

VISIÓN 3D

Correspondencia Estéreo



Ingeniería de Sistemas y Automática

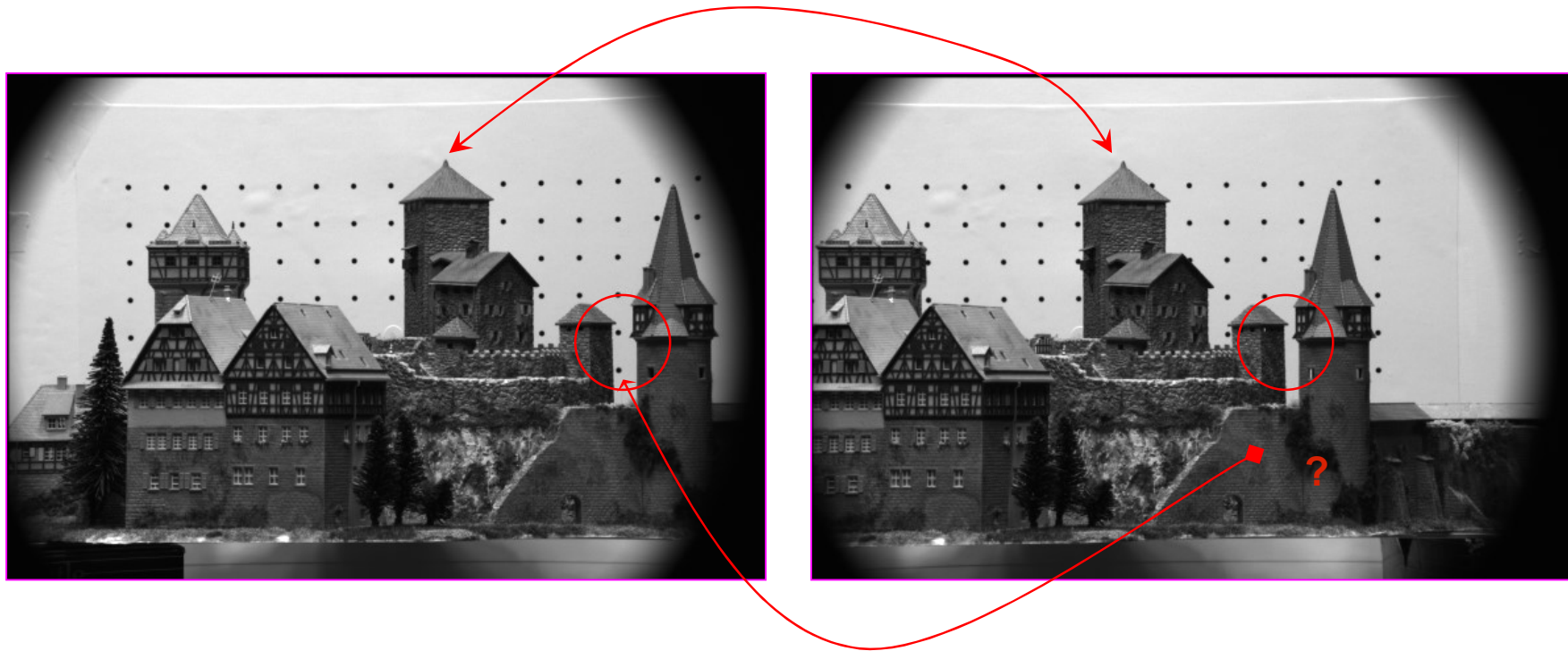
Universidad Miguel Hernández

Tabla de Contenidos

- El Problema de Correspondencia
- Restricciones aplicadas a la Correspondencia
- Técnicas de Correspondencia

Problema de Correspondencia

- Dada una *característica* en una imagen (punto, borde,...), proyección de una *primitiva* en un espacio 3D (cuya localización es desconocida), obtener cuál es la *característica* proyectada, de la misma *primitiva*, en otra imagen tomada desde un punto de vista diferente.



Problema de Correspondencia

- Disparidad

- El problema de correspondencia se puede formular como la búsqueda de una función de disparidad:

B

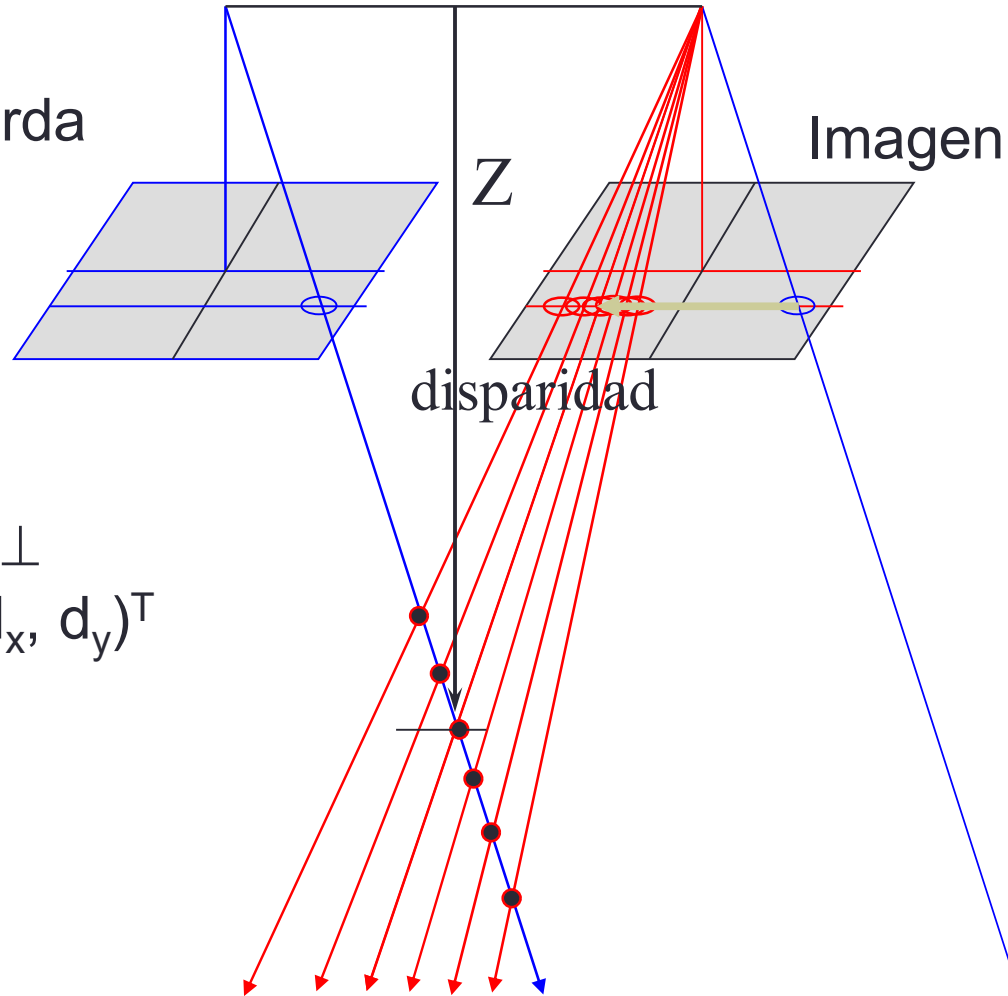
Imagen izquierda

Imagen derecha

Z

disparidad

$$D: F(x, y) \rightarrow (d_x, d_y) \perp \\ (x', y')^T_F = (x, y)^T_F + (d_x, d_y)^T$$



Problema de Correspondencia

- Se trata de un problema mal condicionado:
 - Las imágenes izquierda y derecha captadas por un sistema de visión estereoscópica son obtenidas desde diferentes posiciones y ángulos.
 - Las condiciones de iluminación pueden ser muy diferentes.
 - Además, las cámaras son intrínsecamente diferentes (datos de calibración diferentes).
 - Geométricamente, pueden existir múltiples soluciones o que no exista solución: un punto puede encontrarse en una de las imágenes y no en la otra (oclusiones, o fuera del FOV de la cámara).
 - También se puede encontrar una falsa correspondencia del punto (p.e. puntos de apariencia muy similar).

Problema de Correspondencia

- La reconstrucción 3D está ligada a la solución del problema de **correspondencia** y al problema de **calibración**.
- La solución del problema de correspondencia exige imponer restricciones sobre el **modelo geométrico de las cámaras**, el **modelo fotométrico de los objetos** de la escena y sobre las **primitivas** utilizadas.
- La correspondencia estéreo está limitada generalmente a un rango de distancias (profundidad).
 - En el caso humano este rango está situado entre los 40 cm (límite fusional de Pannum) y unos 100m (a partir de 10m la percepción de profundidad es muy limitada)
- Su solución supone generalmente un elevado coste computacional.

Tabla de Contenidos

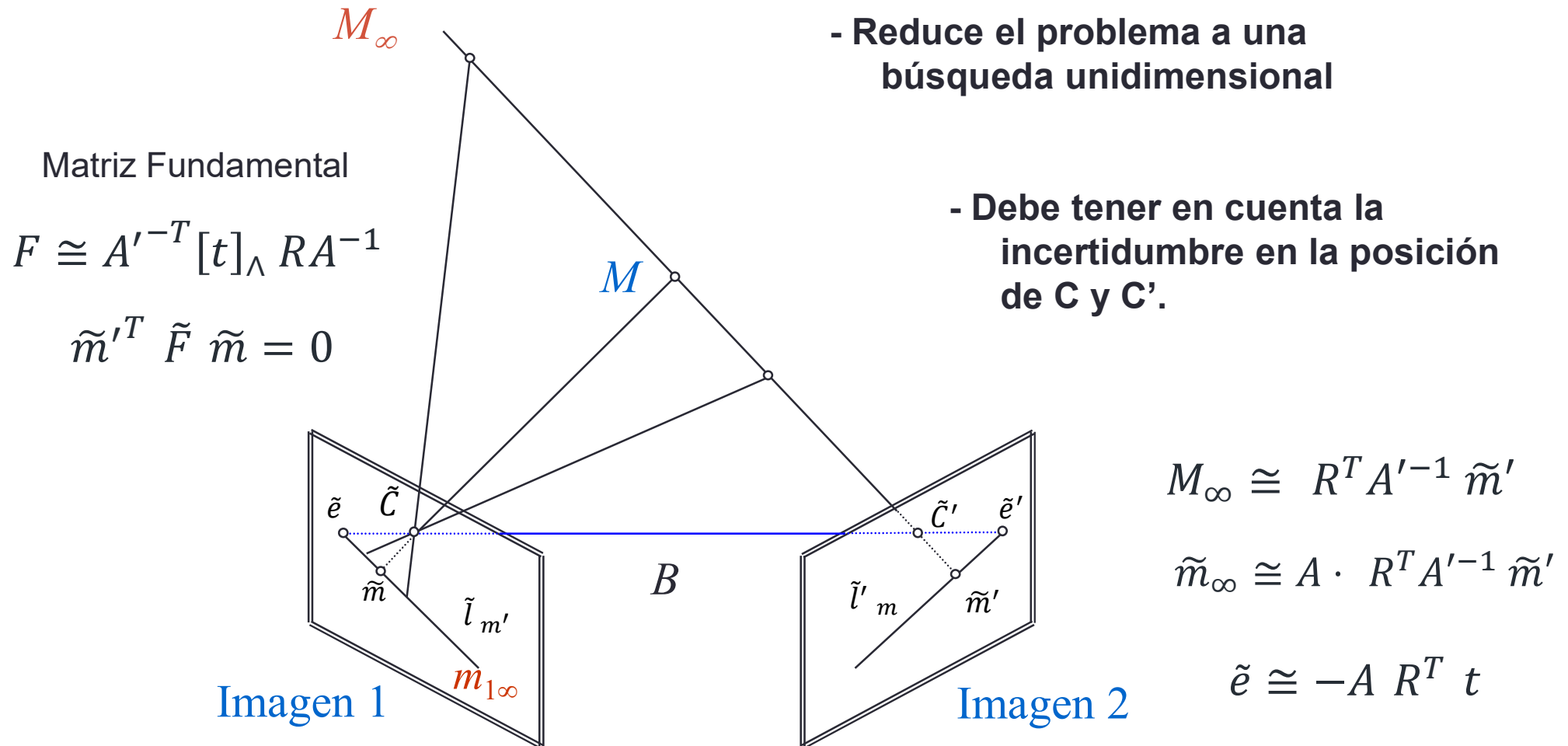
- El Problema de Correspondencia
- Restricciones aplicadas a la Correspondencia
- Técnicas de Correspondencia

Restricciones para la Correspondencia

- **Restricciones geométricas impuestas por el sistema de formación de imágenes**
 - Restricción epipolar
 - Límite de disparidad
- Restricciones geométricas procedentes de los objetos visualizados:
 - Orden posicional
 - Límite del gradiente de disparidad
 - Unicidad
 - Continuidad de superficie
 - Continuidad figural
- Restricciones fotométricas
- Restricciones locales de primitiva

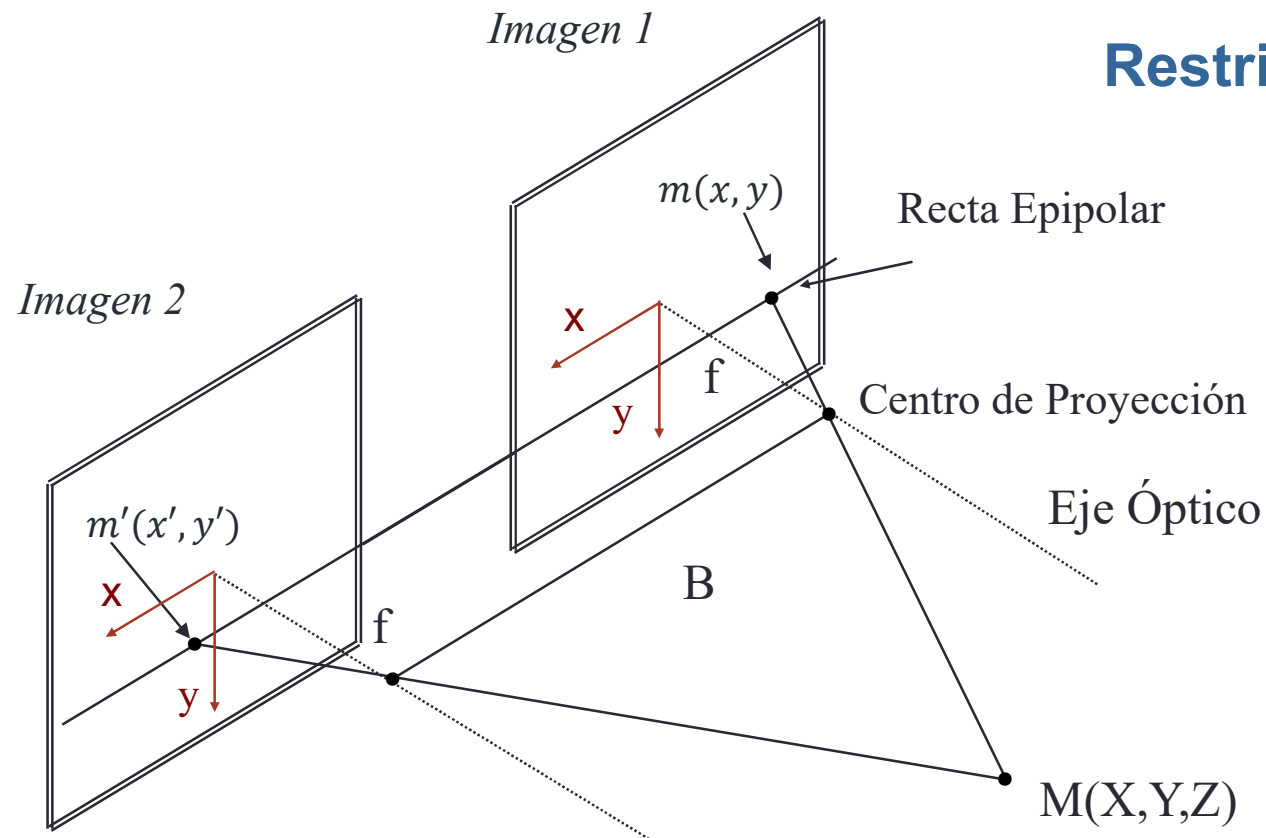
Restricción Epipolar

- Dado un punto m' en la imagen 2, su correspondiente debe estar sobre la línea epipolar $l_{m'}$ (intersección del plano epipolar $\Pi\{m', C, C'\}$ y el plano de imagen 1).



