



# PMR2560 – Robótica

## Cadeia Cinemática

**Eduardo L. L. Cabral**

elcabral@usp.br

# Objetivos

- Cadeia cinemática:
  - Graus de liberdade;
  - Exemplos de robôs com cadeias seriada e fechada.
- Articulações:
  - Rotação;
  - Translação;
  - Universal;
  - Esférica;
  - Cilíndrica;
  - Exemplo construtivo.
- Punho esférico.



# Cadeia cinemática

- Graus de liberdade (GL):
  - Cadeia aberta  $\Rightarrow$  número de GL é igual ao número de articulações ativas;
  - Cadeia fechada  $\Rightarrow$  número de GL depende da configuração geométrica e do número de articulações passivas e ativas.



Quantos GL tem esse robô?



# Cadeia cinemática

- Número de GL de um robô de cadeia fechada  $\Rightarrow$  está relacionado com a sua configuração cinemática:

$$(\lambda + 1)F - \lambda = C_1 + C_2 + \dots + C_m = \sum_{k=1}^m C_k$$

- $\lambda$  = número de movimentos independentes que um corpo sem qualquer vínculo pode executar dentro do seu espaço de trabalho (graus de liberdade do espaço de trabalho);
- $F$  = mobilidade ou número de graus de liberdade do mecanismo (número de movimentos independentes do efetuador);
- $m$  = número de cadeias cinemáticas ativas;
- $C_k$  = conectividade da cadeia cinemática  $k$  (número de movimentos passivos e ativos que o mecanismo pode executar).



# Cadeia cinemática

- Outra relação que também fornece o número de GL de um robô de cadeia fechada:

$$F = \lambda(n_L - n_A - 1) + \sum_{i=1}^{n_A} f_i$$

- $\lambda$  = número de graus de liberdade do espaço de trabalho;
  - $F$  = mobilidade ou número de graus de liberdade do mecanismo (número de movimentos independentes do efetuador);
  - $n_L$  = número de ligamentos;
  - $n_A$  = número de articulações;
  - $f_i$  = número de graus de liberdade da articulação  $i$ .
- **Relações limitadas**  $\Rightarrow$  fornecem somente o número de GL, mas não definem os tipos de movimentos.



# Cadeia cinemática

- Robôs seriados:



Robô articulado 6R



Robô SCARA 2R1PR



Robô P5R



Robô paletizador 3R



Robô cartesiano 3P1R

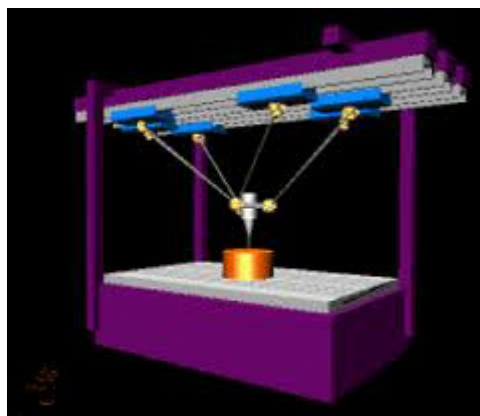


# Cadeia cinemática

- Robôs paralelos:



