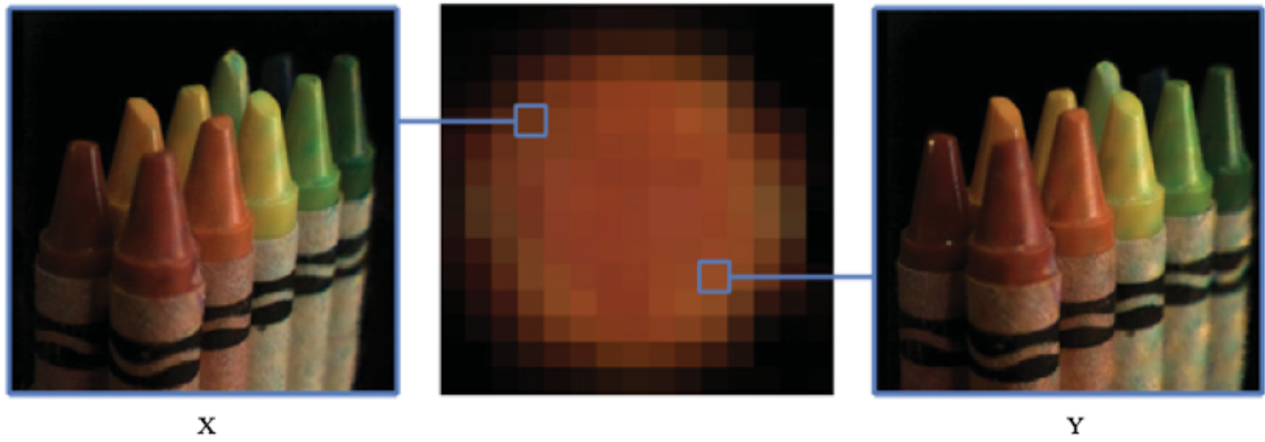
$$L_F^{(u, v)} \left[ u \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{x'}{\alpha}, v \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{y'}{\alpha} \right] \text{ imagen subapertura}$$

a partir de  $L_F^{(u, v)}(x', y')$

dilatada un factor  $\alpha$  y corrida en un factor  $\left[ u \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right), v \left( 1 - \frac{1}{\alpha} \right) \right]$ .

El reenfoco digital se puede implementar desplazando y sumando las imágenes de subaperturas del light field.

subaperture images



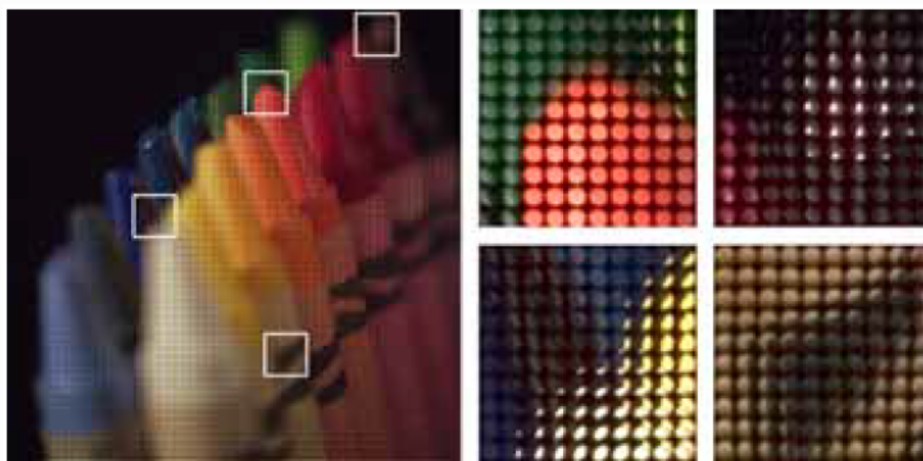
(A): No refocus

(B): Refocus closer

(C): Refocus further

Figure 4.2: Shift-and-add refocus algorithm, illustrated with just two sub-aperture images for didactic purposes.

Raw image



Refocus