Restricción Epipolar

- Sistemas de ejes alineados



Restricción epipolar:

$$y = y'$$

Restricciones para la Correspondencia

- Restricciones geométricas impuestas por el sistema de formación de imágenes
 - Restricción epipolar
 - Límite de disparidad
- Restricciones geométricas procedentes de los objetos visualizados:
 - Orden
 - Límite del gradiente de disparidad
 - Unicidad
 - Continuidad de superficie
 - Continuidad figural
- Restricciones fotométricas
- Restricciones locales de primitiva

Límite de disparidad

- La disparidad es función de la distancia entre el objeto y la cámara:
 - Ejes paralelos: $\mathcal{R}_D = [d_{\min}, d_{\max}] \Leftrightarrow \mathcal{R}_Z = [Z_{\min}, Z_{\max}]$

- Esta restricción impone un rango de profundidades para los objetos de la escena

$$Z = \frac{f B}{d} \quad d = x' - x$$

- Limita un segmento de la recta epipolar para la búsqueda de correspondencias
- Permite rechazar aquellas correspondencias cuya disparidad esté fuera de dicho intervalo.
- La visión estereoscópica humana también restringe la disparidad máxima (límite fusional de Panum)

Restricciones para la Correspondencia

- Restricciones geométricas impuestas por el sistema de formación de imágenes
- **Restricciones geométricas procedentes de los objetos visualizados:**
 - Orden
 - Límite del gradiente de disparidad
 - Unicidad
 - Continuidad de superficie
 - Continuidad figural
 - Posición general
- Restricciones fotométricas
- Restricciones locales de primitiva

Orden Posicional

- Dados dos puntos en la recta epipolar **E1** sus puntos correspondientes deben estar ubicados en la recta epipolar **E2** en el mismo orden.



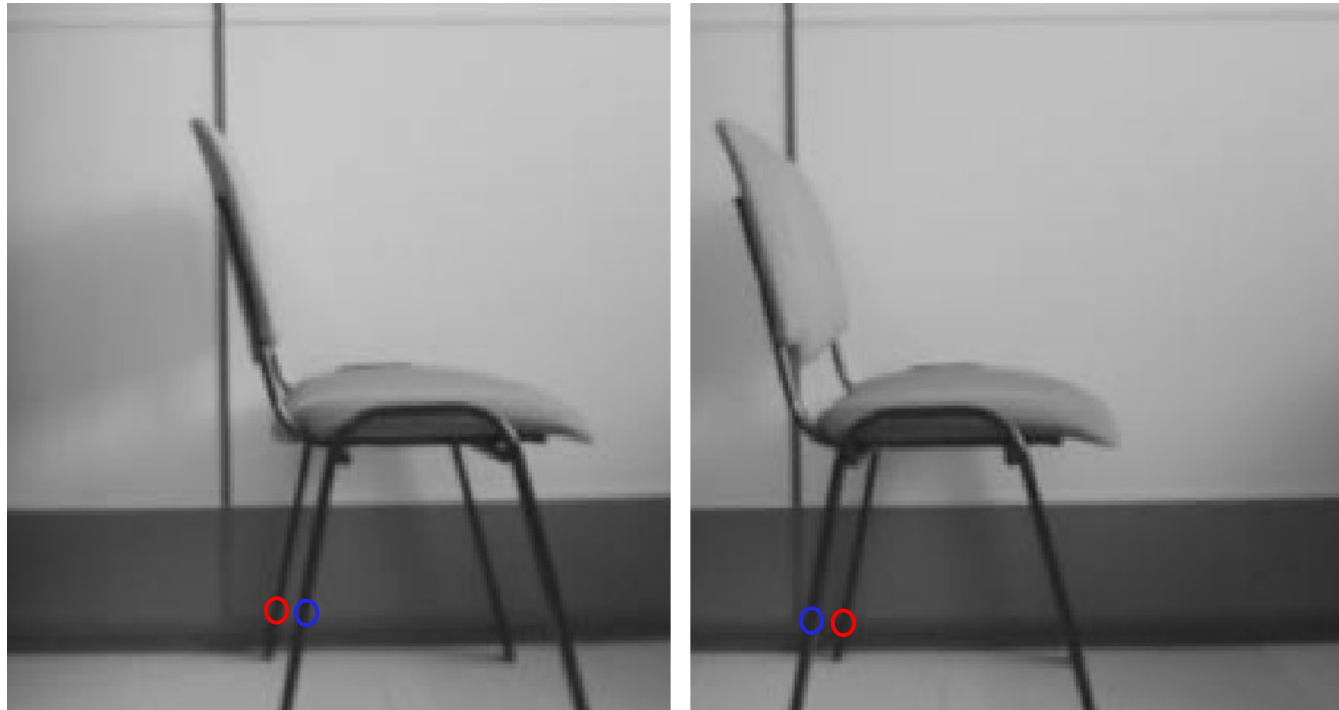
Imagen izquierda



Imagen derecha

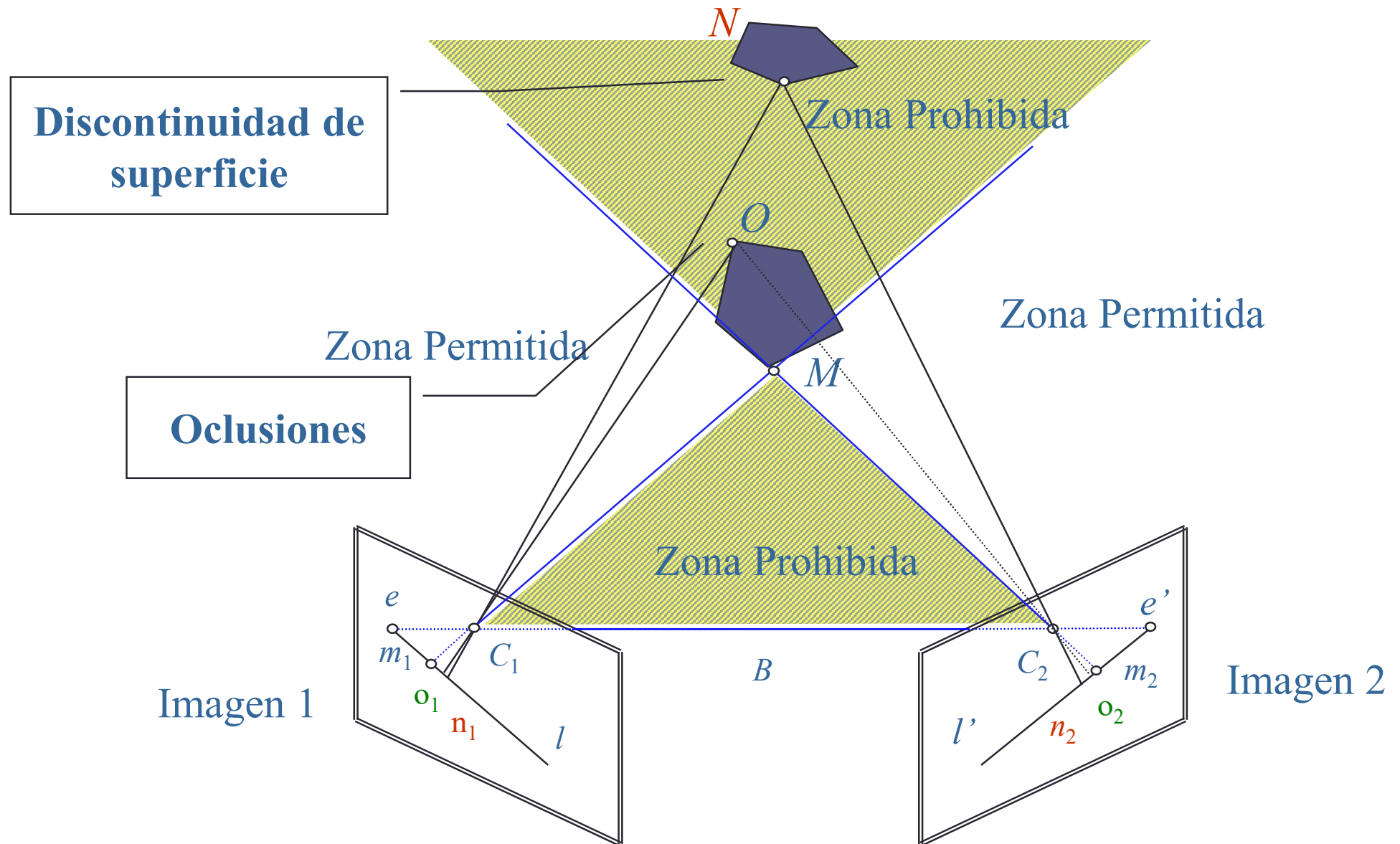
Orden Posicional

- Cuando la escena tiene objetos estrechos situados a distancias claramente diferentes puede incumplirse esta condición. (No existe continuidad de superficie)



Orden

- Representación geométrica de la zona prohibida
 - Oclusiones y objetos a diferente distancia



Límite del gradiente de disparidad

Gradiente de Disparidad

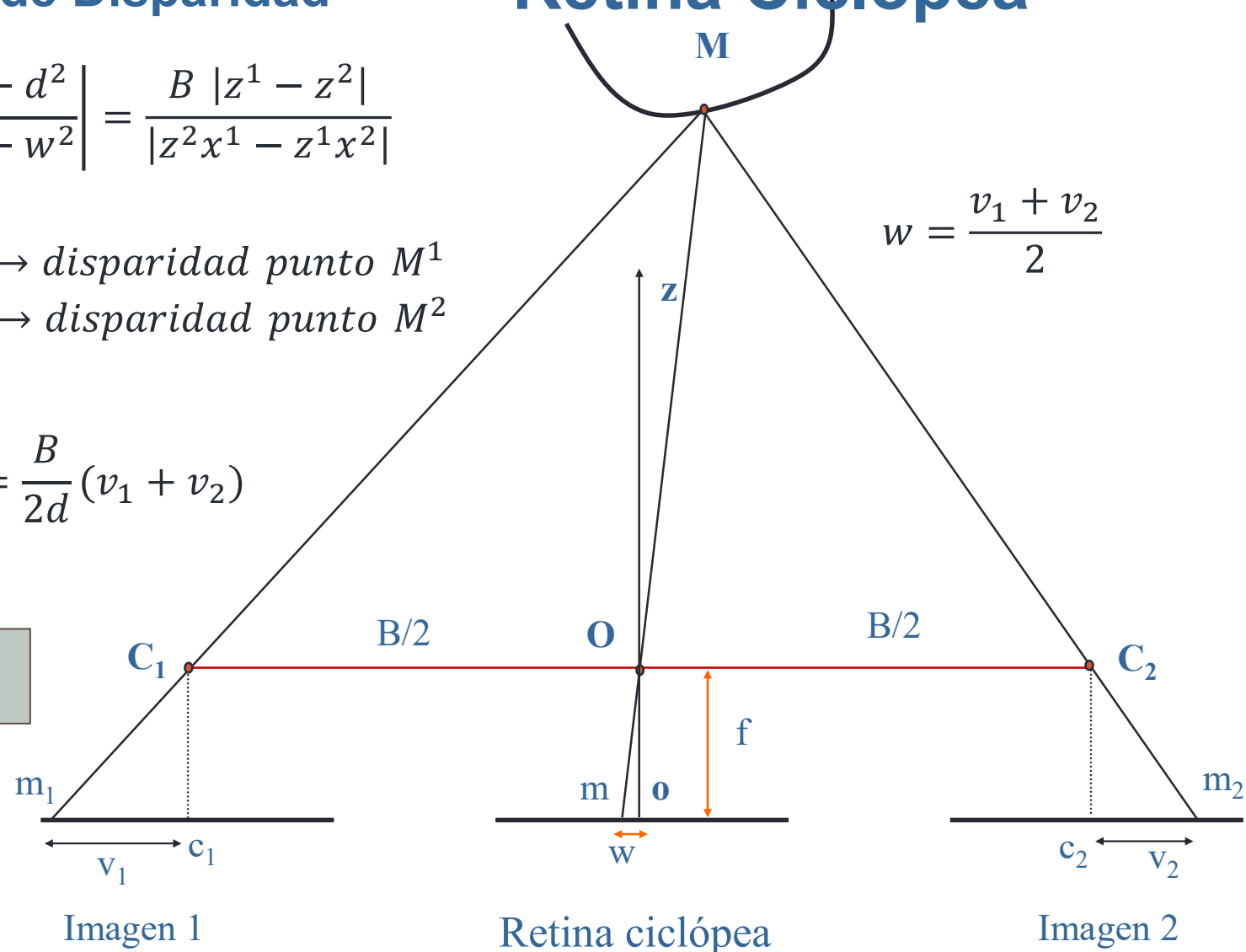
$$GD = \left| \frac{d^1 - d^2}{w^1 - w^2} \right| = \frac{B \, |z^1 - z^2|}{|z^2 x^1 - z^1 x^2|}$$

$$\begin{aligned} d^1 &= v^1_2 - v^1_1 \rightarrow \text{disparidad punto } M^1 \\ d^2 &= v^2_2 - v^2_1 \rightarrow \text{disparidad punto } M^2 \end{aligned}$$

$$d = B \frac{f}{Z} \quad x = \frac{B}{2d} (v_1 + v_2)$$

$$GD < K$$

Retina Ciclópea



“PMF: a stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit”