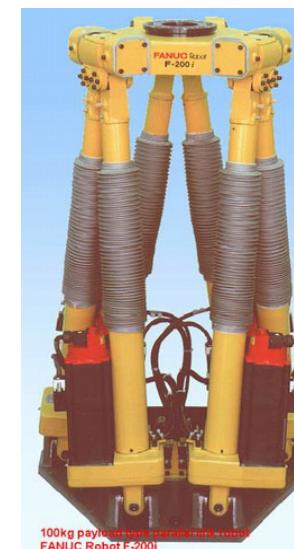
Hexa 6-RUS



Hexaglide 6-PUS



Hexapod 6-SPU



Quattro – Delta  
2-RUS + 2-RUU



Flex Picker  
3-RUU

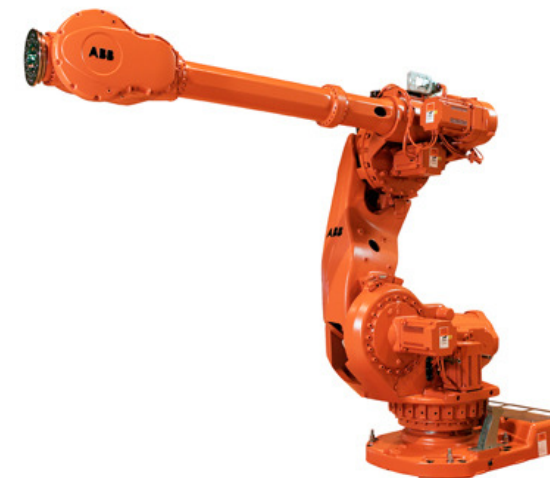




# Cadeia cinemática

- Cadeia fechada X cadeia aberta

Item	Arquitetura Seriada	Arquitetura Paralela
<b>Volume de Trabalho</b>	Grande	Pequeno
<b>Capacidade de Carga</b>	Baixa	Alta
<b>Precisão do Efetuador</b>	Baixa	Alta
<b>Juntas Passivas</b>	Poucas ou nenhuma	Tem
<b>Velocidade / Aceleração</b>	Baixa	Alta
<b>Cinem. / Din. Inversa</b>	Complexa, múltiplas soluções	Simples, múltiplas soluções
<b>Cinem. / Din. Direta</b>	Simples, solução única	Complexa, múltiplas soluções
<b>Aplicações Típicas</b>	Soldagem, montagem, pintura, manuseio de materiais	Simuladores, usinagem, posicionamento de precisão, pick-and-place





# Articulações

- Características desejadas:
  - Alta rigidez;
  - Alta precisão;
  - Sem folga;
  - Alta qualidade de movimento;
    - Baixa flutuação de velocidade;
    - Baixo nível de vibração.
- Alta rigidez  $\Rightarrow$  não introduzir erros adicionais de posicionamento provocados por deformação mecânica.
- Articulações passivas e ativas:
  - Robôs seriados  $\Rightarrow$  somente articulações ativas (atuadas);
  - Robôs paralelos  $\Rightarrow$  possuem articulações passivas e ativas.



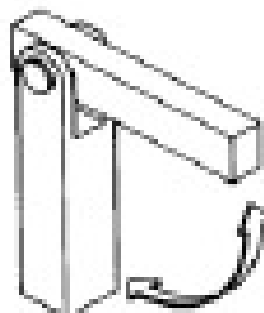
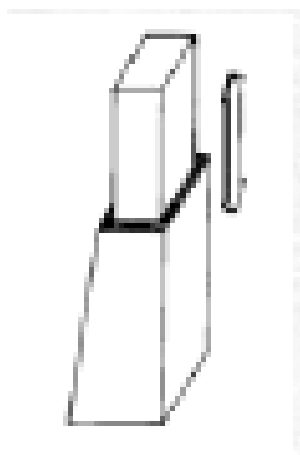
# Articulações

- Tipos de articulações dos robôs industriais:
  - Rotação – 1 GL (R);
  - Translação ou prismática – 1 GL (P);
  - Universal – 2 GL (U);
  - Esférica – 3 GL (S);
  - Cilíndrica – 2 GL (C).
- Articulações universal, esférica e cilíndrica:
  - Somente nos robôs de cadeia fechada;
  - Em geral são articulações passivas.

