PMR2560 – Visão Computacional
Calibração de câmeras

Prof. Eduardo L. L. Cabral

Objetivos

- Calibração de câmeras;
  - Para que calibrar uma câmera?
  - Procedimento de calibração;
  - Métodos de calibração.

Formação da imagem

- Transformação de coordenadas do sistema da imagem (em pixels) para o mundo (em mm ou m) considerando a distorção da lente:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = L(r)\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} u_d w \\ v_d w \\ w \end{bmatrix} = L(r)\begin{bmatrix} \alpha_x & s & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{H}_{\mathbf{C}}^{\mathbf{M}} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix}$$

Formação da imagem

- No modelo de formação da imagem tem-se diversos parâmetros:
  - Parâmetros intrínsecos $\Rightarrow$ internos à câmera:
    - α_x, α_y, u_0, v_0, s, k_1 (6 parâmetros).
  - Parâmetros extrínsecos $\Rightarrow$ externos à câmera:
    - $\mathbf{R}_{\mathbf{C}}^{\mathbf{M}}$ e $\mathbf{T}$ (6 parâmetros).
  - Na maioria das aplicações de visão computacional é preciso conhecer esses parâmetros.
- Cálculo desses parâmetros da câmera $\Rightarrow$ calibração da câmera.

Calibração de câmeras

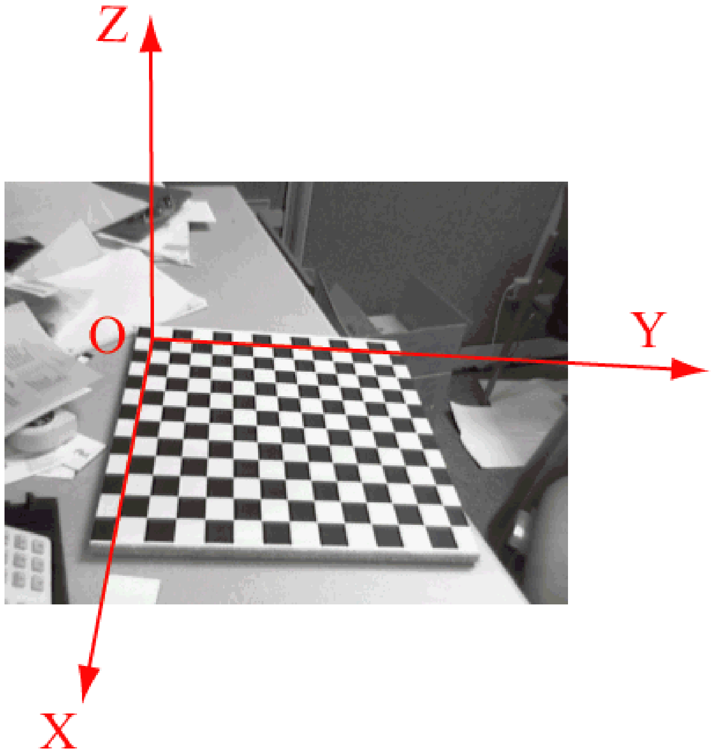
- Para que calibrar uma câmera?
  - Para obter medidas de posição e tamanho de objetos no ambiente.
  - Para determinar o que um pixel na imagem corresponde em mm no ambiente.
  - Para permitir interação com o ambiente, como no caso dos robôs móveis autônomos.

Calibração de câmeras

- Métodos:
  - Transformação Linear Direta:
    - Fácil de entender;
    - Não considera distorções da lente.
  - Método de Tsai:
    - Complexo, considera distorções, complicado para implementar;
    - Foi padrão até o ano 2000.
  - Toolbox de calibração de câmeras do Matlab©:
    - Complexo, considera distorções;
    - Fácil de implementar;
    - Padrão atual.

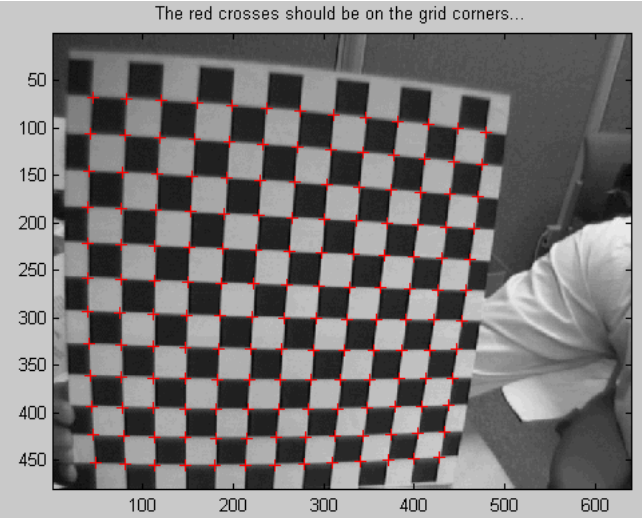
Calibração de câmeras

- Procedimento de calibração:
  - Padrão de calibração mais utilizado ⇒ plano com desenho de tabuleiro de xadrez (padrão de Tsai).
  - Conhece-se as posições dos cantos dos quadrados do xadrez em relação ao sistema de coordenadas do padrão.
  - Câmera é posicionada em frente do padrão em diversas posições e orientações e as imagens são adquiridas.
  - Mínimo de 6 pontos é necessário para a calibração ⇒ quanto mais pontos melhor (minimização).