Pollard SB, Mayhew JE, Frisby JP Perception. 14(4) (1985)

Límite del gradiente de disparidad

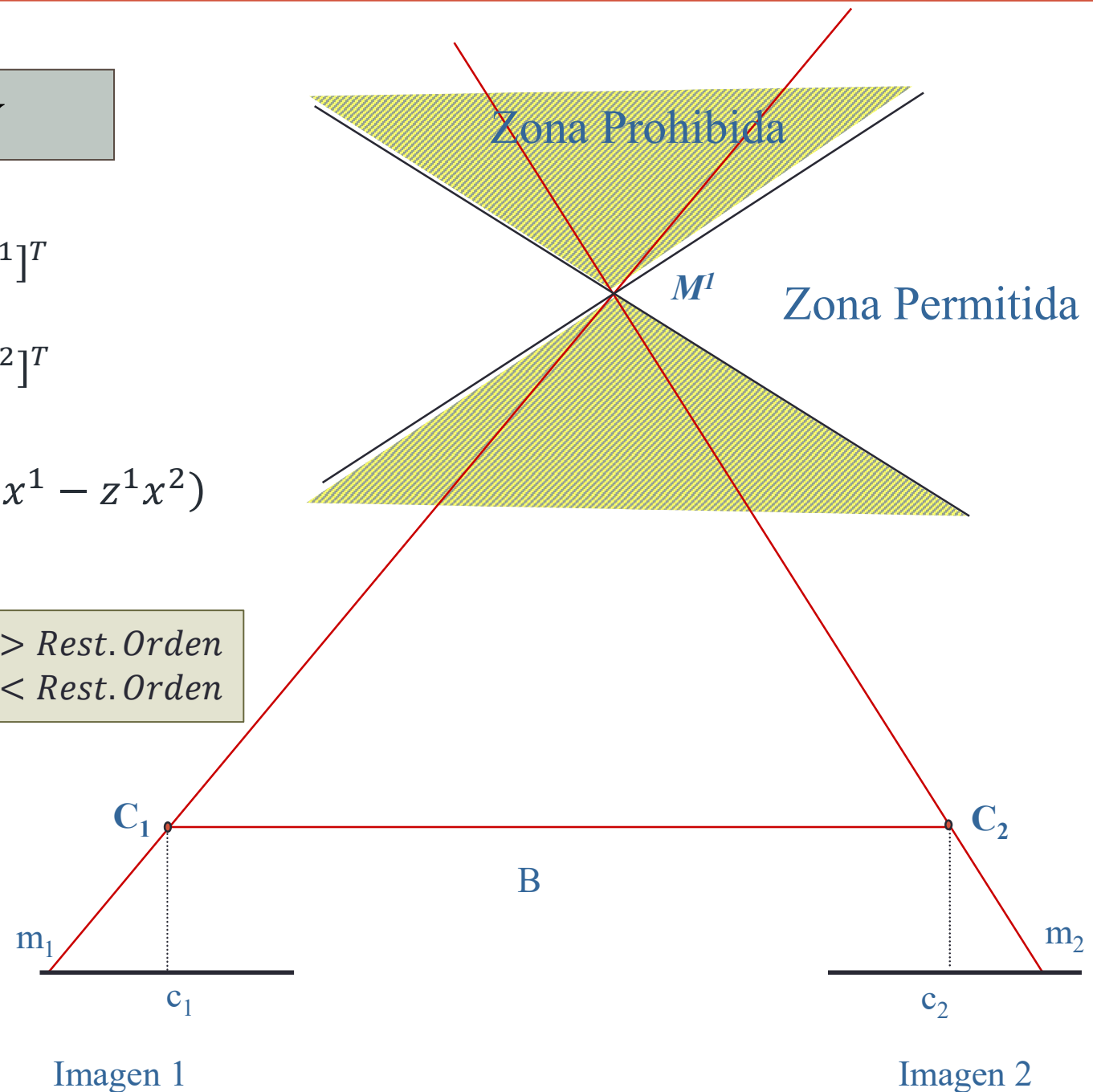
$$GD < K$$

$$M^1 = [x^1, z^1]^T$$

$$M^2 = [x^2, z^2]^T$$

$$z^1 - z^2 = \pm \frac{K}{B} (z^2 x^1 - z^1 x^2)$$

$$K \begin{cases} < 2 \rightarrow \text{zona prohibida} > \text{Rest. Orden} \\ > 2 \rightarrow \text{zona prohibida} < \text{Rest. Orden} \end{cases}$$



Límite del gradiente de disparidad

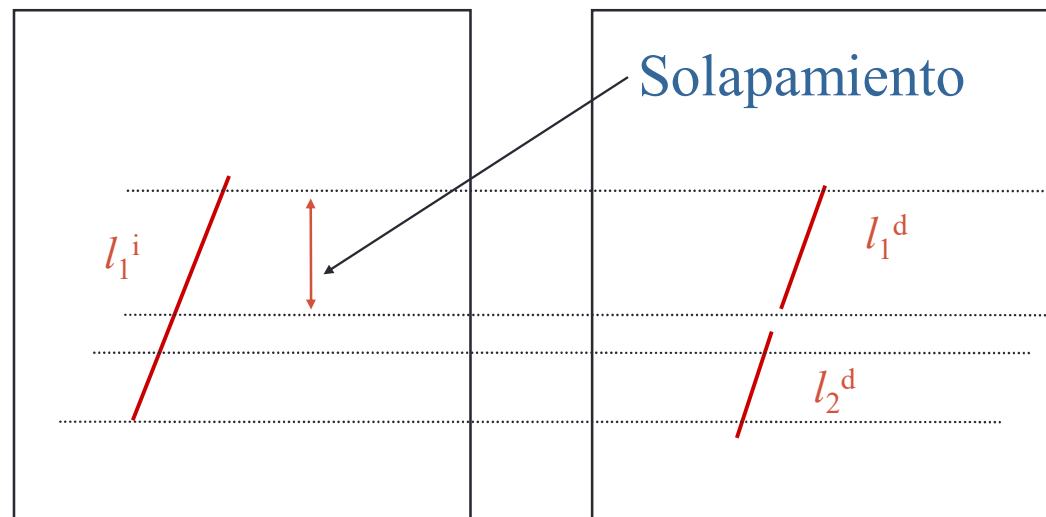
- Interpretación geométrica:
 - Esta restricción impone un límite en las tangentes de las superficies del objeto.
 - Las variaciones deben ser lo suficientemente pequeñas para que los puntos de la superficie yazcan fuera de la zona prohibida.
 - Se trata pues de una restricción sobre la forma de los objetos que pueden ser reconstruidos mediante un sistema estereoscópico.
 - De forma indirecta impone también la restricción de unicidad.

Unicidad

- Para cada punto en la imagen 1 existe solamente un único punto correspondiente en la imagen 2
 - La condición de unicidad se cumple siempre que en la escena no existan objetos semitransparentes (varios puntos sobre la misma recta proyección generan un mismo punto imagen en el sensor).
 - La aplicación se realiza seleccionando la mejor de las posibles correspondencias obtenidas de la imposición del resto de restricciones.
 - Esta asociada en algunos algoritmos al proceso de **relajación** (mecanismo iterativo con componentes inhibitorias y excitatorias)

Unicidad

- Esta restricción se puede extender a primitivas de mayor nivel como **contornos** o **segmentos de borde**. En este caso la etapa de segmentación puede producir agrupaciones diferentes en ambas imágenes.
- La restricción de unicidad debe reformularse de forma que incorpore no solamente las primitivas utilizadas, sino también la relación geométrica tridimensional con sus vecinos.
- Se puede expresar en función del solapamiento admisible.

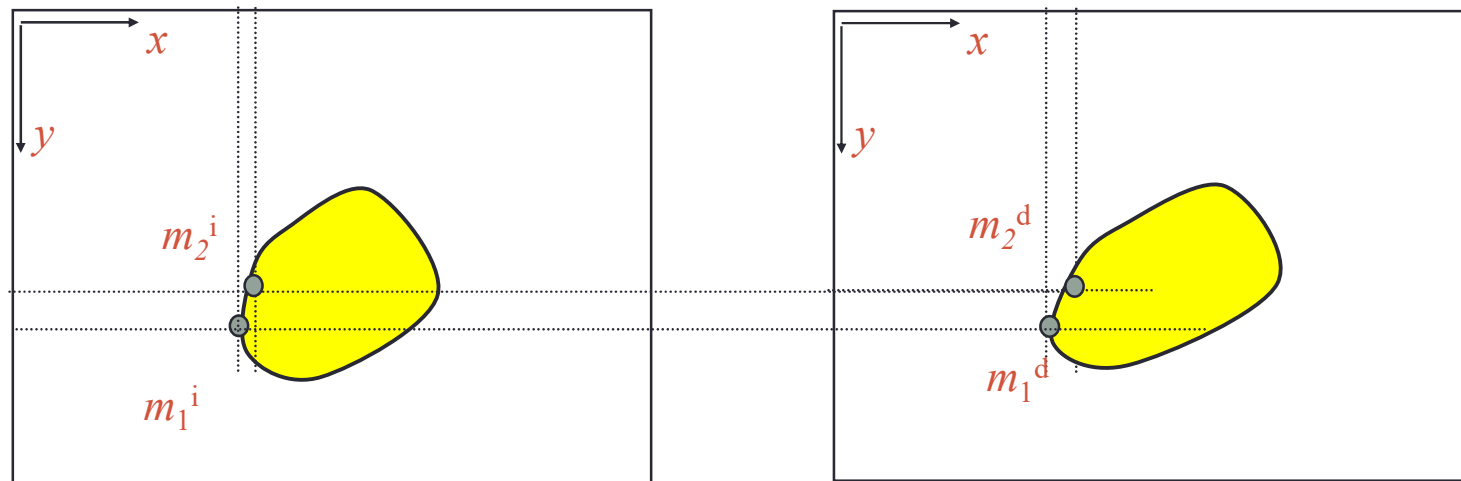


Continuidad de superficie

- Los puntos proyectados sobre la imagen pertenecen a las superficies de los objetos de la escena. Estas superficies se asumen continuas presentando discontinuidades únicamente en la separación de los objetos (**principio de cohesión de la materia**).
 - La continuidad de las superficies se traduce en una continuidad en el **mapa de profundidades**.
 - Como vimos anteriormente la profundidad y la disparidad están estrechamente relacionadas, por lo que esta restricción se impone como una **continuidad de las disparidades** en la escena
 - En algunos algoritmos está ligado al proceso de **relajación**.

Continuidad figural

- Propuesto por **Mayhew y Frisby**, establece la continuidad de las superficies formulada como la continuidad de la disparidad a lo largo de los contornos de las figuras, y no a través de ellas.
- Esta formulación evita los problemas derivados de la discontinuidad en los límites de las superficies.



$$d_1 = x_1^i - x_1^d$$

$$d_2 = x_2^i - x_2^d$$

$$m_1, m_2 \in C_{ob} \quad |\bar{m}_1 - \bar{m}_2| < \Delta_a \Rightarrow |d_1 - d_2| < \Delta_b$$

“PMF: a stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit”

Pollard SB, Mayhew JE, Frisby JP Perception 14(4) (1985)

Restricciones para la Correspondencia

- Restricciones geométricas impuestas por el sistema de formación de imágenes
- Restricciones geométricas procedentes de los objetos visualizados:
- **Restricciones fotométricas**
 - Restricción de reflectancia superficial
 - Restricción de compatibilidad fotométrica
 - Restricción de compatibilidad fotométrica diferencial
- Restricciones locales de primitiva

Restricciones fotométricas

- Son restricciones basadas en modelos de interacción de los objetos con con la iluminación
 - Restricción de reflectancia superficial:
 - Asume un modelo de reflectancia lambertiana para las superficies. La intensidad de la proyección de un punto 3D no depende del punto de vista.
 - Restricción de compatibilidad fotométrica:
 - La distribución de intensidades entre puntos homólogos debe ser similares

$$| I^l(x^l_1, y^l_1) - I^r(x^r_1, y^r_1) | < \Delta_a$$

- Restricción de compatibilidad fotométrica diferencial:
 - Dados dos puntos de una imagen cercanos (continuidad de superficie), la diferencia de intensidades entre ambos puntos debe ser similar la la diferencia de intensidades de sus homólogos.

$$| (I^l(x^l_1, y^l_1) - I^l(x^l_2, y^l_2)) - (I^r(x^r_1, y^r_1) - I^r(x^r_2, y^r_2)) | < \Delta_b$$

- Las restricciones anteriores se deben aplicar sobre **entornos de vecindad** (regiones) ya que los valores puntuales de intensidad en un pixel están sujetos a ruido.