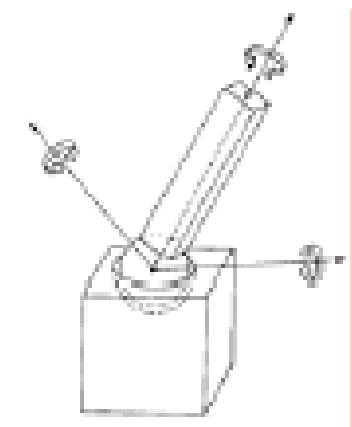


# Articulações

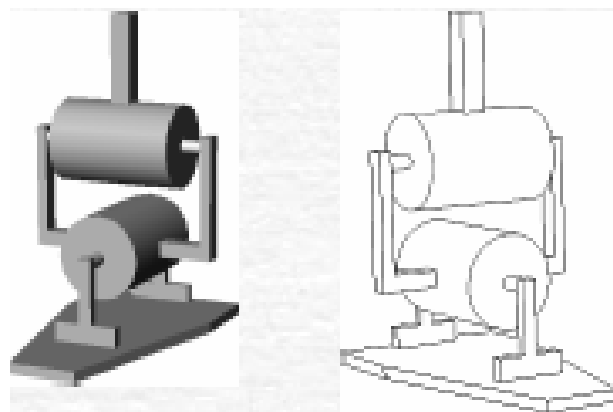
Prismática



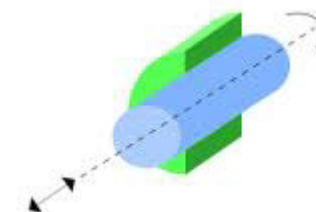
Rotação



Esférica



Universal



Cilíndrica



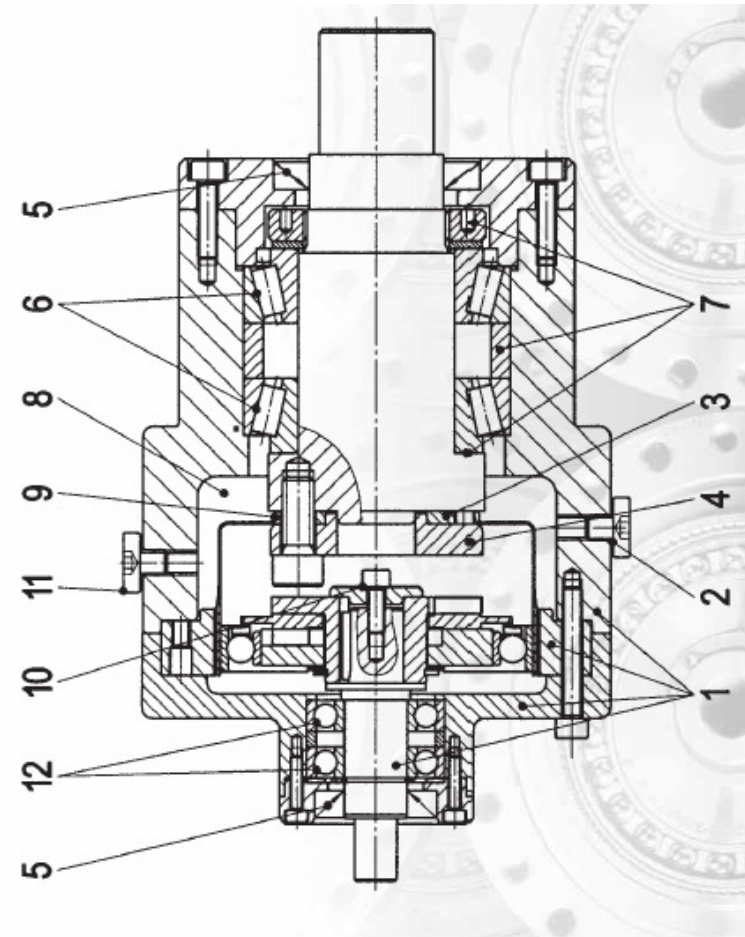
# Articulações

- Acionamento:
  - Direto  $\Rightarrow$  elemento móvel do atuador é acoplado à junta diretamente.
  - Indireto  $\Rightarrow$  elemento móvel do atuador é acoplado à junta mediante um sistema de transmissão.
- Motores elétricos são normalmente usados com atuação indireta:
  - Possuem alta velocidade e baixo torque;
  - São exceções os motores de passo e os chamados motores “direct-drive”;
  - Motores “direct-drive” têm uma concepção especial e permitem altos torques e baixas rotações.
- Cilindros hidráulicos e pneumáticos são usados com atuação direta.



