

PMR2560 – Visão Computacional

Visão estéreo

Prof. Eduardo L. L. Cabral

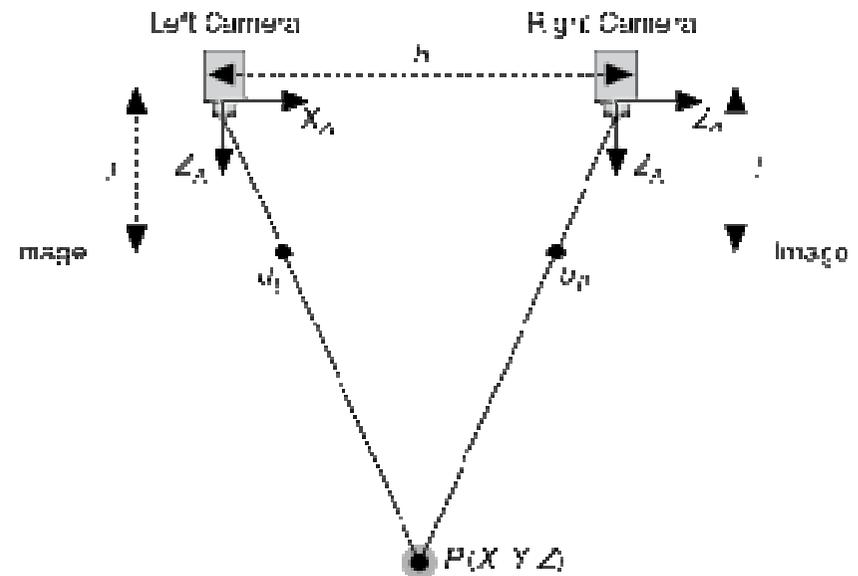


Objetivos

- Introdução
- Equações básicas
- Processo de correspondência
- Geometria epipolar
- Retificação de imagens
- Reconstrução 3D
- Visão estéreo ativa (luz estruturada e sensor distância)

Introdução

- Sistema composto por duas câmeras imitando o sistema de visão humano



Introdução

- Par de imagens estéreo apresentadas alternadamente (http://www.well.com/user/jimg/stereo/stereo_list.html)

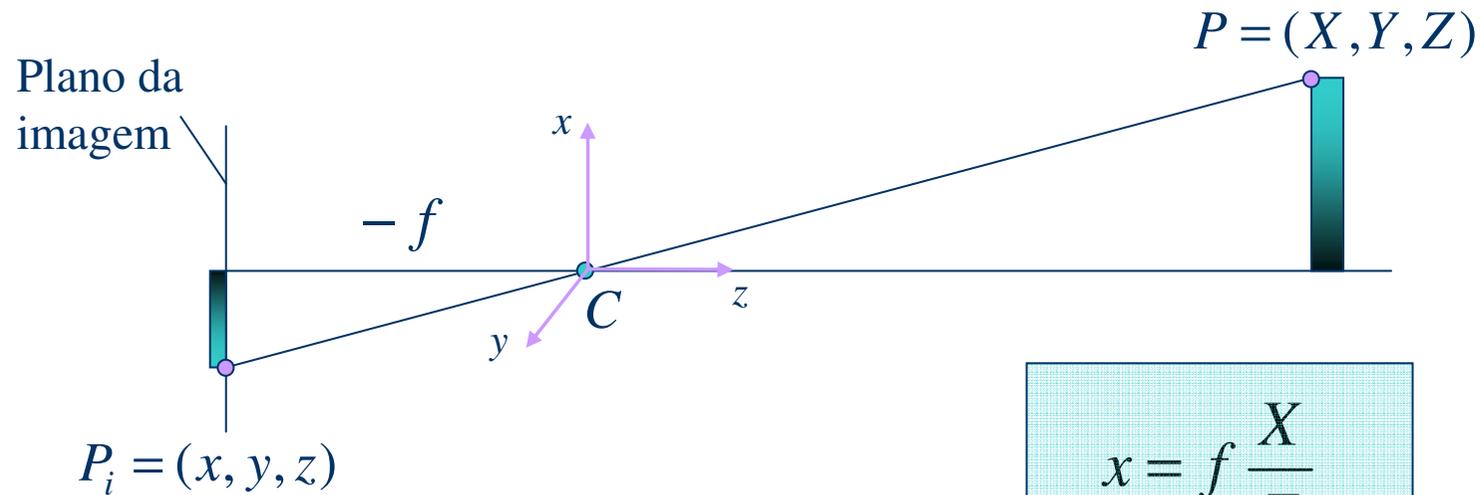


Introdução

- Visão estéreo com câmeras calibradas permite obter posição dos pontos da cena em 3D \Rightarrow possível reconstrução 3D da parte da cena vista pelas duas câmeras
- Sistemas de visão estéreo com:
 - câmeras de eixos paralelos
 - câmeras de eixos não paralelos
- Forma mais simples e básica \Rightarrow câmeras com eixos paralelos
- Sistemas de visão mais complexos:
 - Múltiplas câmeras \Rightarrow reconstrução completa da cena em 3D
 - Sistemas com câmeras e espelhos
 - Visão estéreo ativa (luz estruturada, sensor distância)

Equações básicas

- Modelo de câmera “pinhole”