Restricciones para la Correspondencia

- Restricciones geométricas impuestas por el sistema de formación de imágenes
- Restricciones geométricas procedentes de los objetos visualizados:
- Restricciones fotométricas
- **Restricciones locales de primitiva**

Restricciones locales de primitiva

- Compatibilidad entre las características geométricas de pares de posibles correspondencias
 - **Puntos de borde:**
 - Similaridad de orientación del gradiente (signo)
 - Compatibilidad entre diferentes canales
 - **Puntos característicos:**
 - Similaridad en el descriptor basado en HOG (Descriptor **SIFT**)
 - Similaridad en el descriptor basado en wavelets Haar (Descriptor **SURF**)

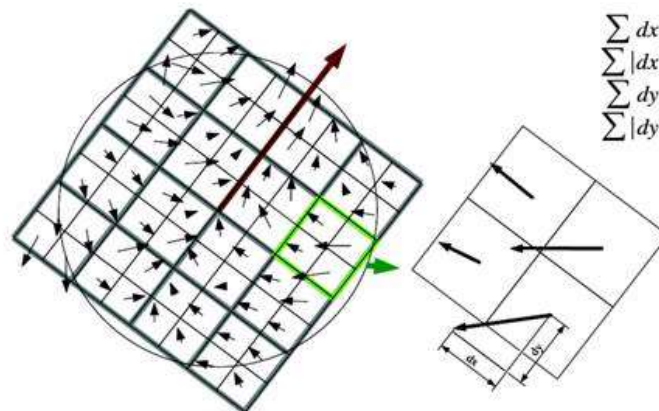
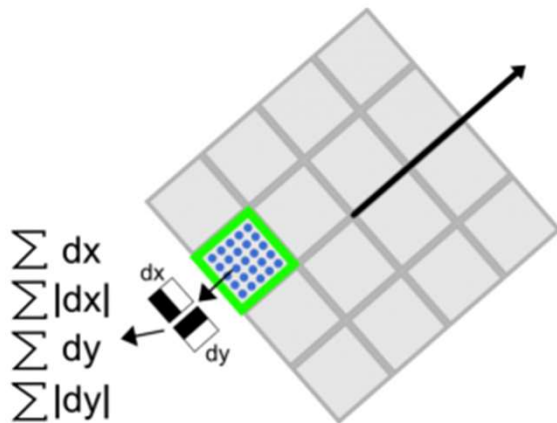
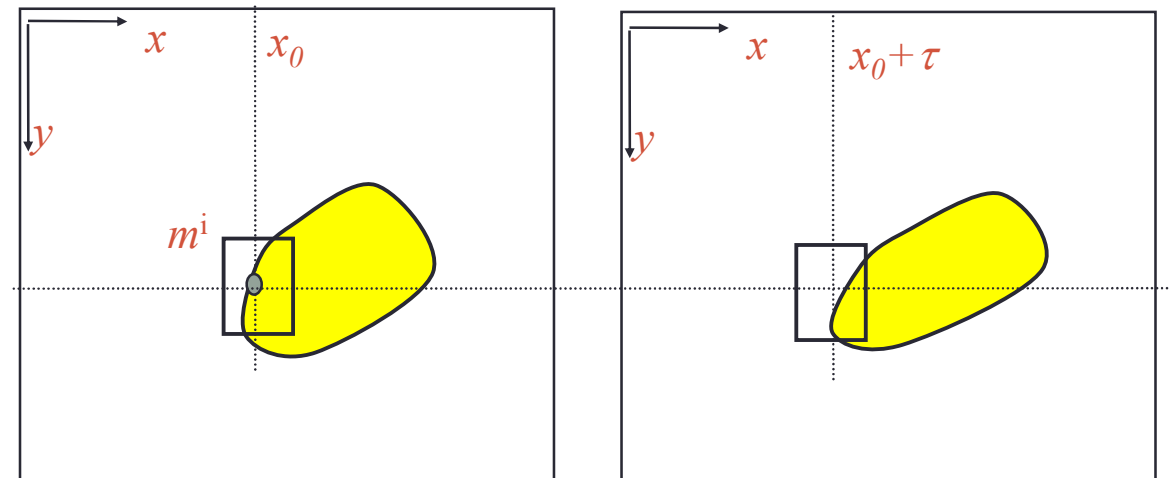


Tabla de Contenidos

- El Problema de Correspondencia
- Restricciones aplicadas a la Correspondencia
- **Técnicas de Correspondencia**
 - Técnicas basadas en área
 - Técnicas basadas en características

Correlación de área

- Estos métodos consideran las dos imágenes captadas como una señal bidimensional trasladada.
- Tratan de obtener, para cada punto de la imagen, dicha traslación minimizando o maximizando un cierto criterio (**correlación**)
- Para cada pixel de una imagen, se calcula la **correlación** entre la distribución de intensidades de una ventana centrada en dicho pixel y una ventana del mismo tamaño centrada en el pixel a analizar de la otra imagen.



Correlación de área

- Restricciones aplicadas:
 - Restricción lambertiana:
 - Las superficies han de ser lambertianas. La intensidad proyectada de un punto 3D no dependa del punto de vista
 - Restricción fronto-paralela:
 - Asumen que la disparidad es constante localmente (ventana de correlación). Las superficies deben ser paralelas a los planos de imagen de la cámara (pendiente pequeña)
 - Restricción de continuidad:
 - Las superficies son, al menos localmente, continuas.

Correlación de área

- Criterios de correlación (maximiza el funcional):
 - Suma de la diferencia de cuadrados:

$$SSD(m^l(x, y), m^r(x', y')) = -\frac{1}{N} \sum_{\substack{\forall i, j \perp \\ m(x+i, y+j) \in W(m)}} (I^l(m^l(x+i, y+j)) - I^r(m^r(x'+i, y'+j)))^2$$



$$SSD(m^l, m^r) = -\frac{1}{N} \sum_{\forall m_i \in W(m)} (I^l(m^l_i) - I^r(m^r_i))^2$$

Es muy sensible a diferencias de iluminación

- Suma de las diferencias de cuadrados centradas respecto a la media:

$$ZSSD(m^l, m^r) = -\frac{1}{N} \sum_{\forall m_i \in W(m)} \left((I^l(m^l_i) - \overline{I^l(m^l)}) - (I^r(m^r_i) - \overline{I^r(m^r)}) \right)^2$$

- Suma normalizada de las diferencias de cuadrados centradas respecto a la media

$$ZNSSD(m^l, m^r) = -\frac{\sum_{\forall m_i \in W(m)} \left((I^l(m^l_i) - \overline{I^l(m^l)}) - (I^r(m^r_i) - \overline{I^r(m^r)}) \right)^2}{N \sigma^l(m^l) \sigma^r(m^r)}$$

Tiene en cuenta variaciones en la distribución de intensidades dentro de la ventana

Correlación de área

- Correlación cruzada:

$$CC(m^l, m^r) = \frac{1}{N} \sum_{\forall m_i \in W(m)} I^l(m_i^l) \cdot I^r(m_i^r)$$

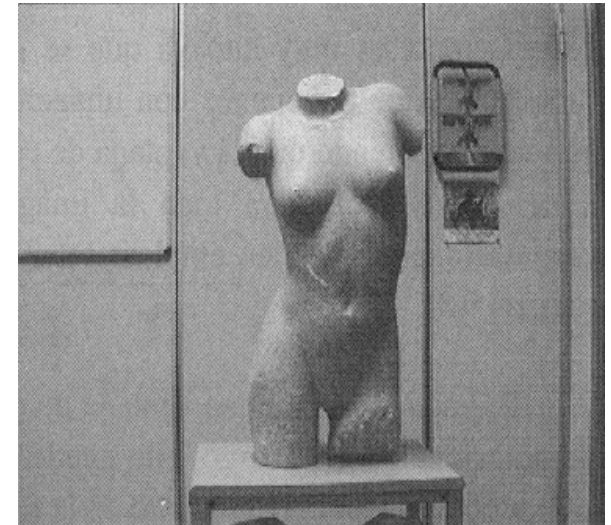
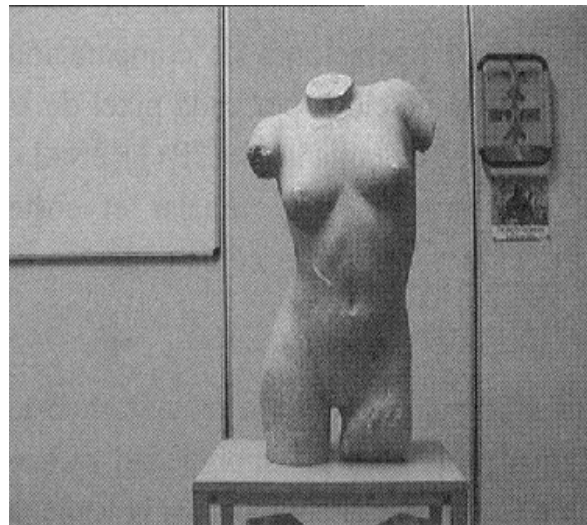
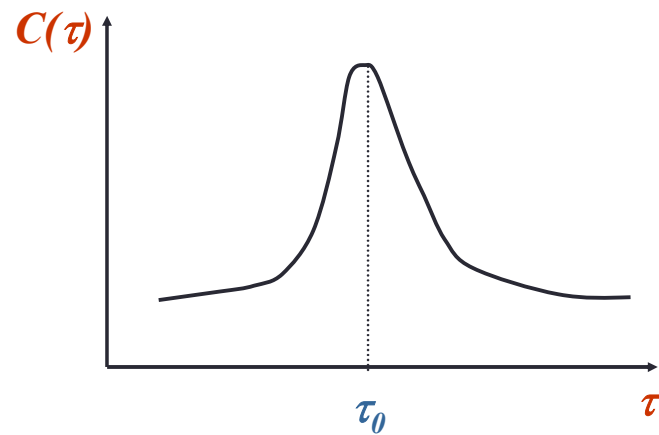
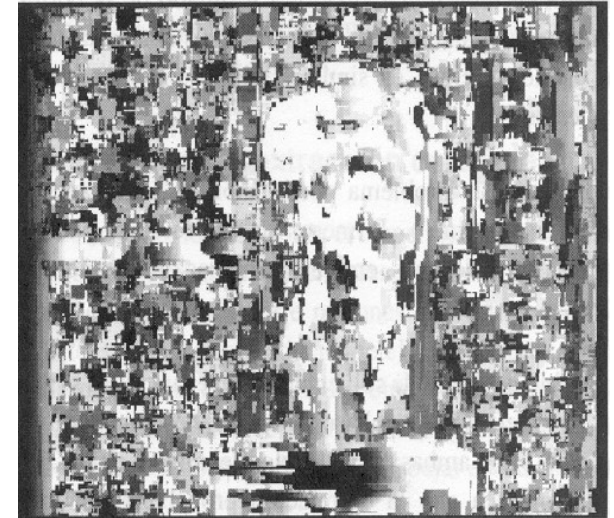
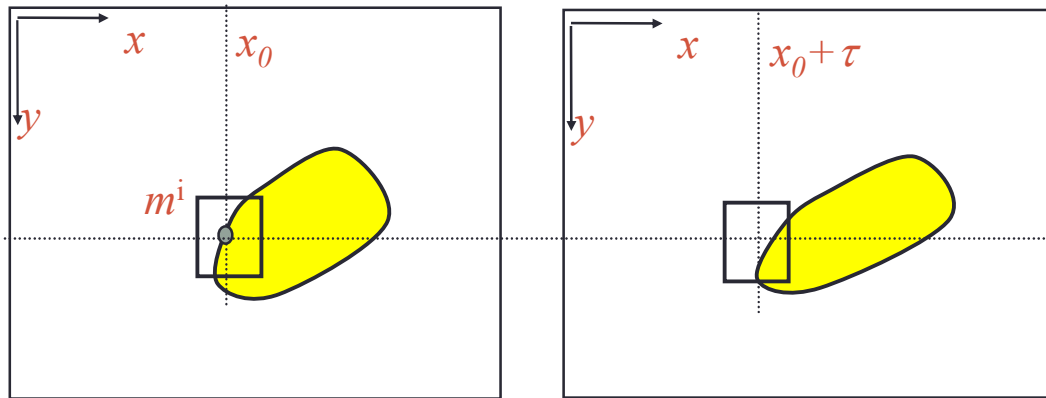
- Favorece zonas de intensidad elevada
- Correlación cruzada normalizada centrada en la media:

$$CC(m^l, m^r) = \frac{\sum_{\forall m_i \in W(m)} \left(I^l(m_i^l) - \overline{I^l(m^l)} \right) \cdot \left(I^r(m_i^r) - \overline{I^r(m^r)} \right)}{N \sigma^l(m^l) \sigma^r(m^r)}$$

- Mejoras:
 - Uso de ventanas adaptativas

Correlación de área

- Ejemplo:



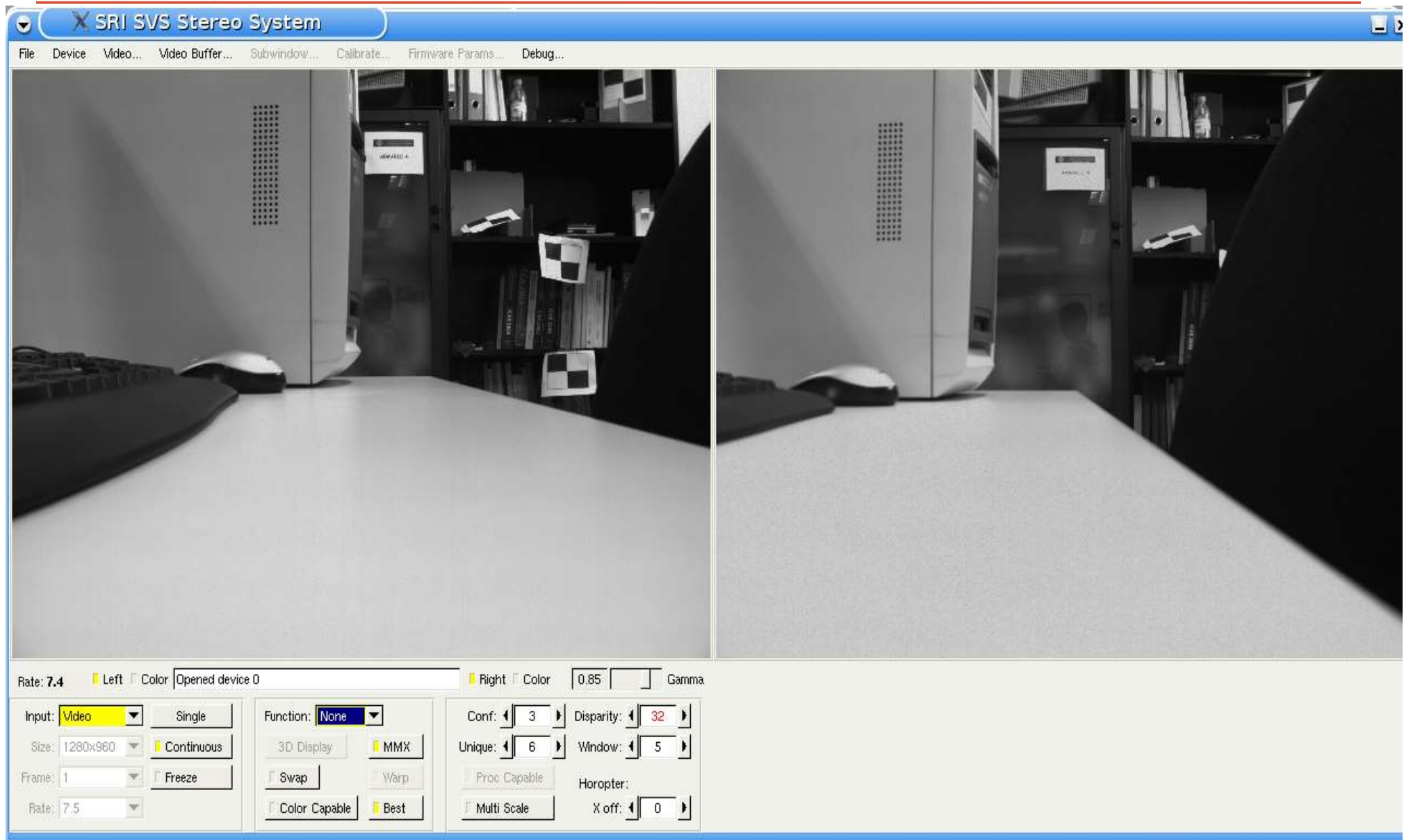
Correlación de área

- Ventajas
 - Obtienen buenos resultados sobre imágenes con textura importante
 - Permiten crear mapas densos de disparidad
 - Son fáciles de paralelizar
- Inconvenientes
 - Presentan problemas con imágenes con elevadas discontinuidades de superficie
 - Son muy sensibles a variaciones fotométricas debidas a sombras
 - Requieren un proceso posterior de eliminación de falsas correspondencias
 - Problemas con las oclusiones