Calibração de câmeras

- Por meio do processamento das imagens obtém-se as posições dos cantos dos quadrados do xadrez nas imagens:
  - Detecção das bordas do xadrez;
  - Ajuste de retas à bordas detectadas;
  - Os cantos são obtidos pela intersecção das retas.
- Correspondendo os cantos das imagens e os cantos do padrão em 3D ⇒ obtém-se os pares de pontos nas imagens e no mundo.



- Usando o modelo de formação da imagem obtém-se equações que descrevem a relação entre os pontos nas imagens e os pontos do padrão em 3D.
- Solução das equações fornece os parâmetros intrínsecos e intrínsecos da câmera.

Exemplo DLT

- Processo de calibração de uma câmera sem considerar distorção da lente (Transformação Linear Direta - DLT):
  - Exemplo de pontos de calibração do padrão (cm):

    $\mathbf{P_{1s}} = [0; 0; 0]$; $\mathbf{P_{2s}} = [0; 6; 0]$; $\mathbf{P_{3s}} = [0; 12; 0]$

    $\mathbf{P_{4s}} = [6; 0; 2]$; $\mathbf{P_{5s}} = [6; 6; 2]$; $\mathbf{P_{6s}} = [6; 12; 2]$
  - Pontos dos cantos detectados na imagem (pixel):

    $\mathbf{P_{1i}} = [121; 108]$; $\mathbf{P_{2i}} = [120; 321]$; $\mathbf{P_{3i}} = [119; 532]$

    $\mathbf{P_{4i}} = [360; 111]$; $\mathbf{P_{5i}} = [358; 322]$; $\mathbf{P_{6i}} = [362; 529]$
  - Sem distorção da lente $\Rightarrow s = 0;\ k_1 = 0.$

Exemplo DLT

- Matriz de formação da imagem:

$$\mathbf{P} = \mathbf{k}\mathbf{H}_{\mathbf{C}}^{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\mathbf{C}}^{\mathbf{M}} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix}$$

- Especialização das equações de formação da imagem para um plano:

$$\begin{bmatrix} w_i u_i \\ w_i v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{si} \\ Y_{si} \\ Z_{Si} \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Abrindo a equação matricial:

$$\begin{cases} w_i u_i = m_{11} X_{si} + m_{12} Y_{si} + m_{13} Z_{Si} + m_{14} & (1) \\ w_i v_i = m_{21} X_{si} + m_{22} Y_{si} + m_{23} Z_{Si} + m_{24} & (2) \\ w_i = r_{31} X_{si} + r_{32} Y_{si} + r_{33} Z_{Si} + t_z & (3) \end{cases}$$

Exemplo DLT

- Substituindo a eq. (3) nas eq. (1) e (2), depois dividindo por t_z e rearranjando, obtém-se:

$$\begin{cases} \frac{r_{31}}{t_z} u_i X_{si} + \frac{r_{32}}{t_z} u_i Y_{si} + \frac{r_{33}}{t_z} u_i Z_{Si} - \frac{m_{11}}{t_z} X_{si} - \frac{m_{12}}{t_z} Y_{si} - \frac{m_{13}}{t_z} Z_{Si} - \frac{m_{14}}{t_z} = -u_i \\ \frac{r_{31}}{t_z} v_i X_{si} + \frac{r_{32}}{t_z} v_i Y_{si} + \frac{r_{33}}{t_z} v_i Z_{Si} - \frac{m_{21}}{t_z} X_{si} - \frac{m_{22}}{t_z} Y_{si} - \frac{m_{23}}{t_z} Z_{Si} - \frac{m_{24}}{t_z} = -v_i \end{cases}$$

- Para os seis pontos de calibração essas duas equações formam um sistema de 12 equações e 11 incógnitas:

$$\frac{r_{31}}{t_z}, \frac{r_{32}}{t_z}, \frac{r_{33}}{t_z}, \frac{m_{11}}{t_z}, \frac{m_{12}}{t_z}, \frac{m_{13}}{t_z}, \frac{m_{14}}{t_z}, \frac{m_{21}}{t_z}, \frac{m_{22}}{t_z}, \frac{m_{23}}{t_z}, \frac{m_{24}}{t_z}$$

Exemplo DLT

- Após o cálculo das 11 incógnitas ⇒ calcula-se t_z:

$$\sqrt{\left(\frac{r_{31}}{t_z}\right)^2+\left(\frac{r_{32}}{t_z}\right)^2+\left(\frac{r_{33}}{t_z}\right)^2}=\sqrt{\frac{1}{t_z^2}\underbrace{\left(r_{31}^2+r_{32}^2+r_{33}^2\right)}_{1}}=\frac{1}{t_z}$$

- Com t_z pode-se calcular todos os elementos da matriz **P**:

$$r_{31}=\frac{r_{31}}{t_z}t_z;\quad r_{32}=\frac{r_{32}}{t_z}t_z;\quad r_{33}=\frac{r_{33}}{t_z}t_z;$$

$$m_{11}=\frac{m_{11}}{t_z}t_z;\quad m_{12}=\frac{m_{12}}{t_z}t_z;\quad m_{13}=\frac{m_{13}}{t_z}t_z;\quad m_{14}=\frac{m_{14}}{t_z}t_z;$$

$$m_{21}=\frac{m_{21}}{t_z}t_z;\quad m_{22}=\frac{m_{22}}{t_z}t_z;\quad m_{23}=\frac{m_{23}}{t_z}t_z;\quad m_{24}=\frac{m_{24}}{t_z}t_z.$$