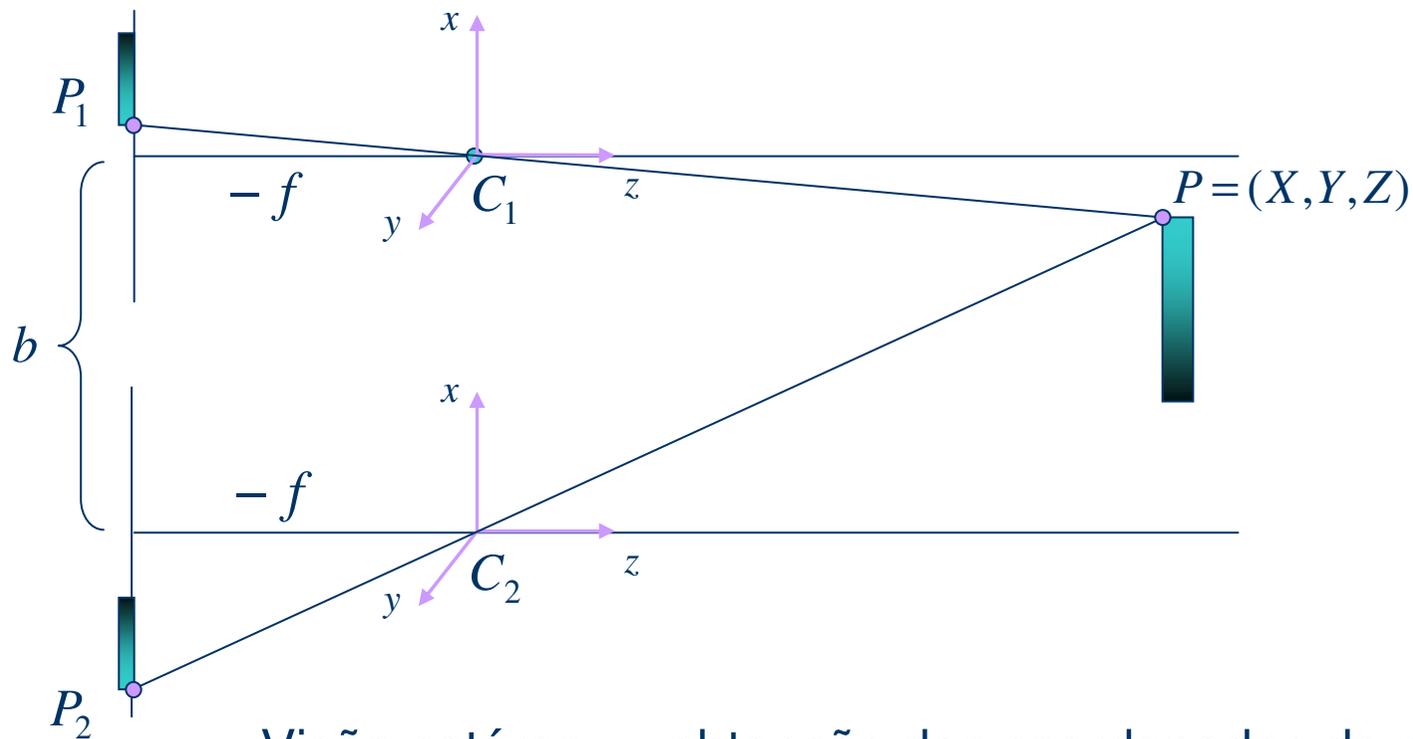
$$x = f \frac{X}{Z}$$

$$y = f \frac{Y}{Z}$$

$$z = f$$

Equações básicas

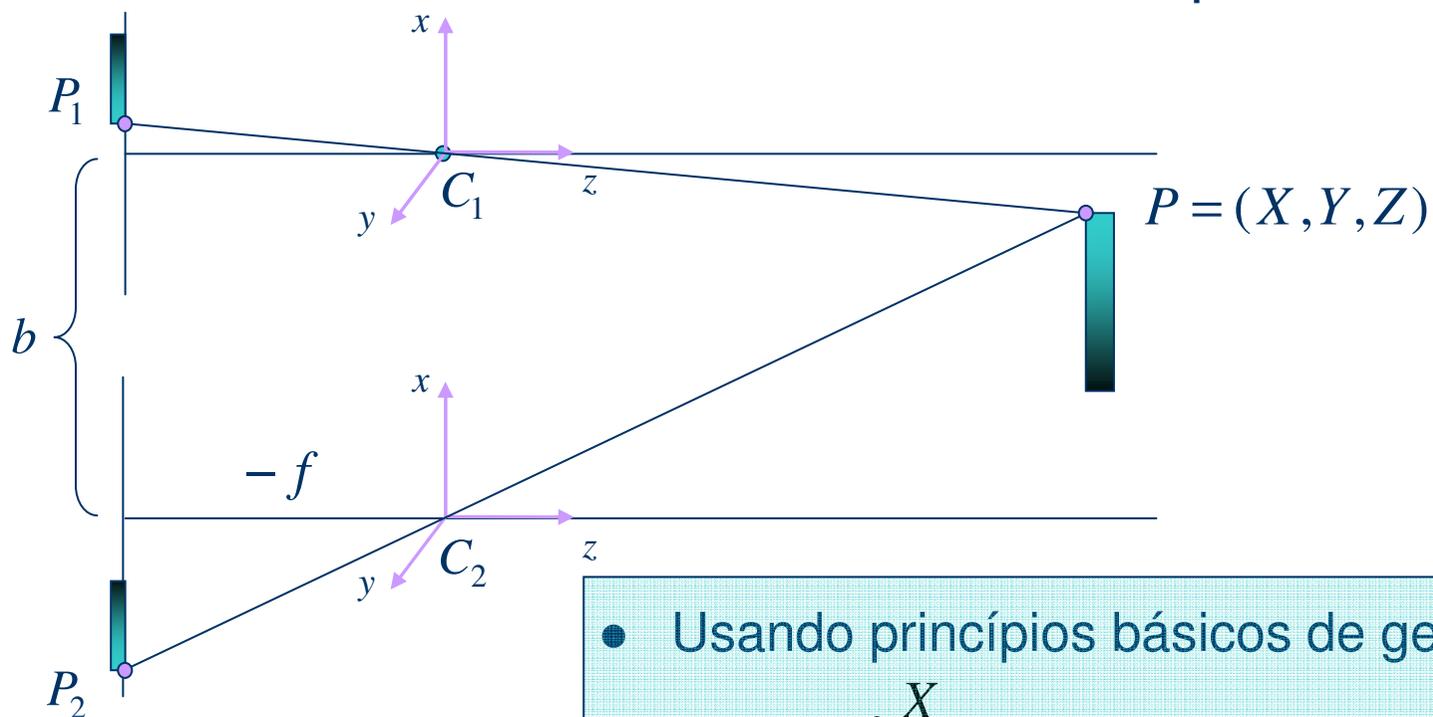
- Sistema estéreo com câmeras de eixos paralelos



- Visão estéreo \Rightarrow obtenção das coordenadas do ponto P no espaço em função das coordenadas das projeções do ponto P nas imagens das câmeras 1 e 2 (pontos P_1 e P_2)

Equações básicas

- Sistema estéreo com câmeras de eixos paralelos



- Usando princípios básicos de geometria:

$$x_1 = -f \frac{X}{Z}$$

$$x_2 = -f \frac{X + b}{Z} = x_1 - f \frac{b}{Z} \Rightarrow Z = \frac{fb}{x_1 - x_2}$$

Equações básicas

- Processo de cálculo da posição de pontos da cena no espaço 3D no caso de câmeras com eixos paralelos:
 - Conhecidos parâmetros intrínsecos das duas câmeras
 - Dadas posições em pixels de um mesmo ponto no espaço nas duas câmeras $\Rightarrow [u_1, v_1]$ e $[u_2, v_2]$
 - Calcula-se as posições do ponto no sistema de coordenadas das duas câmeras $\Rightarrow [x_1, y_1]$ e $[x_2, y_2]$

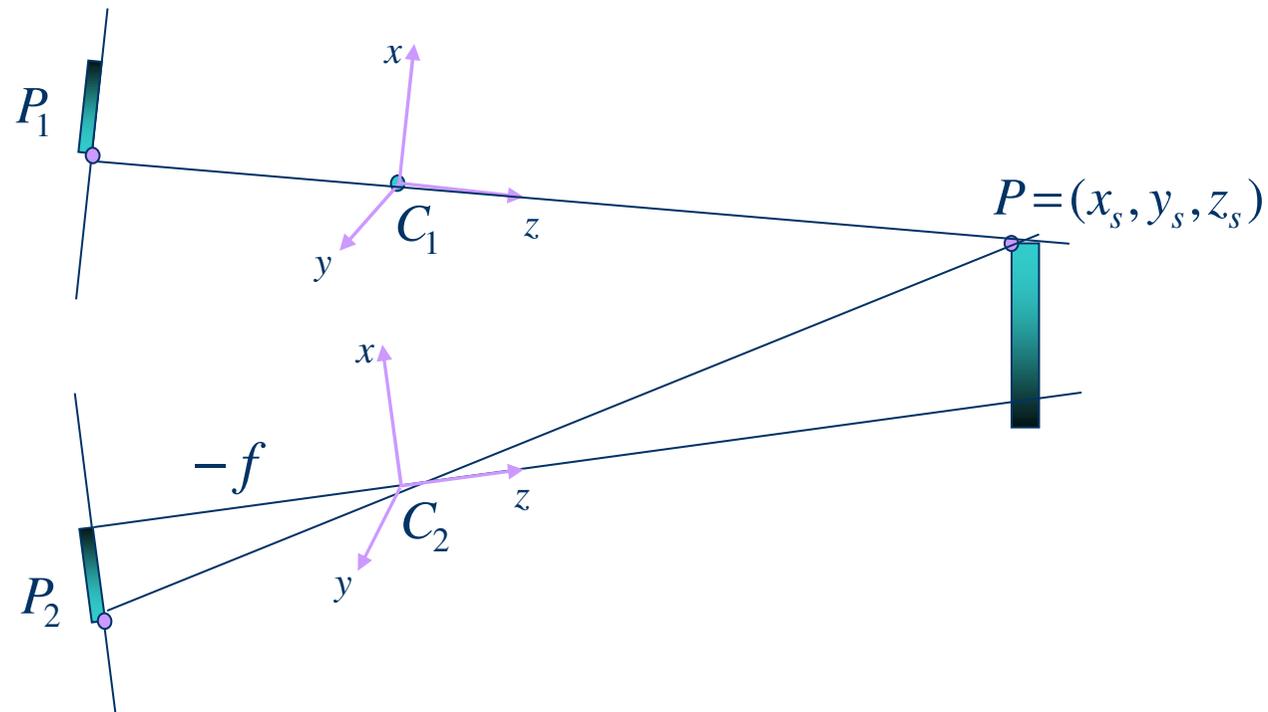
$$x_i = \frac{u - u_0}{k_x}; \quad y_i = \frac{v - v_0}{k_x}$$

- Calcula-se posição do ponto em 3D no sistema de coordenadas de uma das câmeras (câmera 1)

$$Z = \frac{fb}{x_1 - x_2}; \quad X = -\frac{x_1 Z}{f}; \quad Y = -\frac{y_1 Z}{f}$$

Equações básicas

- Caso de câmeras com eixos não paralelos \Rightarrow usa-se a matriz de formação das imagens das duas câmeras



Equações básicas

- Caso de câmeras com eixos não paralelos
 - Equações de formação das duas imagens:

$$\begin{bmatrix} u_1 w_1 \\ v_1 w_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} u_2 w_2 \\ v_2 w_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_2 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