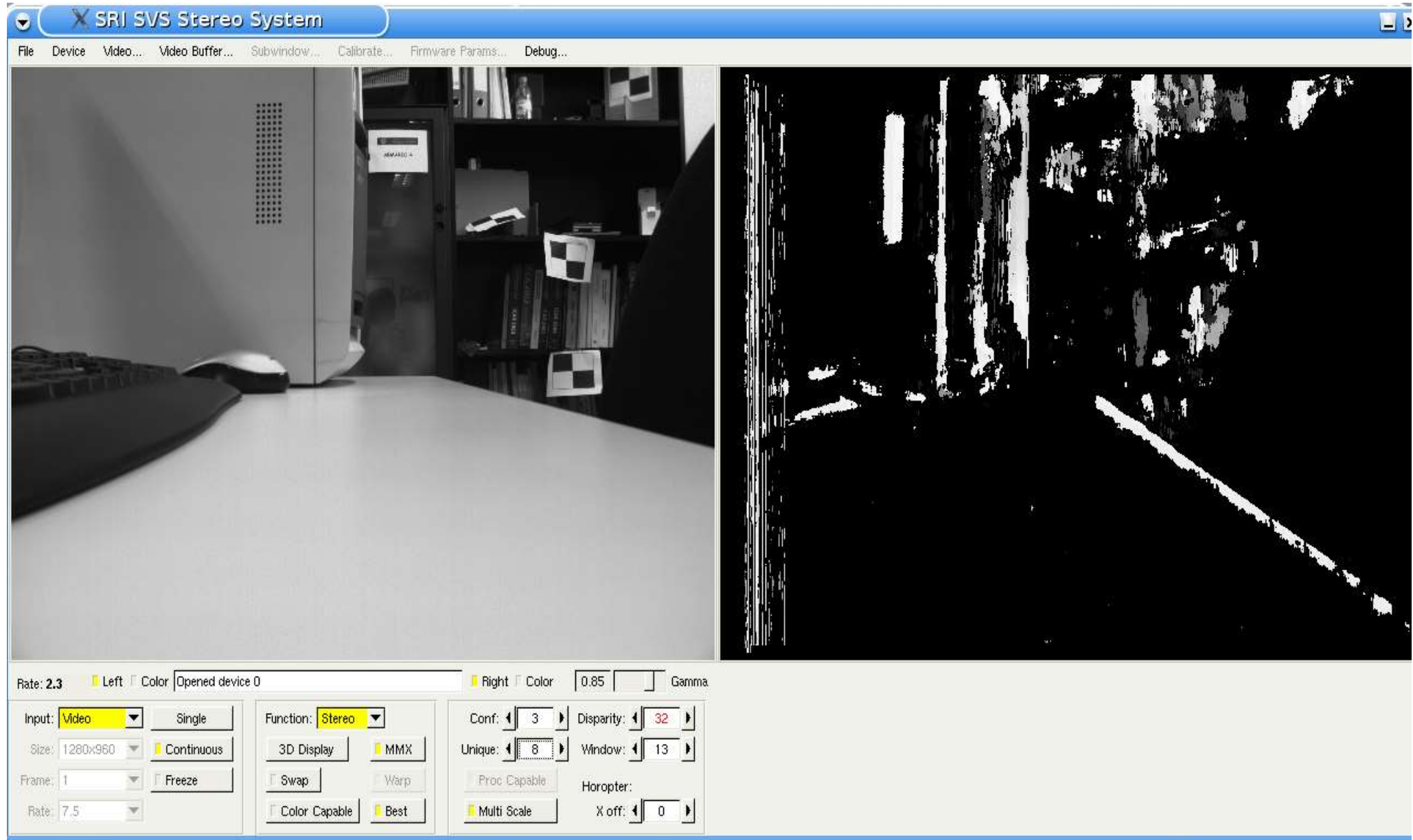
Correlación de área

- Elección de un tamaño de ventana:
 - Ventana pequeña (5x5):
 - Se reduce el coste computacional, pero puede originar problemas de ambigüedad.
 - Caso límite: Ventana de tamaño 1. Tenemos únicamente en cuenta el valor de gris del pixel.
 - Ventana grande (20x20):
 - Mayor coste computacional (más operaciones necesarias para cada comparación).
 - Es probable que existan píxeles de diferente disparidad dentro de la misma ventana, con lo que se viola la presunción fundamental de esta técnica.
- Una estrategia es realizar la correlación usando tamaños de ventana diferentes. La información obtenida en una escala grosera se utiliza para guiar y limitar la búsqueda de correspondencias a una escala más fina.

Correlación de área: Resultados típicos



Correlación de área: Resultados típicos

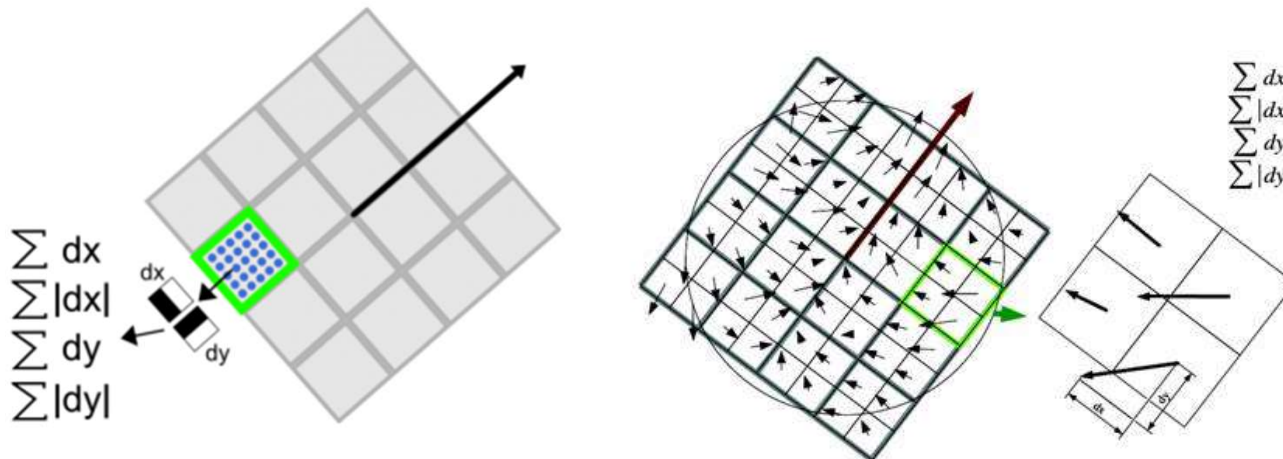


Técnicas Basadas en Características

- Las técnicas basadas en características establecen la correspondencia entre primitivas extraídas previamente de las imágenes.
- **Obtienen elementos de alto nivel**
 - Puntos de borde
 - Segmentos de borde
 - Regiones
 - Esquinas: Harris
 - Puntos alto gradiente: SIFT, SURF
- **Estos elementos son más estables ante cambios de:**
 - Iluminación.
 - Punto de vista.
- **Ventajas**
 - Permiten realizar comparaciones entre las propiedades de las características.
 - No poseen una fuerte dependencia de la restricción epipolar.
 - Se centran en lugares de la escena donde el contenido de información es máximo (zonas con más textura).
 - Son más robustas.
- **Inconvenientes**
 - Proporcionan información dispersa
 - La precisión de la medida depende del tipo de característica elegida (p.e. punto, borde).

Técnicas Basadas en Características

- Restricciones Locales de Primitiva:
 - **Propiedades de las primitivas:**
 - Puntos de borde:
 - Similaridad de orientación del gradiente (signo)
 - Compatibilidad entre diferentes canales
 - Puntos característicos:
 - Similaridad en el descriptor basado en HOG (Descriptor SIFT)
 - Similaridad en el descriptor basado en wavelets Haar (Descriptor SURF)



Técnicas Basadas en Características

- La distancia entre dos puntos característicos se calcula a partir del valor de sus vectores de descripción.
- Descriptores Métricos: (SIFT, SURF)
 - Distancia Euclídea:
 - Precisa que el vector de descripción esté normalizado
 - En otro caso, los atributos con mayor valor absoluto siempre prevalecen sobre los demás.

$$d_e(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{y}^{(j)}) = \sqrt{(x_1^{(i)} - y_1^{(j)})^2 + \dots + (x_n^{(i)} - y_n^{(j)})^2}$$

$$\mathbf{x}^{(i)} = [x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}]^T$$



$$\mathbf{y}^{(j)} = [y_1^{(j)}, \dots, y_n^{(j)}]^T$$

Técnicas Basadas en Características

- La distancia entre dos puntos característicos se calcula a partir del valor de sus vectores de descripción.
- Descriptores Métricos: (SIFT, SURF)
 - Distancia Mahalanobis: distancias normalizadas según varianza

$$d_m(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{y}^{(j)}) = \sqrt{(\hat{x}_1^{(i)} - \hat{y}_1^{(j)})^2 + \dots + (\hat{x}_n^{(i)} - \hat{y}_n^{(j)})^2}$$

$$\hat{x}_k^{(i)} = \frac{x_k^{(i)} - \mu_k}{\sigma_k}$$

$$d_m(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{y}^{(j)}) = \sqrt{\left(\frac{x_1^{(i)} - y_1^{(j)}}{\sigma_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n^{(i)} - y_n^{(j)}}{\sigma_n}\right)^2}$$

Misma media y varianza
Para las dos imágenes

- Distancia Coseno: ángulo entre los los vectores de descripción

$$d_{cos}(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{y}^{(j)}) = 1 - \cos(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{y}^{(j)}) = 1 - \frac{\mathbf{x}^{(i)T} \cdot \mathbf{y}^{(j)}}{|\mathbf{x}^{(i)}| \cdot |\mathbf{y}^{(j)}|}$$

Técnicas Basadas en Características

- La distancia entre dos puntos característicos se calcula a partir del valor de sus vectores de descripción.
- Descriptores Binarios: (ORB, BRIEF)
 - Distancia Hamming:
 - Número de dígitos binarios diferentes

$$d_{ham}(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{y}^{(j)}) = \mathcal{W}(\mathbf{x}^{(i)} \oplus \mathbf{y}^{(j)})$$

$$\mathbf{x}^{(i)} = [0, 0, 1, 0, 1, \dots, 1]^T$$



$$\mathbf{y}^{(j)} = [1, 0, 0, 0, 1, \dots, 1]^T$$

Técnicas Basadas en Características

- **Búsqueda de correspondencias:**
 - **Fuerza Bruta:** lineal
 - Calcula la distancia a todas las características de la otra imagen
 - Distancias: Euclídea, Mahalanobis, Coseno, Hamming (descriptores binarios)
 - Tipo de búsqueda
 - **NN:** devuelve el vecino más cercano
 - **K-NN:** devuelve los **K** vecinos más cercanos (permite imponer otras restricciones)
 - **FR-NN:** devuelve los vecinos a una distancia **R**
 - **FLANN:** “*Fast Approximate Nearest Neighbor Search*”
 - Permite acelerar la búsqueda en espacios de alta dimensión
 - Precisa de un vector de descripción métrico (no binario)
 - Utiliza técnicas de búsqueda pseudo-óptima indexando el espacio de búsqueda mediante un árbol (K-d-tree, K-means-tree)
 - *K-d tree*: se generan múltiples árboles aleatorios y se realizan una búsqueda en paralelo
 - *K-means tree*: se genera un árbol jerárquico agrupando los datos en clusters en cada rama

Técnicas Basadas en Características

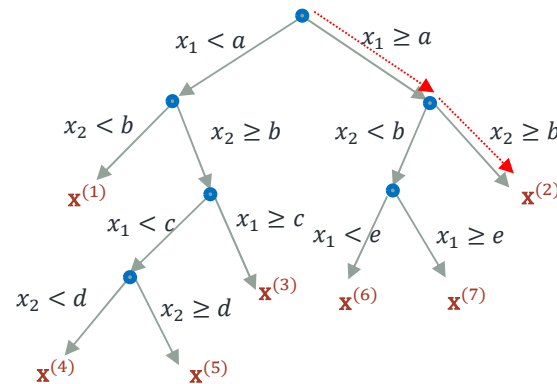
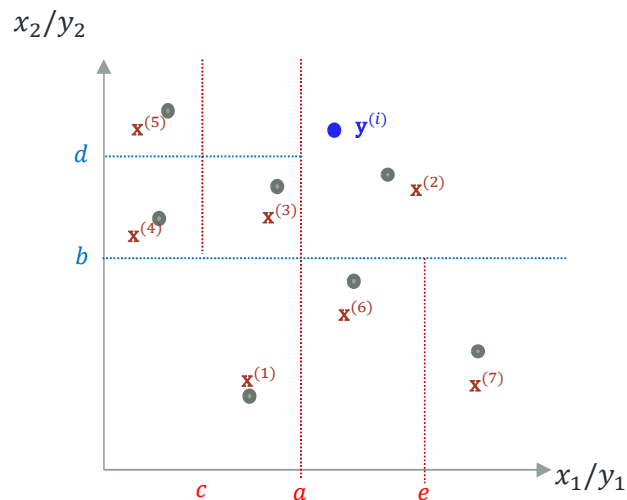
- **FLANN**: “Fast Approximate Nearest Neighbor Search”