# Articulações

- Exemplo construtivo:
  - Arranjo para eliminação de folgas radiais  $\Rightarrow$  eixos com apoio duplo de rolamentos de rolos cônicos ou de esferas com contato angular, com pré-carga.

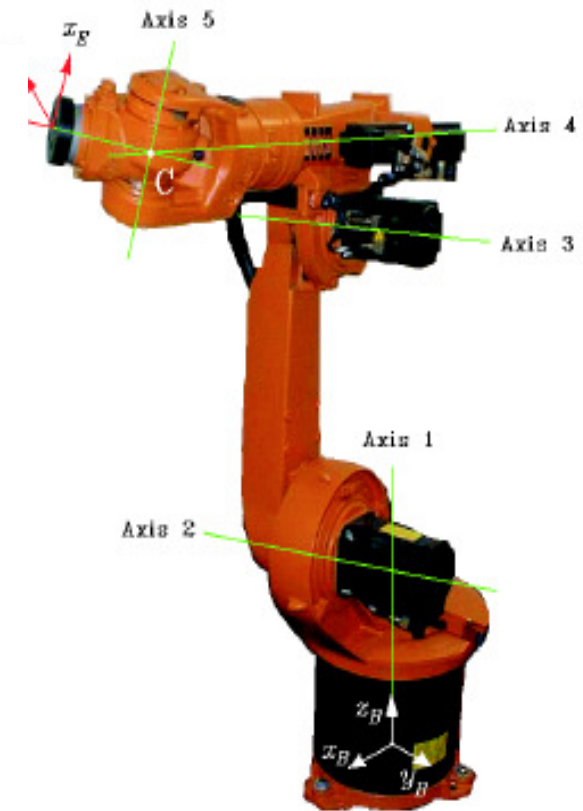
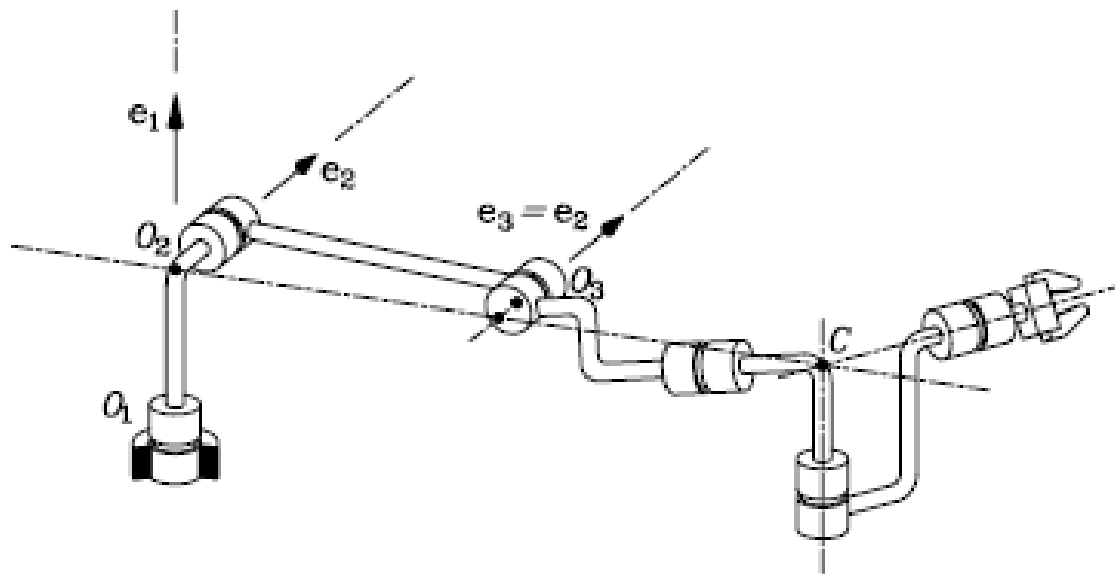