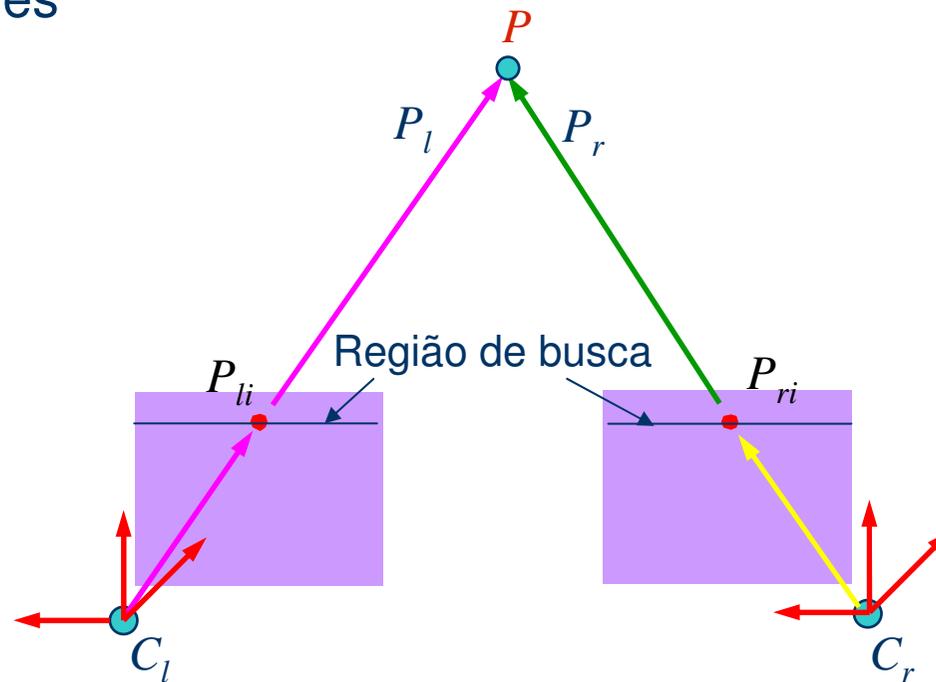
- Conhecendo-se as matrizes de formação das imagens, \mathbf{P}_1 e $\mathbf{P}_2 \Rightarrow$ tem-se um sistema de 6 equações e cinco incógnitas (w_1, w_2, X, Y e Z)
- **Observação:** se as câmeras tiverem eixos exatamente paralelos $\Rightarrow w_1 = w_2$

Processo de correspondência

- Cálculo da posição de um ponto da cena no espaço 3D \Rightarrow necessário ter as projeções correspondentes nas duas imagens do ponto no espaço
- Conhecendo os pontos correspondentes nas duas imagens determinação das coordenadas 3D do ponto é simples
- **Processo de Correspondência** \Rightarrow busca dos pontos correspondentes nas duas imagens de um mesmo ponto do espaço \Rightarrow **Problema fundamental de visão estéreo**
- **Processo de Correspondência** \Rightarrow parte mais complicada de visão estéreo \Rightarrow dificuldade na determinação da região de busca, problemas de oclusão e ruídos
- Diversos algoritmos foram desenvolvidos para automatizar o processo de correspondência \Rightarrow nenhum é perfeito

Processo de correspondência

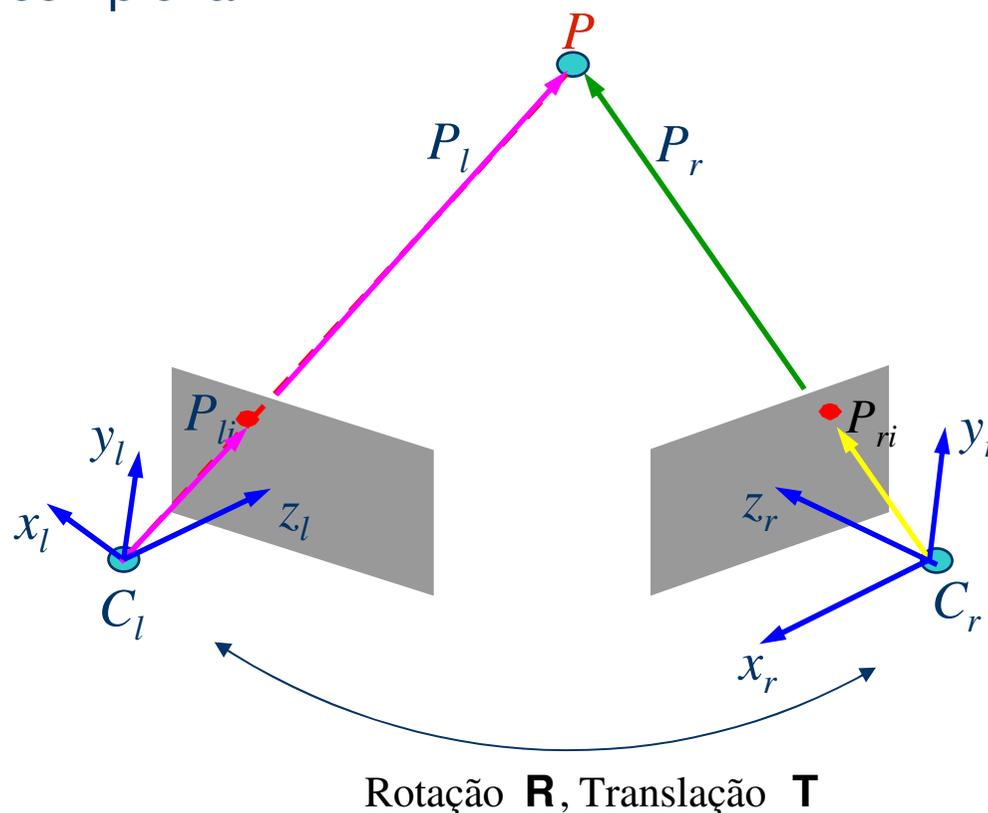
- Câmeras com eixos paralelos:
 - Região de busca dos pontos correspondentes nas duas imagens se torna uma reta horizontal
 - Região de busca reduzida \Rightarrow torna processo de busca mais simples



Processo de correspondência

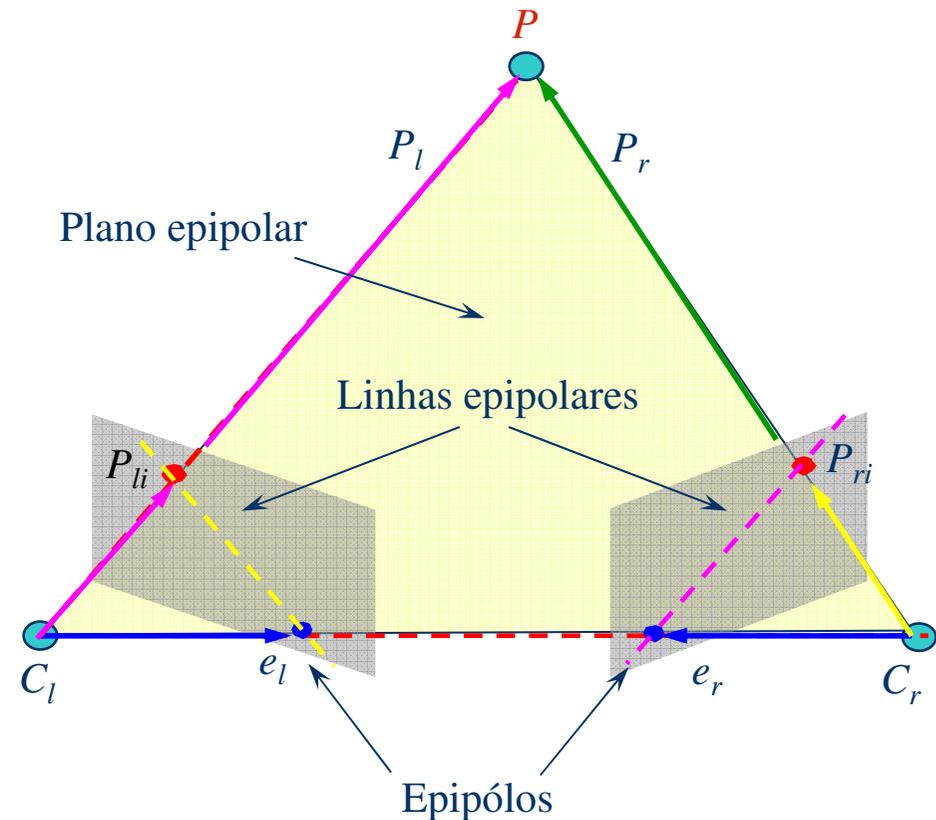
- Câmeras com eixos não paralelos:
 - Região de busca dos pontos correspondentes nas duas imagens é uma curva complexa
 - Região de busca complexa \Rightarrow torna processo de busca complicada

➤ Necessário conhecer **geometria epipolar** e realizar processo de **retificação das imagens**



Geometria epipolar

- **Plano epipolar:** plano que passa pelo ponto P e pelos centros de projeção das duas câmeras
- **Epipólos:** projeção do centro de uma câmera na imagem da outra câmera
- **Restrição epipolar:** pontos correspondentes devem estar localizados nas linhas epipolares