- *K-d tree*:

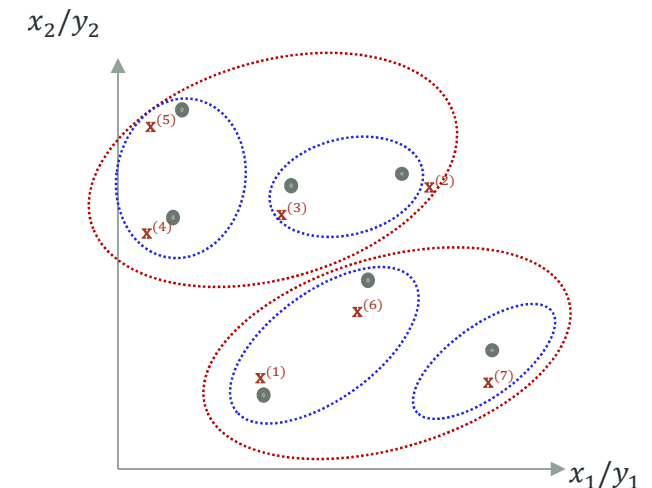
$$\mathbf{x}^{(i)} = [x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}]^T$$



$$\mathbf{y}^{(j)} = [y_1^{(j)}, \dots, y_n^{(j)}]^T$$

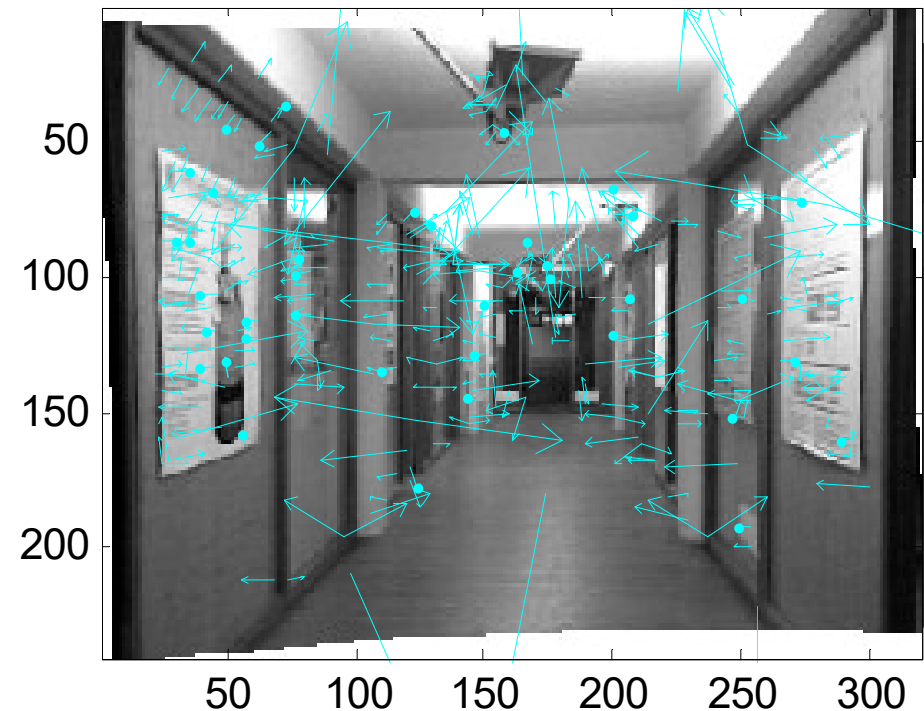
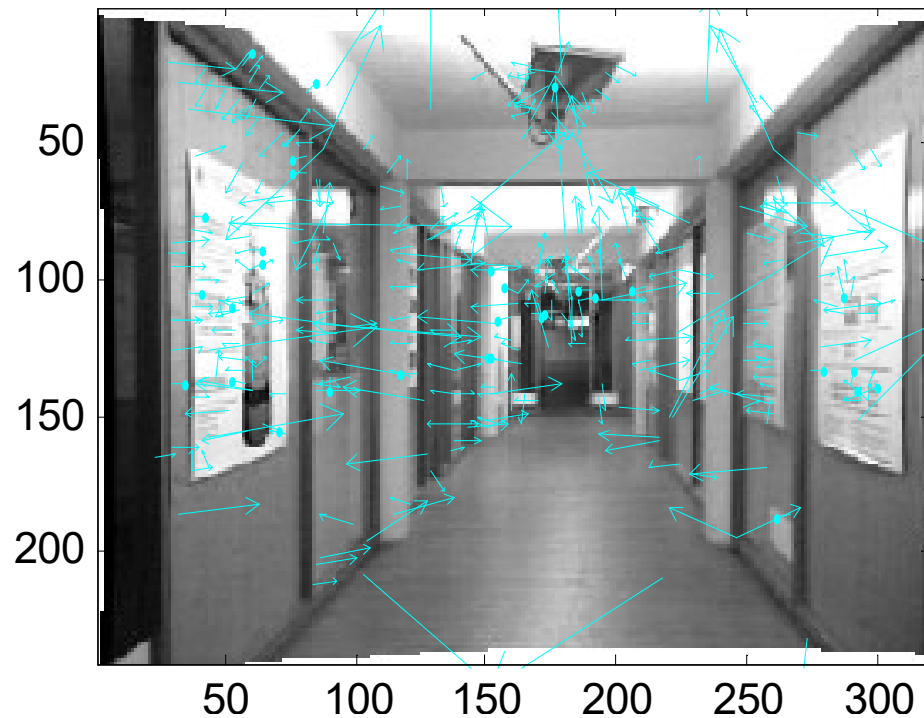


K-means tree:



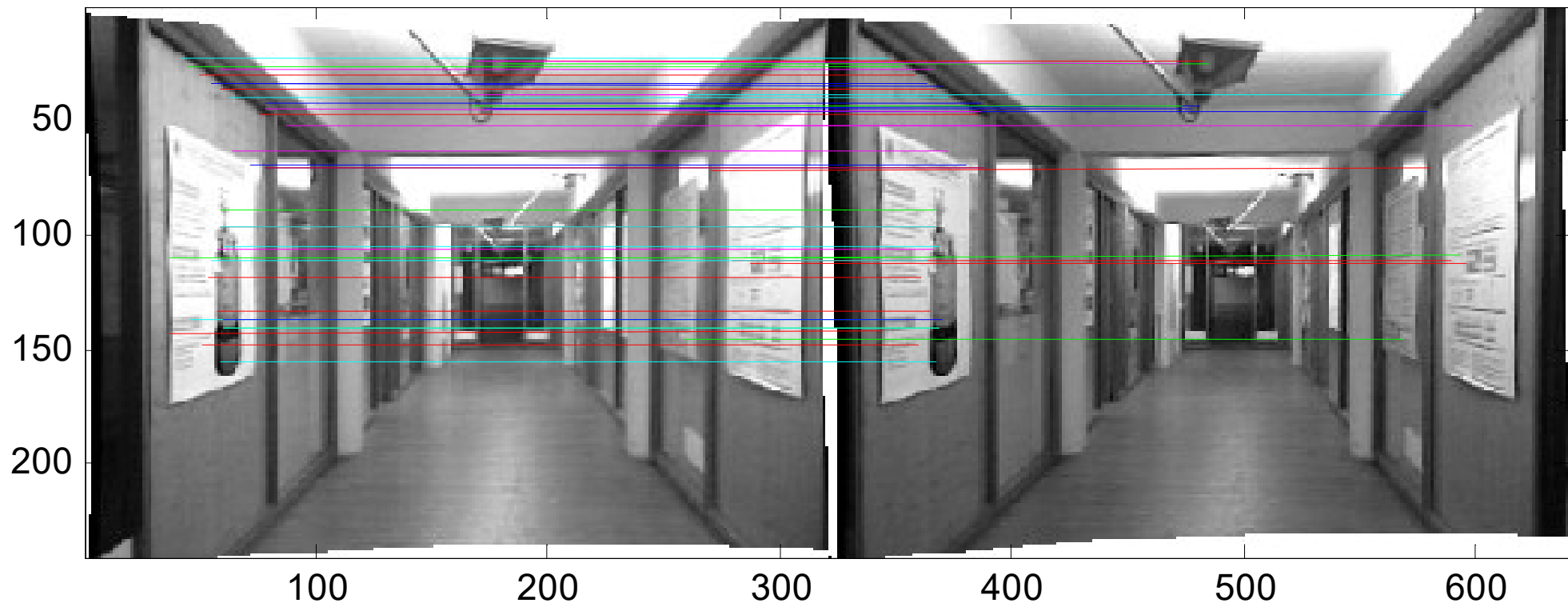
Ejemplo: Reconstrucción estéreo dispersa

- Ejemplo de utilización de características puntuales
 - Extracción de puntos SIFT.
 - Correspondencia de esos puntos $\leftrightarrow$ reconocimiento



Ejemplo: Reconstrucción estéreo dispersa

- Correspondencias halladas. Restricciones:
 - Epipolar: ± 1 pixel
 - Descriptor SIFT de cada punto

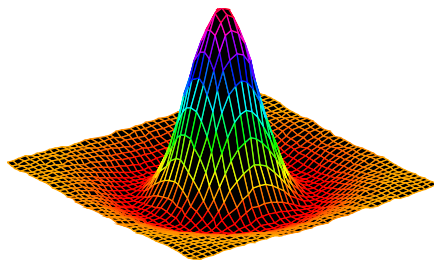


Teoría computacional de Marr-Poggio

- **Marr** [*Vision*, 82] presenta uno de los estudios más importantes sobre el proceso visual humano estableciendo una teoría computacional completa.
- Dentro de esta teoría se incluye el proceso de correspondencia estereoscópica
- Etapas:
 - 1) Filtrado **Laplaciano-Gaussiano** (diferentes escalas espaciales), evaluando los pasos por cero “**zero-crossings**”
 - 2) Correspondencia entre “**zero-crossings**” que tienen el **mismo signo** y *aproximadamente la misma orientación*.
 - 3) Correspondencias obtenidas de las máscaras de mayor tamaño controlan la convergencia del algoritmo eliminando ambigüedades en la correspondencia de las máscaras más pequeñas.
 - 4) Un proceso de **relajación** de etiquetas impone las restricciones de **continuidad de superficie y unicidad**
 - 5) Los resultados de la correspondencia se almacenan en un buffer que denomina esquema 2.5D, representando los pasos por cero junto a la disparidad entre ambas imágenes.

Teoría computacional de Marr-Poggio

- (1) **Filtrado** Laplaciano-Gaussiano / zero-crossings:
 - Detecta discontinuidades de intensidad

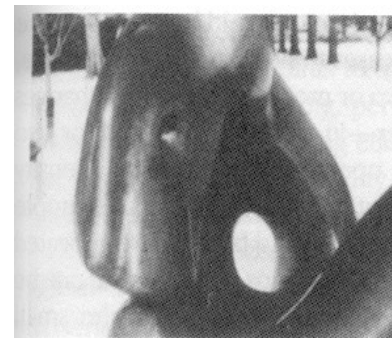
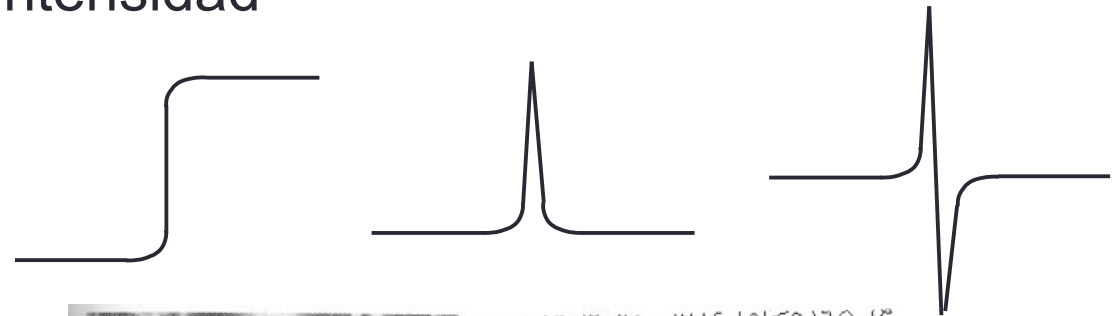


$$\omega_{2D} = 2\sqrt{2} \sigma$$

Anchura del filtro

$$\nabla^2 G(r, \vartheta) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{r^2}{\sigma^4} \right] e^{\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2} \right)}$$

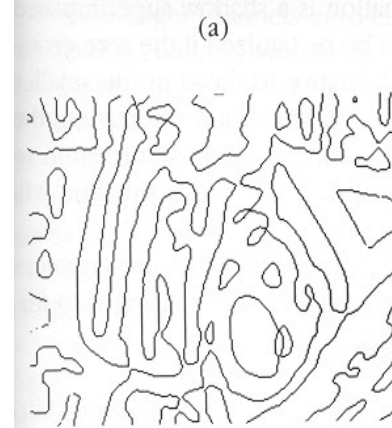
Los diferentes filtros detectan discontinuidades a diferentes escalas espaciales



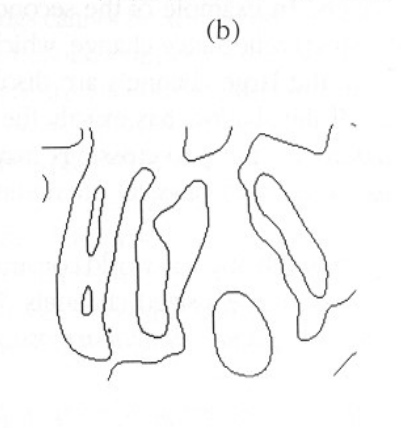
(a)



(b)



(c)