# Punho esférico

- Robôs manipuladores industriais (robôs seriados):
  - Grande maioria são do tipo articulado (RRR);
  - Posição e orientação do efetuador são desacoplados;
  - Três primeiros GL posicionam o efetuador;
  - Três últimos GL orientam o efetuador.
- Utilizam mecanismo especial para orientar o efetuador  
⇒ punho esférico.
- Punho esférico:
  - 3 articulações de rotação;
  - Disposição característica ⇒ 3 eixos perpendiculares entre si;
  - Ângulos de “roll-pitch-yaw”.



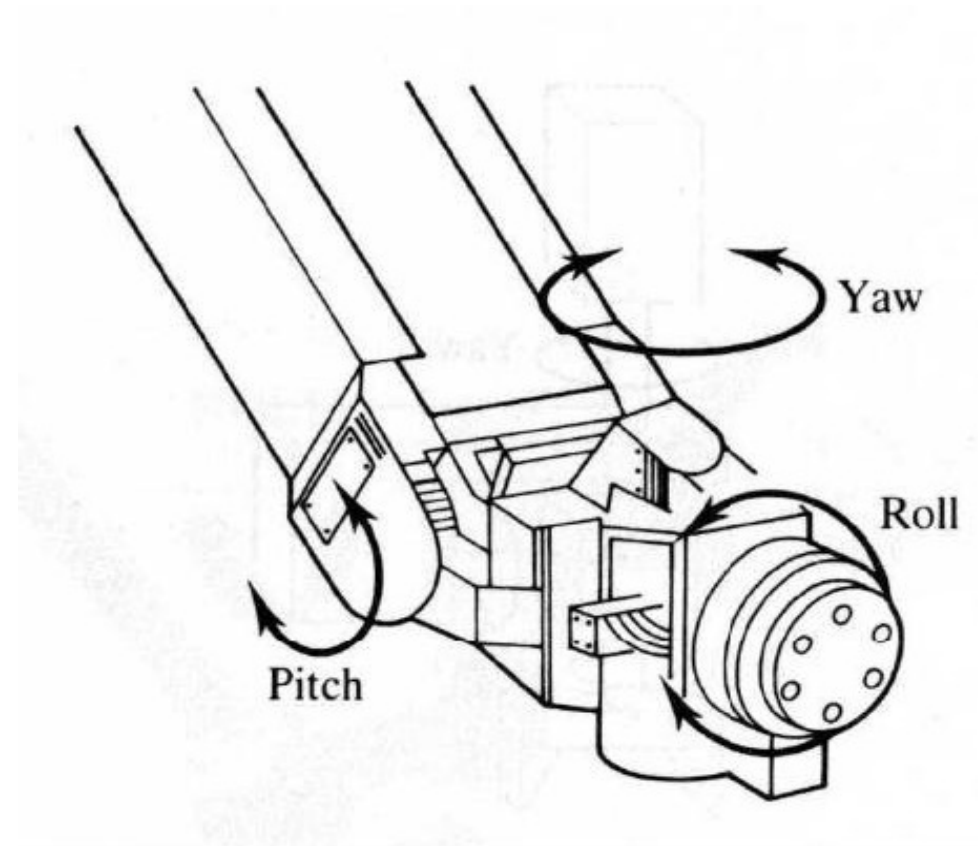
# Punho esférico





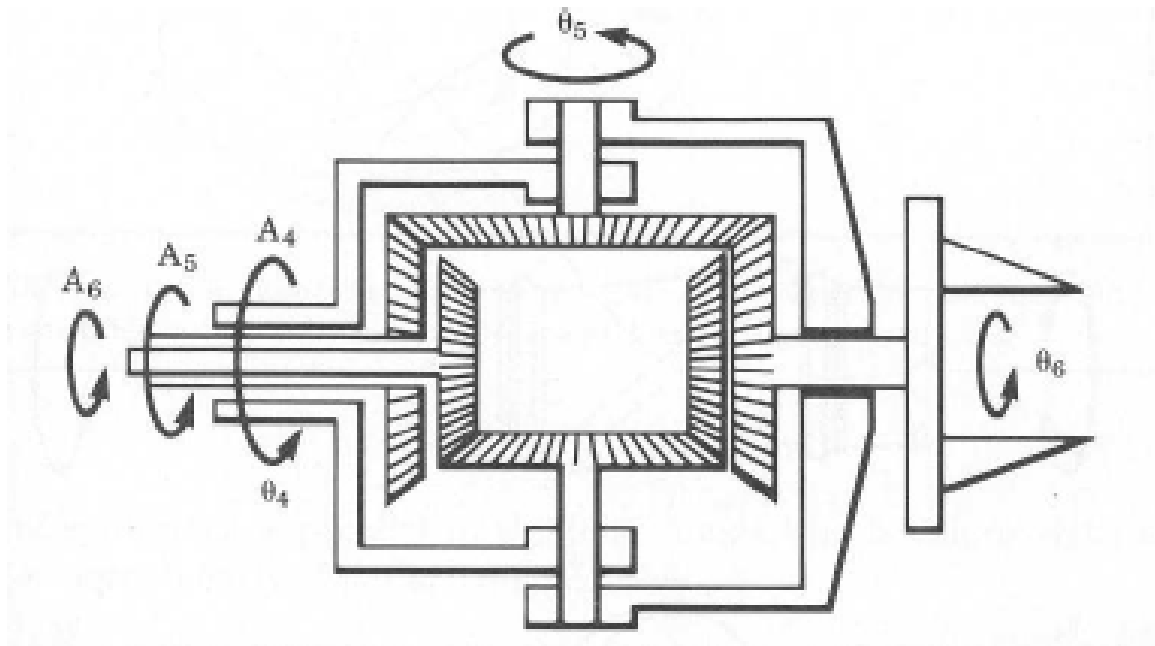
# Punho esférico

- Roll  $\Rightarrow$  rotação em  $x$ ;
- Pitch  $\Rightarrow$  rotação em  $y$ ;
- Yaw  $\Rightarrow$  rotação em  $z$ .



# Punho esférico

- Possível forma construtiva:



# Exemplos

- 1) Quais os movimentos do efetuador e quantos graus de liberdade têm os seguintes robôs de cadeia cinemática fechada?
  - a) 6-RUS
  - b) 6-PUS
  - c) 6-SPU
  - d) 3-RUS
  - e) 2-RUS + 2-RUU
- 2) Defina uma configuração cinemática para um robô de cadeia cinemática fechada com 3 graus de liberdade de translação.
- 3) Defina uma configuração cinemática para um robô de cadeia cinemática fechada com 3 graus de liberdade de rotação.



## Exemplos solução

- 1) Quais os movimentos do efetuador e quantos graus de liberdade têm os seguintes robôs de cadeia cinemática fechada?
  - a) 6-RUS (6GL)
  - b) 6-PUS (6GL)
  - c) 6-SPU (6GL)
  - d) 3-RUS (3GL – 3 translações)
  - e) 2-RUS + 2-RUU (4GL – 3 translações e 1 rotação)



# Exemplos solução

- 2) Defina uma configuração cinemática para um robô de cadeia cinemática fechada com 3 graus de liberdade de translação.

3-UPU, 3-RUU, 3-PUU, 3-RPC, 3-CRR

- 3) Defina uma configuração cinemática para um robô de cadeia cinemática fechada com 3 graus de liberdade de rotação.

????????????