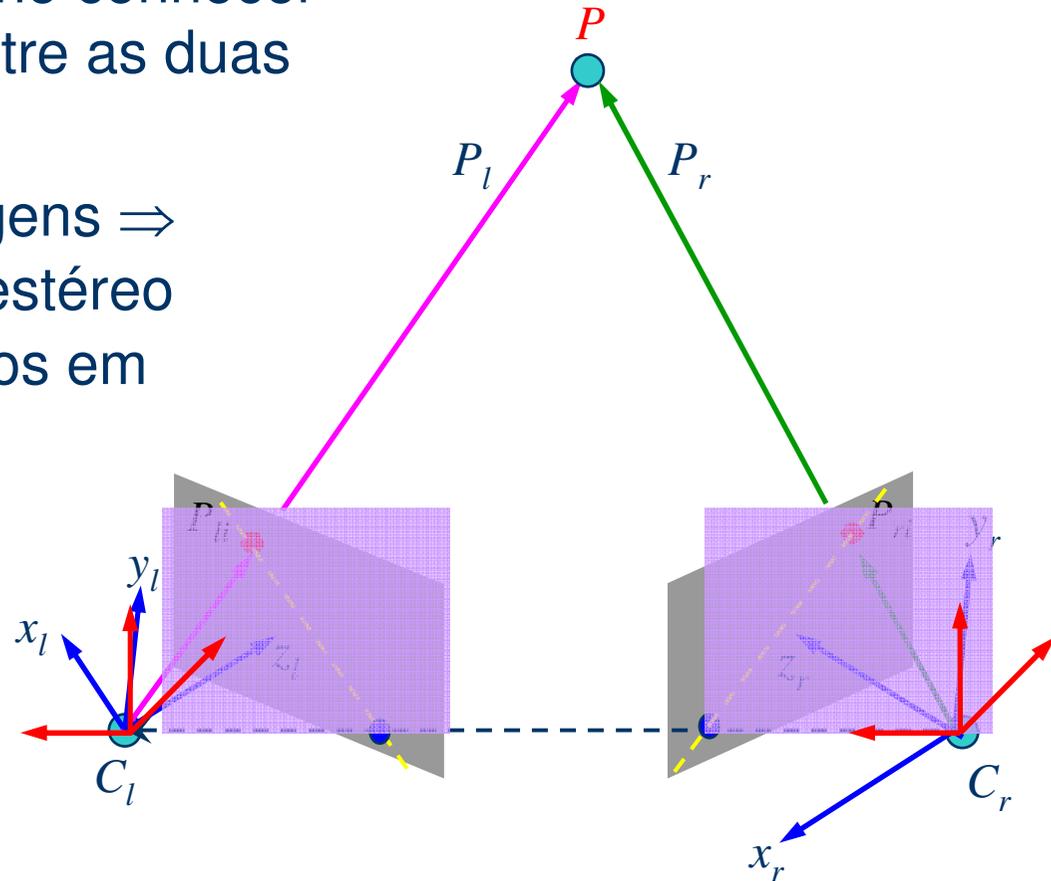


Processo de correspondência

- Busca dos pontos correspondentes \Rightarrow deve ser realizada na linha epipolar
- Eixos óticos paralelos:
 - Epipólos estão no infinito
 - Linhas epipolares são retas horizontais paralelas às linhas de busca
- Eixos óticos não paralelos \Rightarrow linhas epipolares podem ser curvas complexas \Rightarrow existem técnicas para calcular linha epipolar
- Ideal seria transformar as imagens e alinhar as linhas epipolares com as retas de busca \Rightarrow processo de **retificação das imagens**

Processo de Retificação

- Processo de retificação das imagens \Rightarrow necessário conhecer a posição relativa entre as duas câmeras
- Retificação das imagens \Rightarrow transforma sistema estéreo de eixos não paralelos em sistema com eixos paralelos facilitando busca

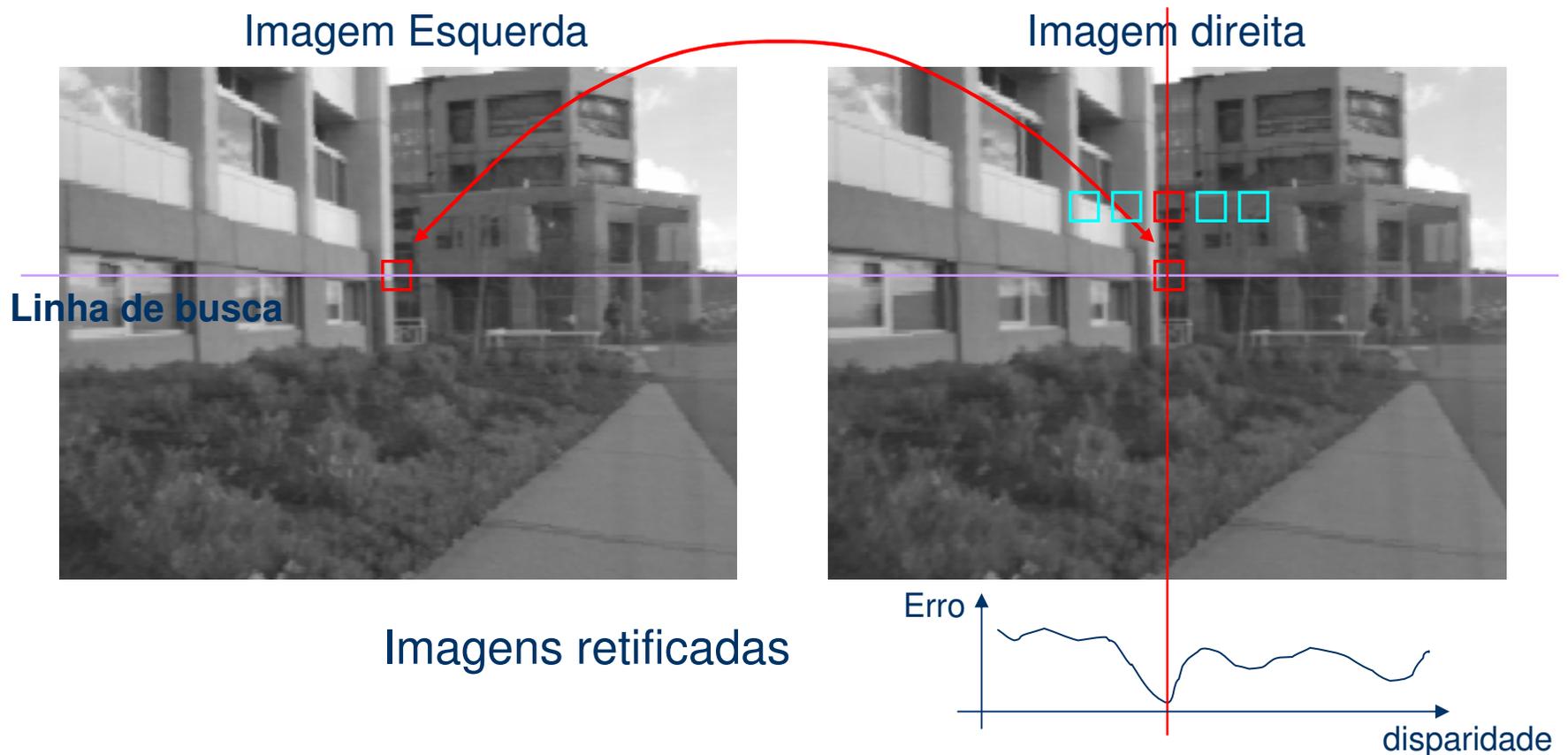


Processo de correspondência

- Busca por pontos correspondentes é realizada nas linhas epipolares
- Usa-se uma janela retangular em torno do ponto sendo analisado e verifica a similaridade das intensidades luminosas de todos os pixels das duas janelas
- Duas formas de busca:
 - Busca por características \Rightarrow usam-se bordas, cantos, linhas etc
 - Busca completa (“Dense Stereo”) \Rightarrow determina-se a correspondência de todos os pixels das duas imagens

Processo de correspondência

- Verificação da similaridade entre pontos usando janelas em torno do ponto



Processo de correspondência

- Mesmo quando as câmeras são idênticas existem diferenças de ganho e sensibilidade
- Deve-se usar intensidade luminosa dos pixels normalizada dentro de cada janela

$$\bar{I} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} I(i, j)$$

Intensidade média

$$\|I\| = \sqrt{\sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} [I(i, j)]^2}$$