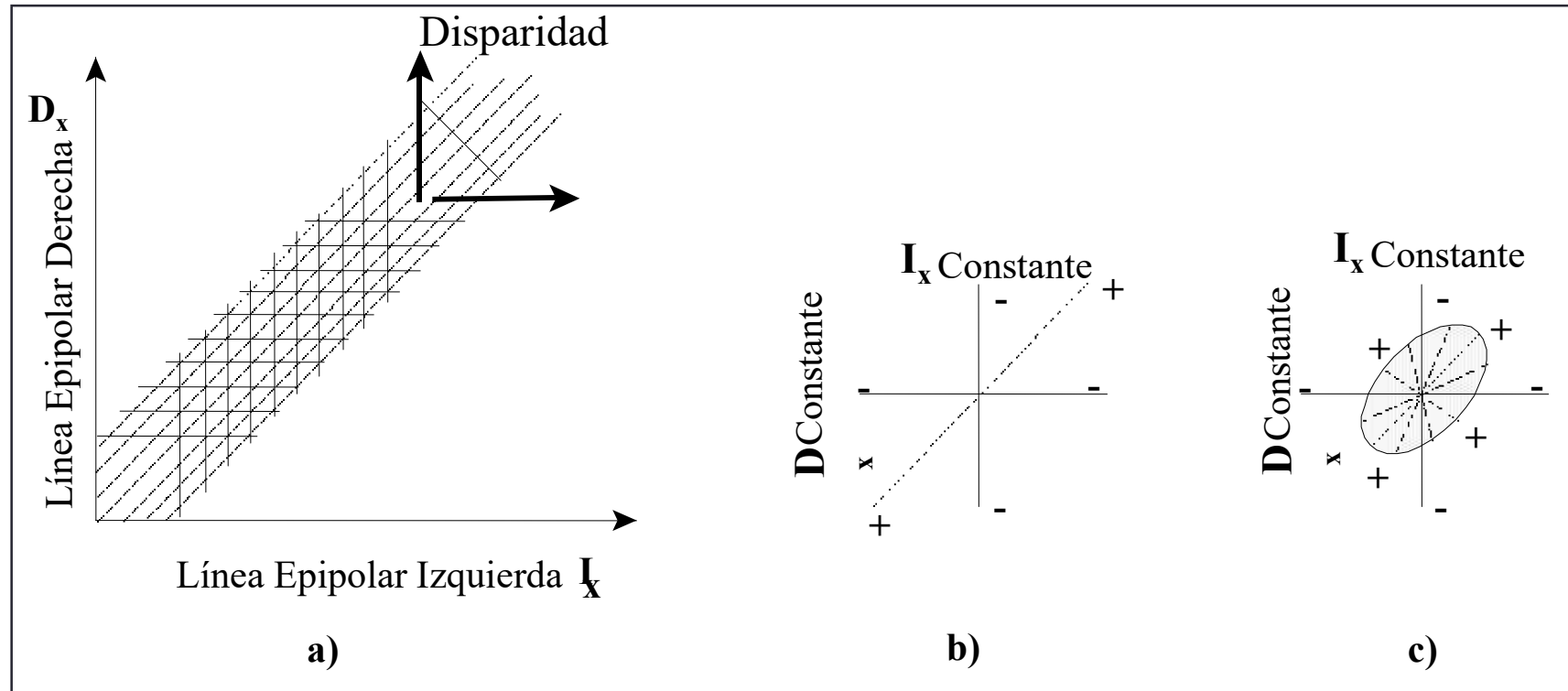
(d)

Teoría computacional de Marr-Poggio

- (2) **Correspondencia** entre los segmentos de paso por cero:
 - Para cada escala se evalúa la correspondencia a lo largo de la epipolar de los pasos por cero que tengan el mismo signo y aproximadamente la misma orientación.
 - **Límite fusional de Panum:**
 - la probabilidad de encontrar una correspondencia correcta con una disparidad menor que. $\pm(\omega_{2D}/2)$ es del 95%
- Las ambigüedades en la correspondencia local se resuelven considerando la disparidad en el signo de correspondencias próximas no ambiguas
- Las correspondencias obtenidas de las máscaras de mayor tamaño controlan la convergencia del algoritmo eliminando ambigüedades en la correspondencia de las máscaras más pequeñas.

Teoría computacional de Marr-Poggio

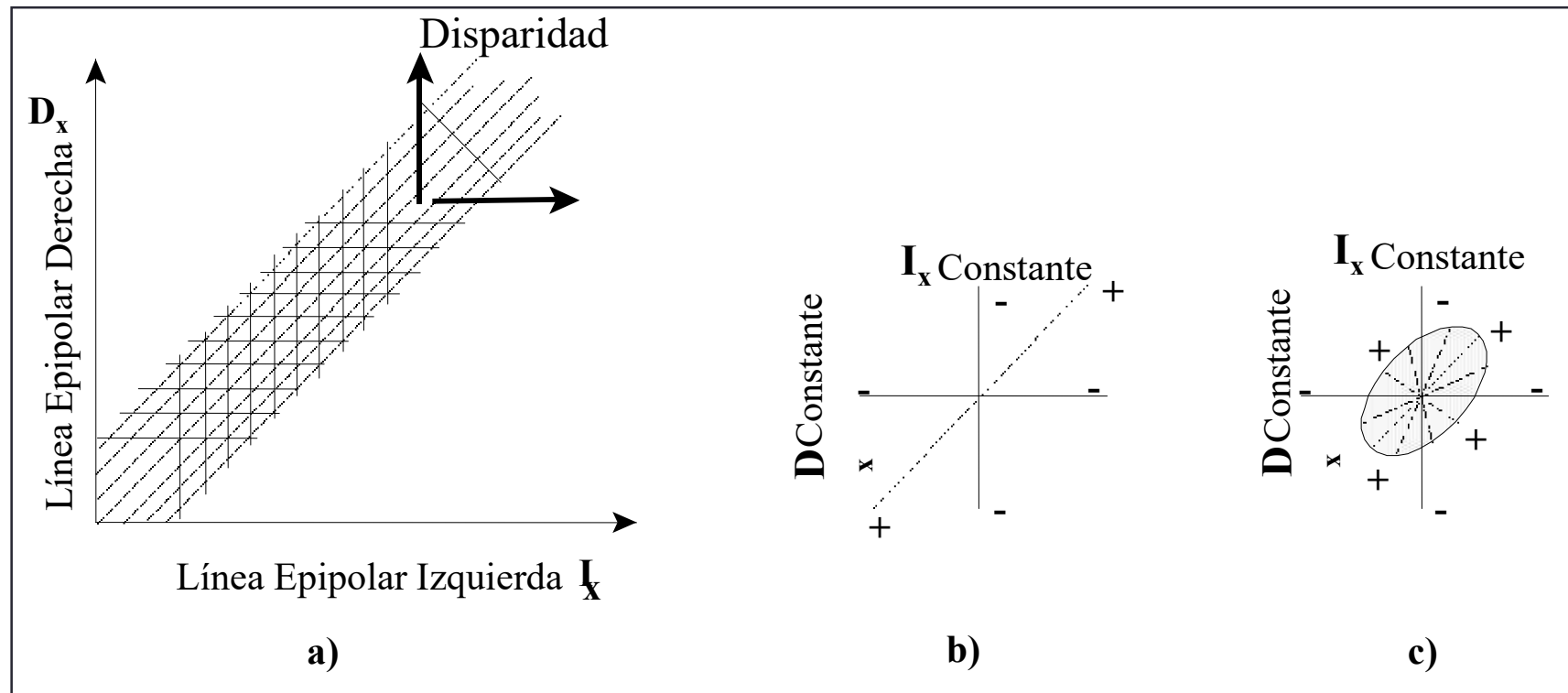
- (3) Proceso de **Relajación**: Algoritmo Cooperativo



- Para cada línea epipolar de un par estéreo se asocia una red bidimensional de **nodos** o células interconectados (figura a)

Teoría computacional de Marr-Poggio

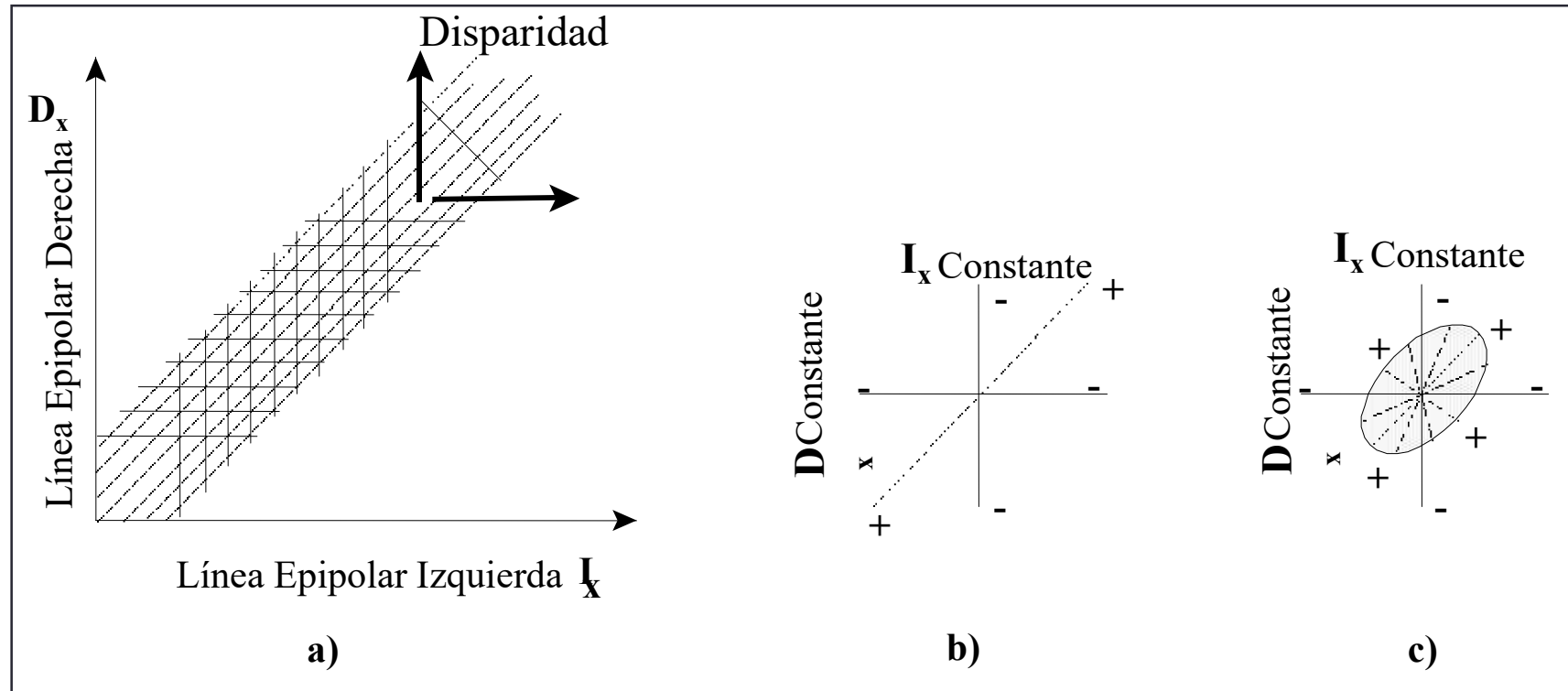
- (3) Proceso de **Relajación**: Algoritmo Cooperativo



- Las conexiones horizontales y verticales establecen un efecto **inhibitorio**, de forma que los nodos situados a lo largo de una línea horizontal o vertical se inhiben mutuamente quedando al final una única correspondencia en cada línea (**Restricción de Unicidad**) (figura b)

Teoría computacional de Marr-Poggio

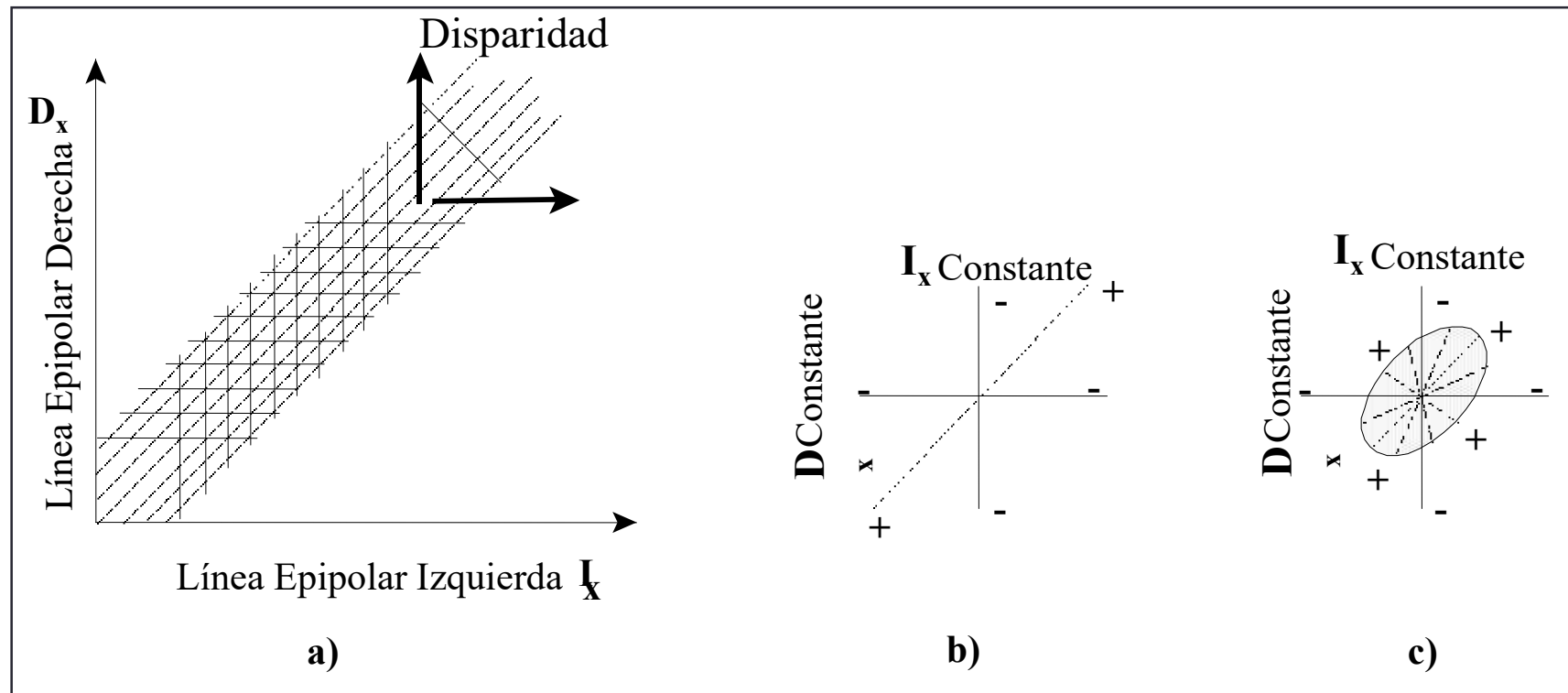
- (3) Proceso de **Relajación**: Algoritmo Cooperativo



- Las conexiones diagonales (**conexiones excitatorias**) favorecen la correspondencia de elementos adyacentes en la diagonal con la misma disparidad (**Continuidad de Disparidad**) (figura b), considerando por tanto en este modelo que las superficies son continuas y suaves.