Magnitude da intensidade na janela

$$\hat{I}(i, j) = \frac{I(i, j) - \bar{I}}{\|I(i, i) - \bar{I}\|}$$

Intensidade normalizada

Processo de correspondência

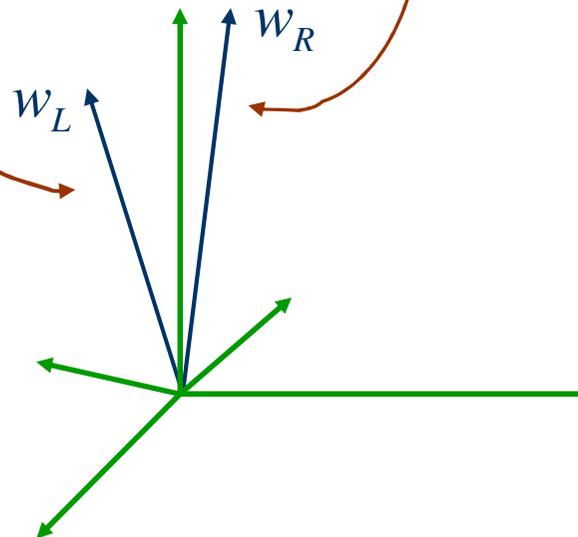
Imagem esquerda



Imagem direita



Cada janela é um vetor no espaço dimensional $m^2 \Rightarrow$ normalização faz com que a norma desses vetores seja igual a um



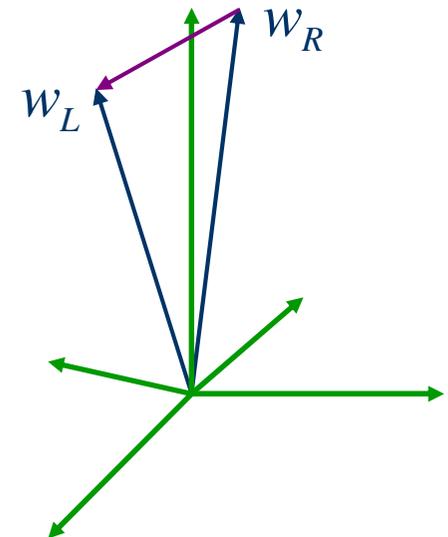
Processo de correspondência

- Verificação da similaridade entre as janelas:
 - Soma normalizada dos quadrados das diferenças:

$$C_{SSD} = \sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} [\hat{I}_L(i, j) - \hat{I}_R(i, j)]^2 = \|w_L - w_R\|^2$$

- Correlação normalizada

$$C_{NC} = \sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} \hat{I}_L(i, j) \hat{I}_R(i, j) = w_L \cdot w_R = \cos \theta$$



Processo de correspondência

- Busca dos pontos correspondentes para todos pixels das imagens \Rightarrow “dense stereo”
- Disparidade = distância em pixels entre pontos correspondentes

Imagem esquerda

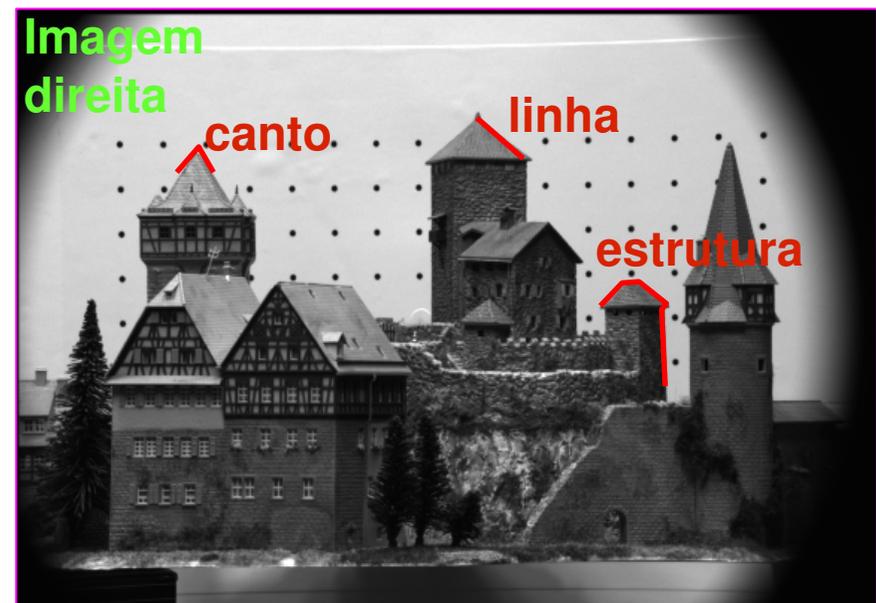
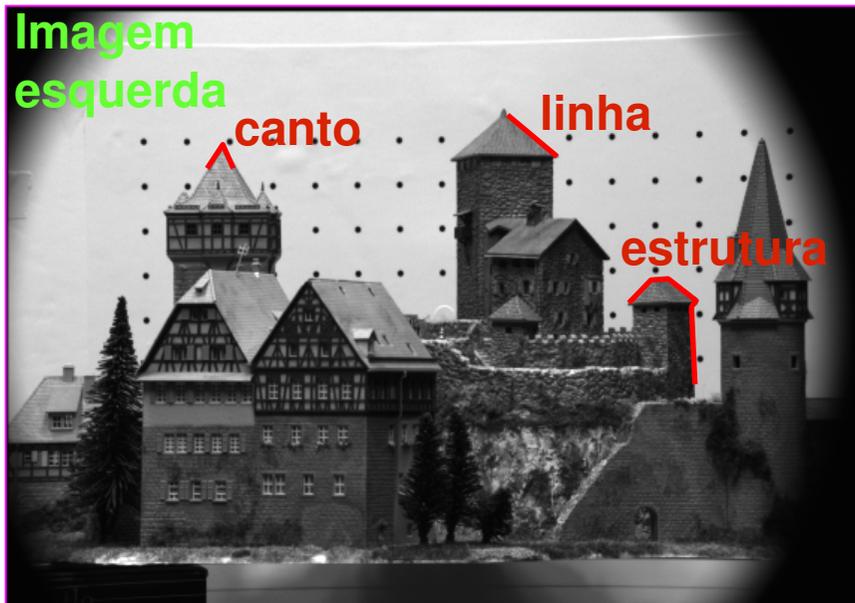


Mapa de disparidade



Processo de correspondência

- Busca de pontos correspondentes usando características \Rightarrow busca de pontos correspondentes é feita somente para pixels relevantes das imagens
- Também se usa janelas em torno dos pixels das características para verificar similaridade

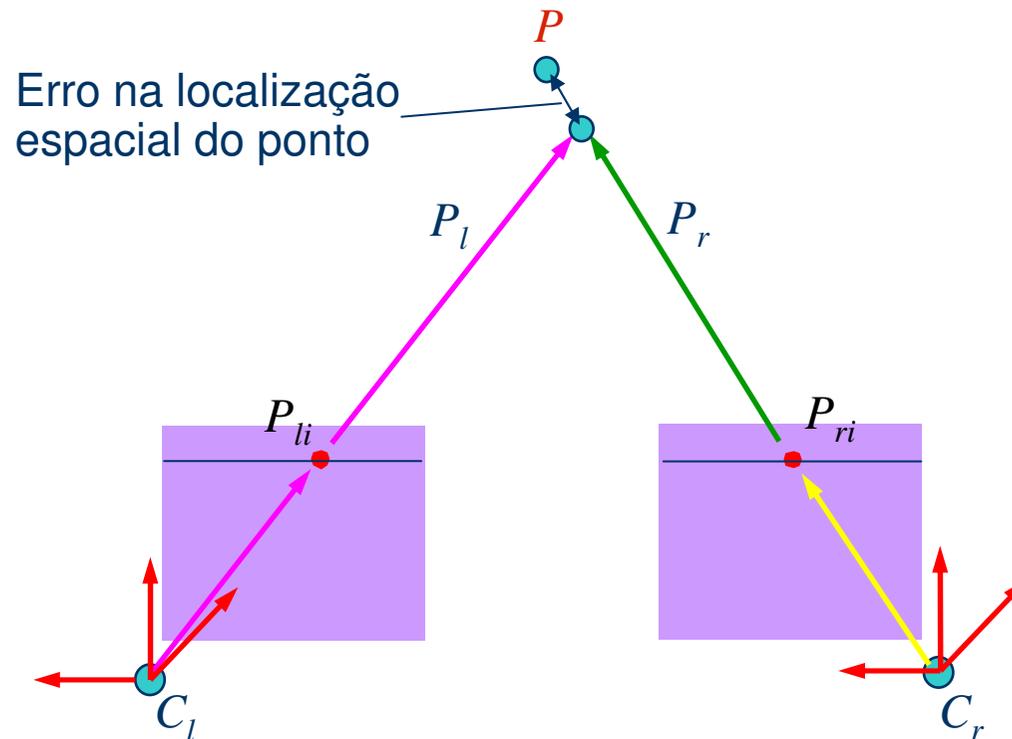


Processo de correspondência

- Problemas do processo de correspondência:
 - **Diferenças** de sensibilidade e ganho **entre as câmeras** mesmo que elas sejam de modelos idênticos
 - As câmeras não veem exatamente as mesmas superfícies \Rightarrow o nível de **intensidade dos pixels** pode ser **diferente**
 - Algumas características podem ser vistas por uma das câmeras e pela outra não \Rightarrow **oclusão**
 - Presença de **superfícies lisas** sem texturas \Rightarrow todos pontos da superfície são similares
 - Computacionalmente muito exigente