Teoría computacional de Marr-Poggio

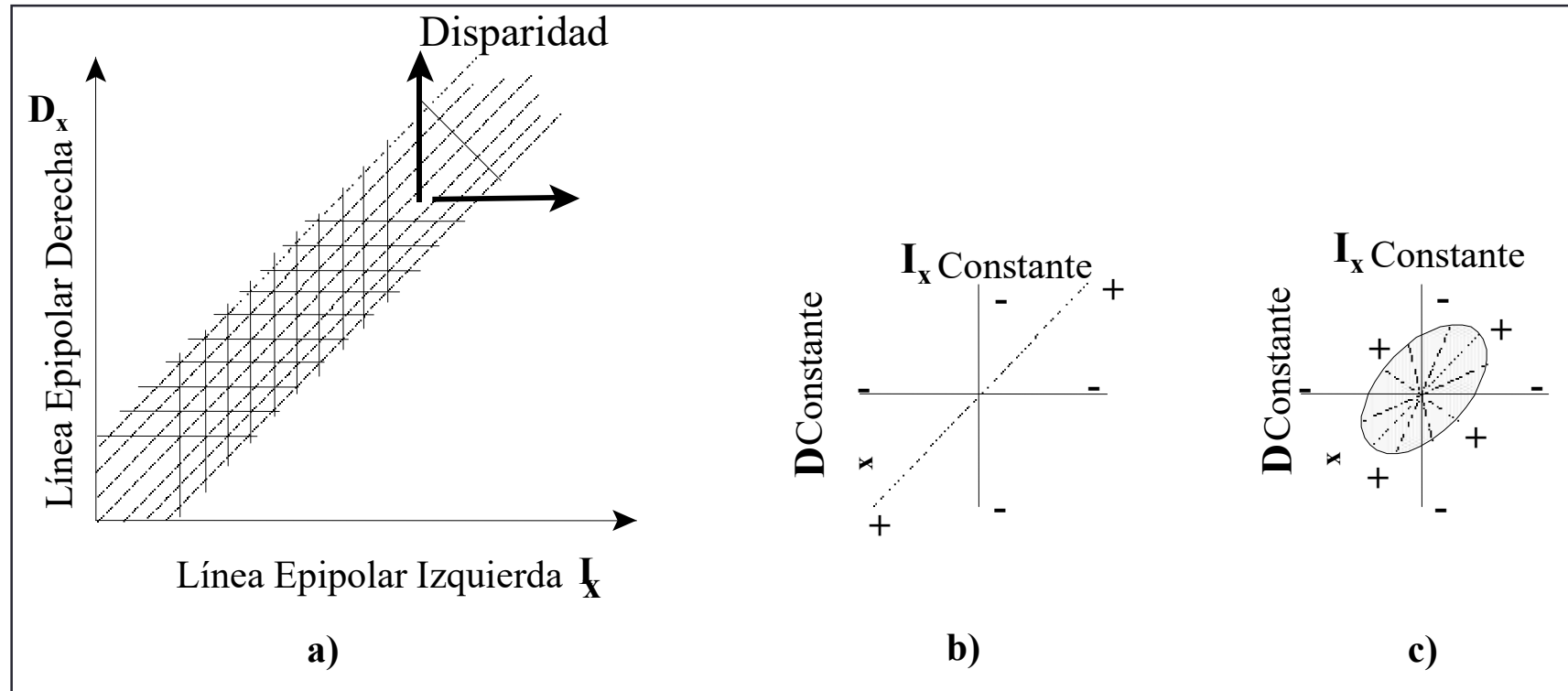
- (3) Proceso de **Relajación**: Algoritmo Cooperativo



- La restricción anterior de continuidad de la disparidad se establece únicamente en la dirección diagonal, para considerar una restricción bidimensional utiliza un entorno de vecindad excitatorio en forma de disco **$S(x,y,d)$** (figura c).

Teoría computacional de Marr-Poggio

- (3) Proceso de **Relajación**: Algoritmo Cooperativo



$$C_{x,y;d}^{t+1} = \sigma \left\{ \sum_{x',y';d' \in S(x,y,d)} C_{x',y';d'}^t - \varepsilon \sum_{x',y';d' \in O(x,y,d)} C_{x',y';d'}^t + C_{x,y;d}^0 \right\}$$

↑
Componente
Excitatoria

↑
Componente
Inhibitoria

↑
Valor
Inicial

Teoría computacional de Marr-Poggio

Imagen Izquierda

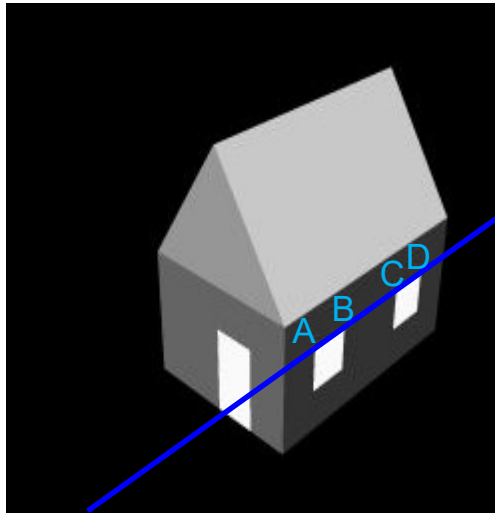
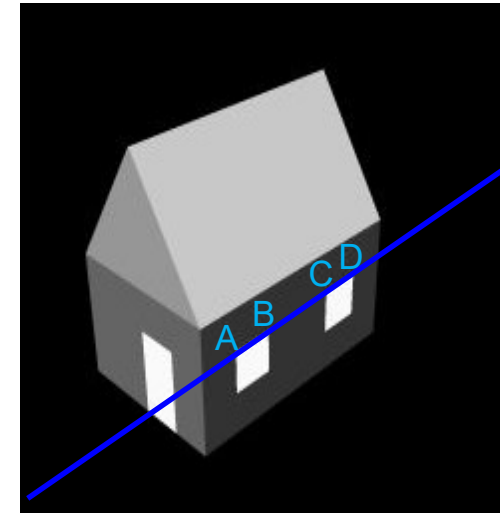


Imagen Derecha

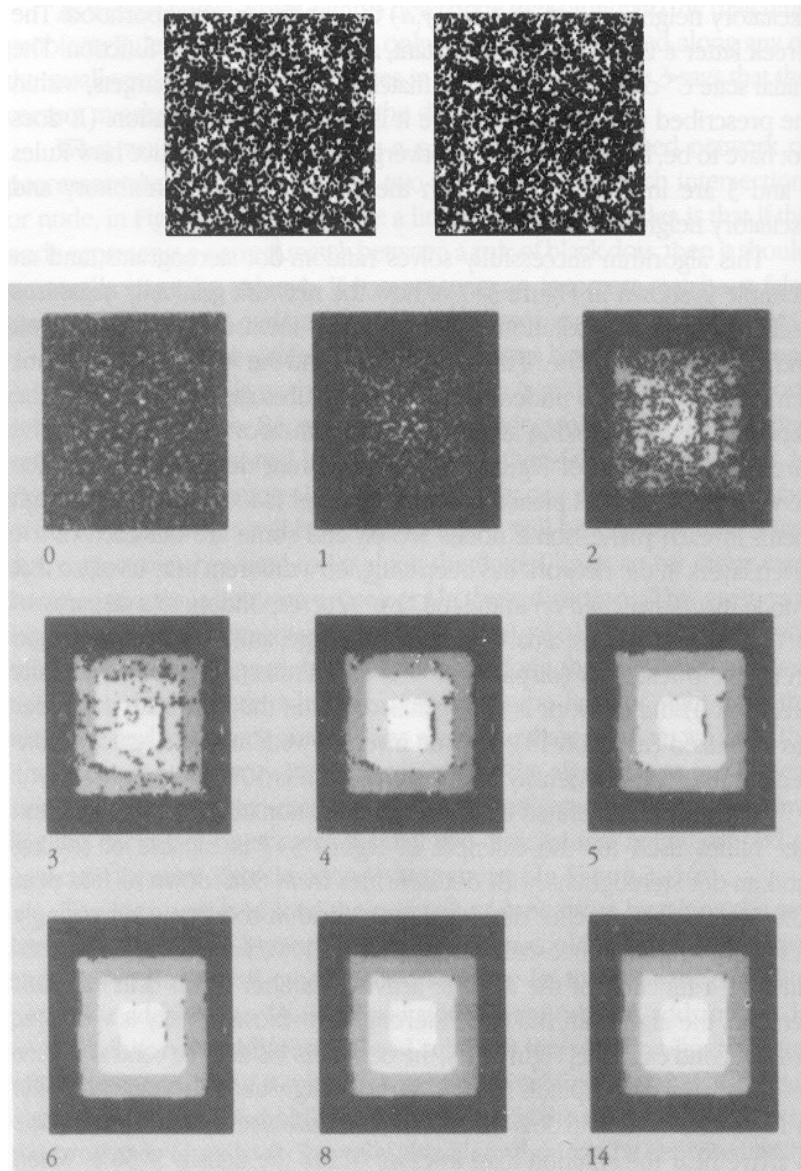
Probabilidad
Inicial

D^d	0	1	0	1
C^d	1	0	1	0
B^d	0	1	0	1
A^d	1	0	1	0
	A^i	B^i	C^i	D^i

Probabilidad
Final

D^d	0	0.1	0	0.9
C^d	0.1	0	0.9	0
B^d	0	0.9	0	0.1
A^d	0.9	0	0.1	0
	A^i	B^i	C^i	D^i

Teoría computacional de Marr-Poggio



Estereogramas de
puntos aleatorios

Mapas de profundidad
en diferentes
iteraciones del proceso
de relajación

Técnicas Avanzadas Correspondencia: CNN

- Redes convoluciones siamesas: GC-Net / PSMNet

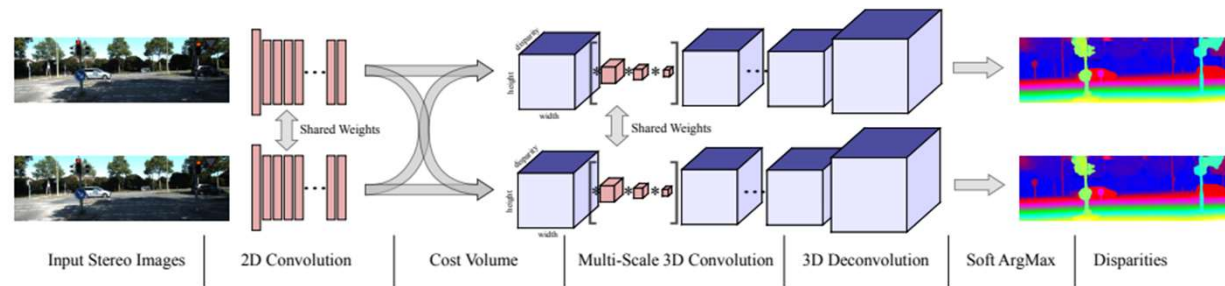


Figure 1: Our end-to-end deep stereo regression architecture, GC-Net (Geometry and Context Network).

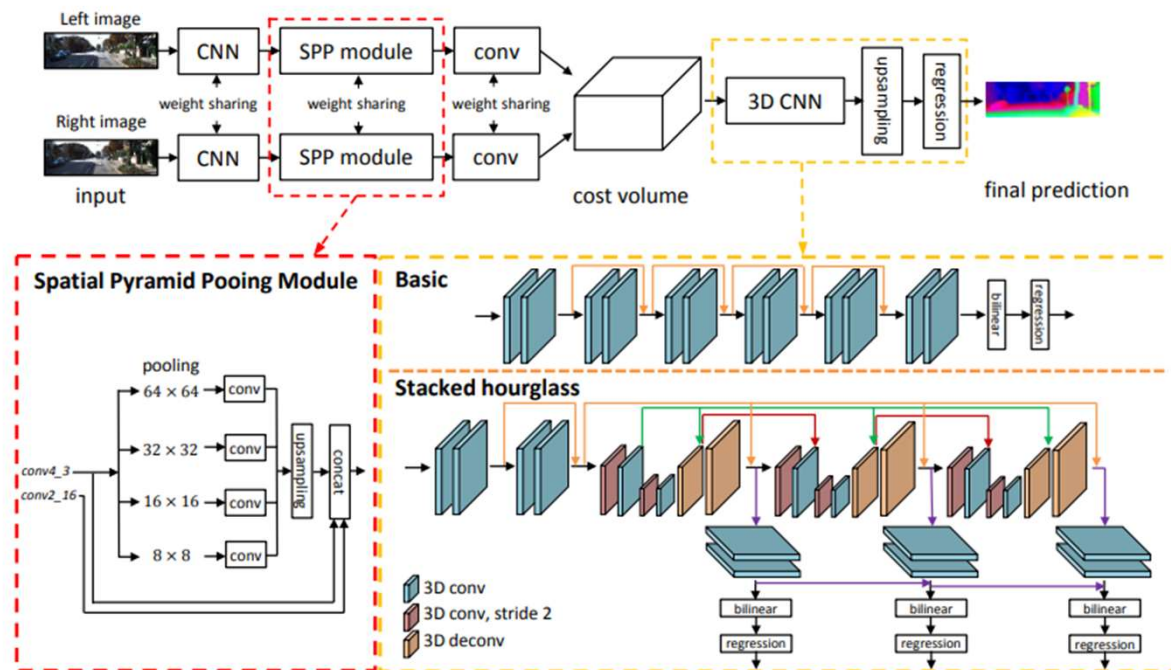


Figure 1. Architecture overview of proposed PSMNet. The left and right input stereo images are fed to two weight-sharing pipelines

“End-to-End Learning of Geometry and Context for Deep Stereo Regression” A. Kendall, H. Martirosyan, S. Dasgupta, P. Henry, R. Kennedy, A. Bachrach, A. Bry,
(2017) IEEE International Conference on Computer Vision

“Pyramid Stereo Matching Network” Jia-Ren Chang Yong-Sheng Chen
(2018) IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition

Tabla de Contenidos

- El Problema de Correspondencia
- Restricciones aplicadas a la Correspondencia
- Técnicas de Correspondencia
- **Siguiente paso:**
 - Reconstrucción 3D
 - Reconstrucción Proyectiva (Autocalibración)