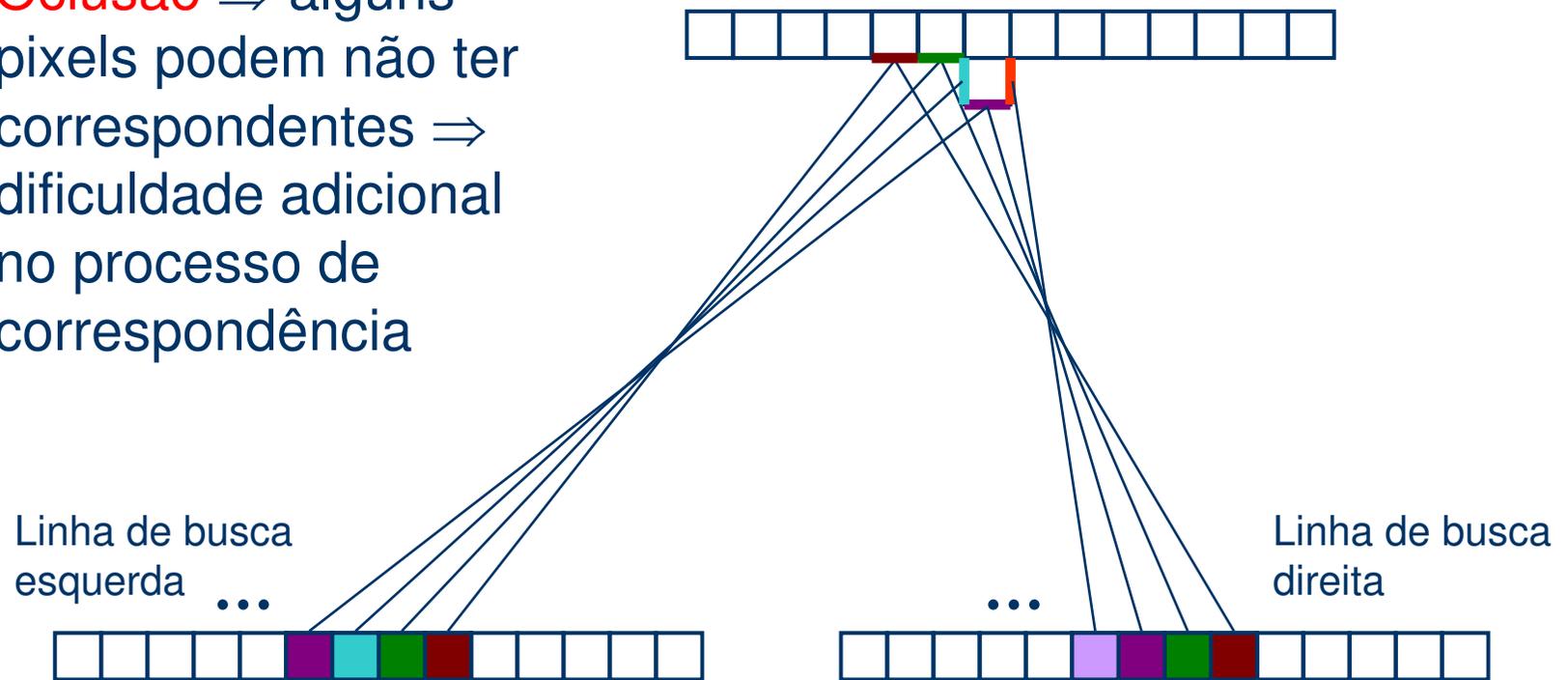
Processo de correspondência

- Erro na correspondência \Rightarrow erro na determinação da posição espacial do ponto



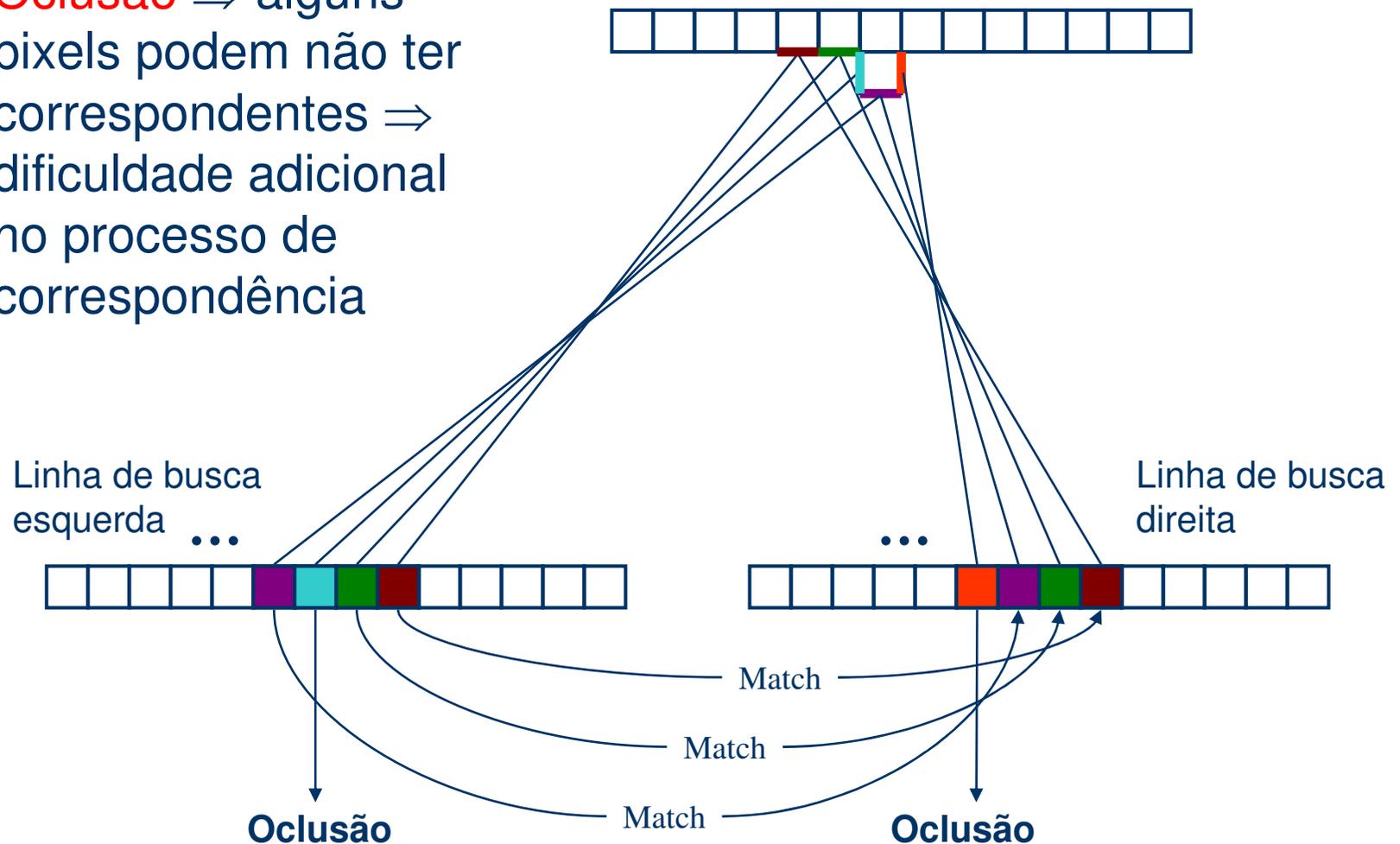
Processo de correspondência

- **Oclusão** \Rightarrow alguns pixels podem não ter correspondentes \Rightarrow dificuldade adicional no processo de correspondência



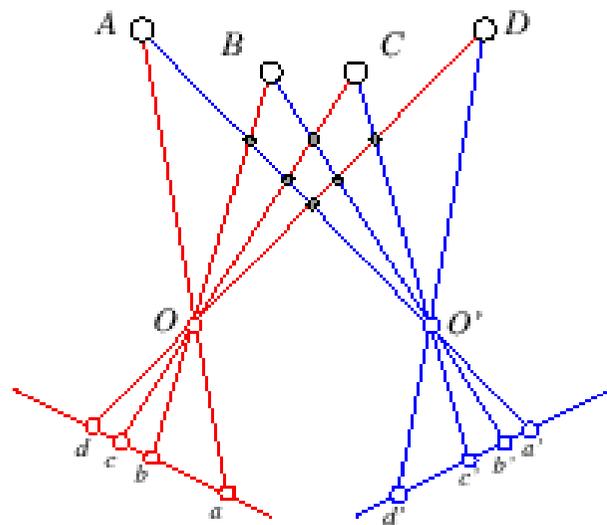
Processo de correspondência

- **Oclusão** \Rightarrow alguns pixels podem não ter correspondentes \Rightarrow dificuldade adicional no processo de correspondência

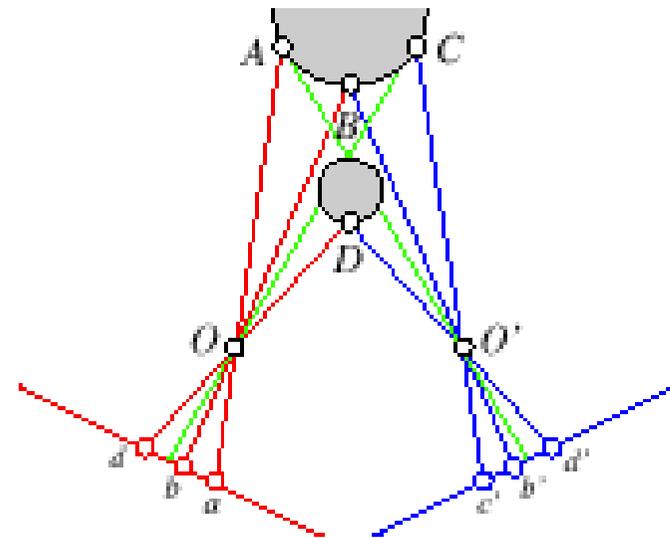


Processo de correspondência

- Visão estéreo fundamentalmente ambígua \Rightarrow utilização de restrições auxilia processo mas não resolve
- Tipos de restrições: ordenamento, máxima e mínima disparidade



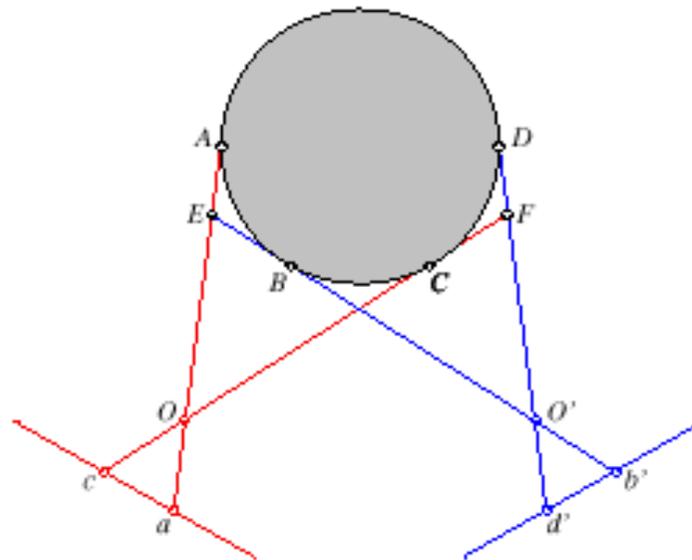
Restrição de ordenamento



... e sua falha

Processo de correspondência

- **Superfícies lisas** \Rightarrow processo de correspondência falha totalmente \Rightarrow não é possível determinar pontos correspondentes



- **Não existe atualmente nenhuma solução ótima para o problema de correspondência**

Reconstrução 3D

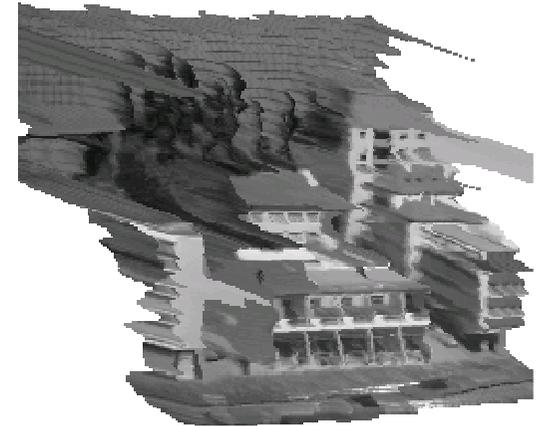


Imagem original



Image disparidade

[Matthies, Szeliski, Kanade'88]



Reconstrução 3D

Reconstrução 3D

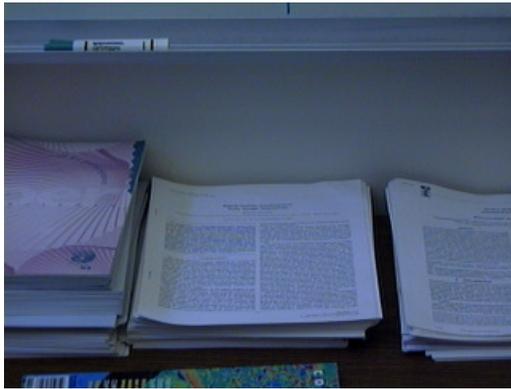


Imagem original



Image disparidade



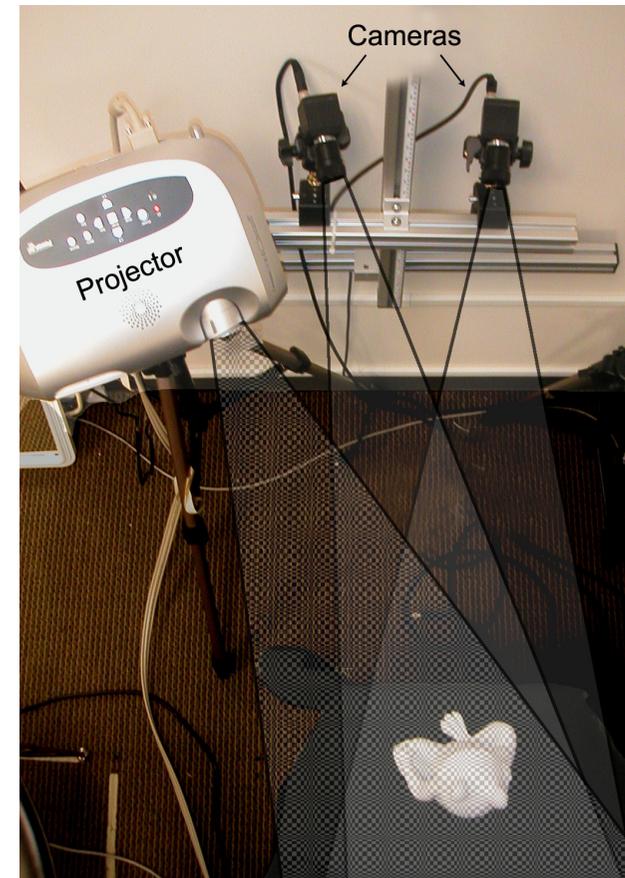
Reconstrução 3D

Visão estéreo ativa

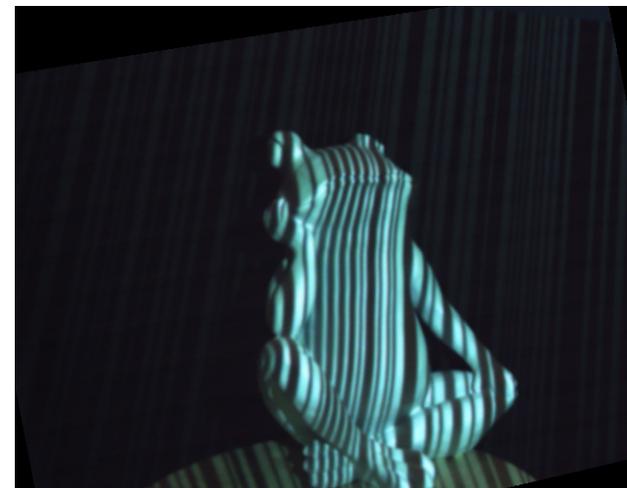
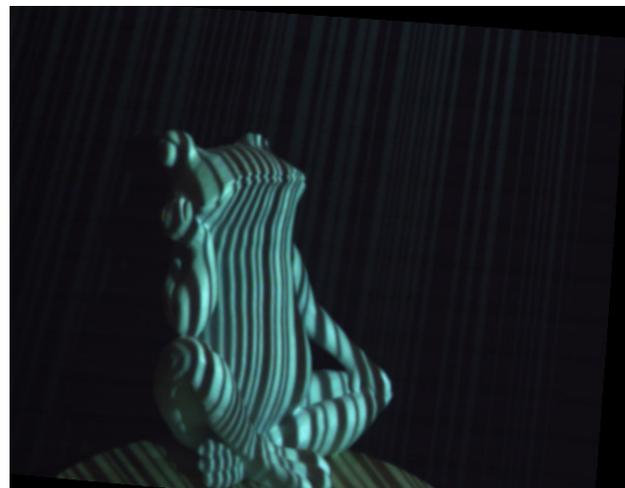
- Erros no processo de reconstrução 3D são grandes \Rightarrow devido a erros no processo de correspondência
- Processo de correspondência é computacionalmente muito exigente \Rightarrow dificuldade de processar imagens em tempo real
- Visão estéreo ativa usa recursos além das imagens para facilitar processo de correspondência:
 - Luz estruturada (Kinetic da Microsoft)
 - Uso de sensores de distância em conjunto com uma ou mais câmeras
- Obtém-se resultados de reconstrução 3D muito bons em tempo real

Visão estéreo ativa (luz estruturada)

- Padrão de luz é projetado na imagem para auxiliar a correspondência

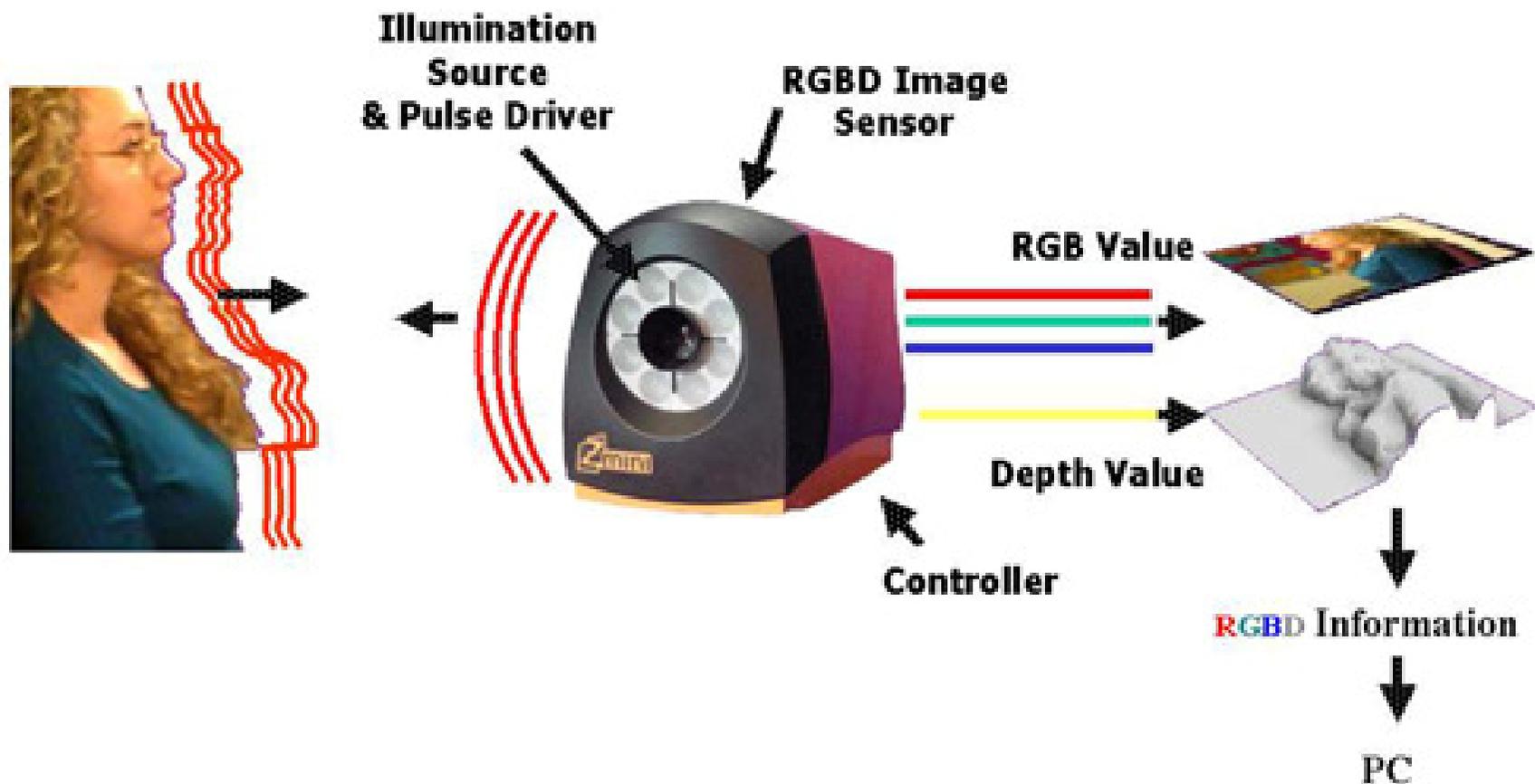


Visão estéreo ativa (luz estruturada)



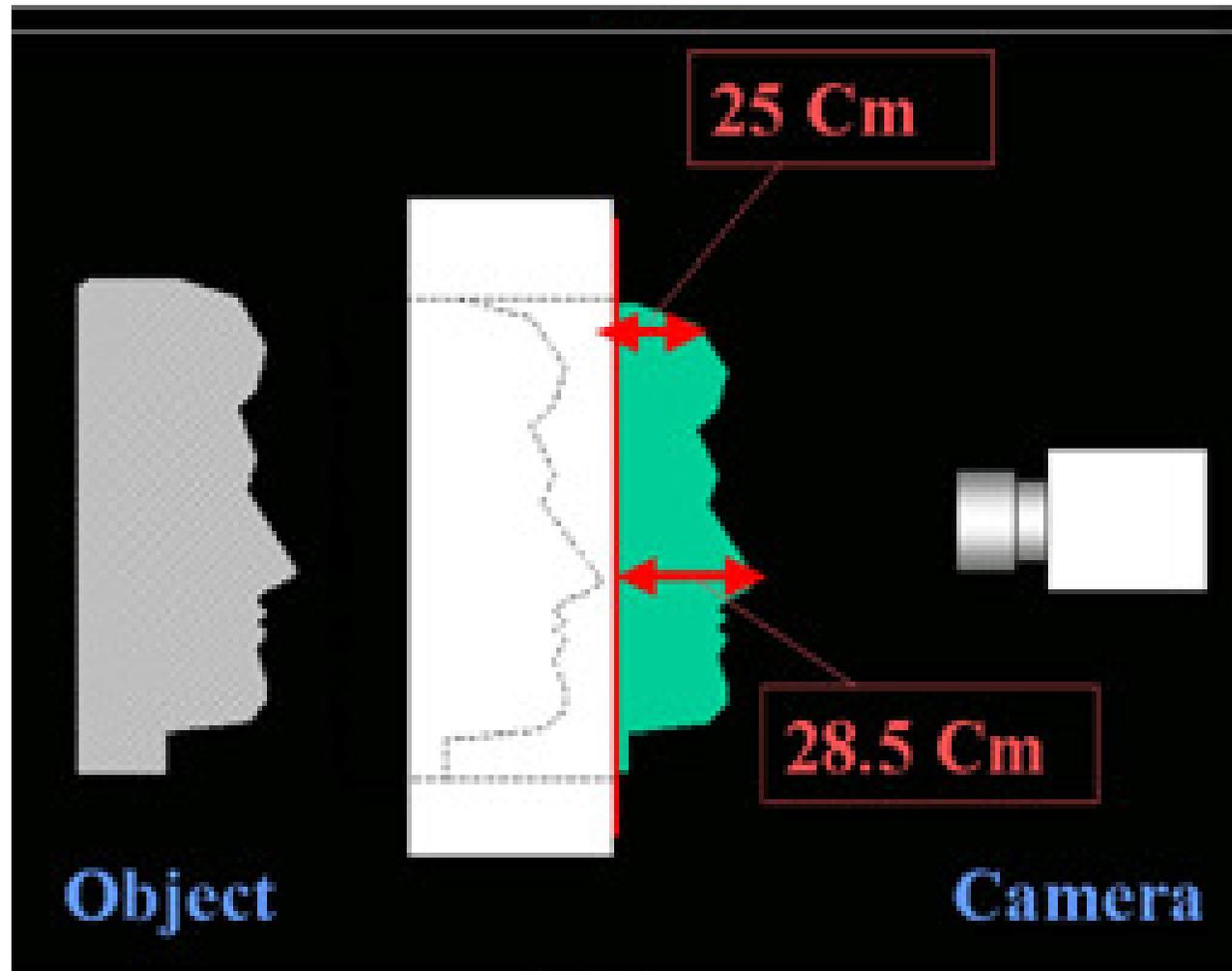
rectificada

Visão estéreo ativa (sensor distância)



<http://vislab.it/products/3dv-stereo-system/>

Visão estéreo ativa (sensor distância)



Visão estéreo ativa (sensor distância)



<http://vislab.it/products/3dv-stereo-system/>