ROBÓTICA INDUSTRIAL

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores de Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FORMAÇÃO DA 1ª EMPRESA DE ROBOTICA

George Devol and Joseph F. Engelberger encontram-se numa festa e têm a seguinte conversa:

GD: 50 percent of the people who work in factories are really putting and taking.
JE: Why are machines made to produce only specific items?
GD: How about approaching manufacturing the other way around, by designing machines that could put and take anything?

A Unimation, Inc., a 1ª empresa de robótica do mundo, nasce desta discussão.

EVOLUÇÃO

• 1961: primeiro robot Unimate instalado na General Motors em New Jersey.

• 1963: o primeiro robot industrial controlado por computador, desenvolvido em Rancho Los Amigos Hospital, California.

No final de 2003:

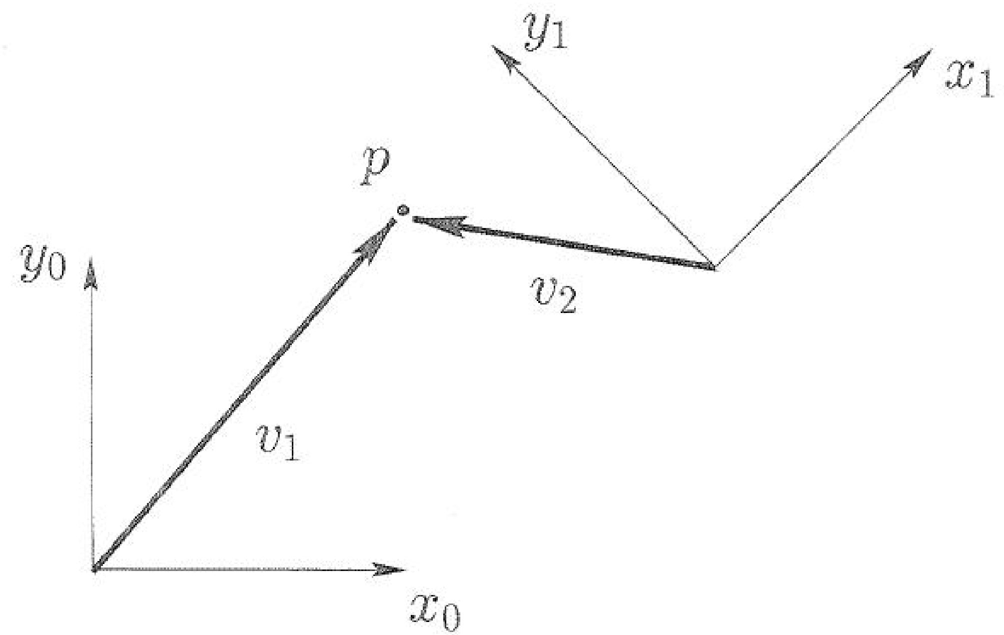
Japão: 350.000

Estados Unidos: 112.000

Alemanha: 112.700

Itália: 50.000
França: 26.000
Espanha: 18.000
Reino Unido: 14.000

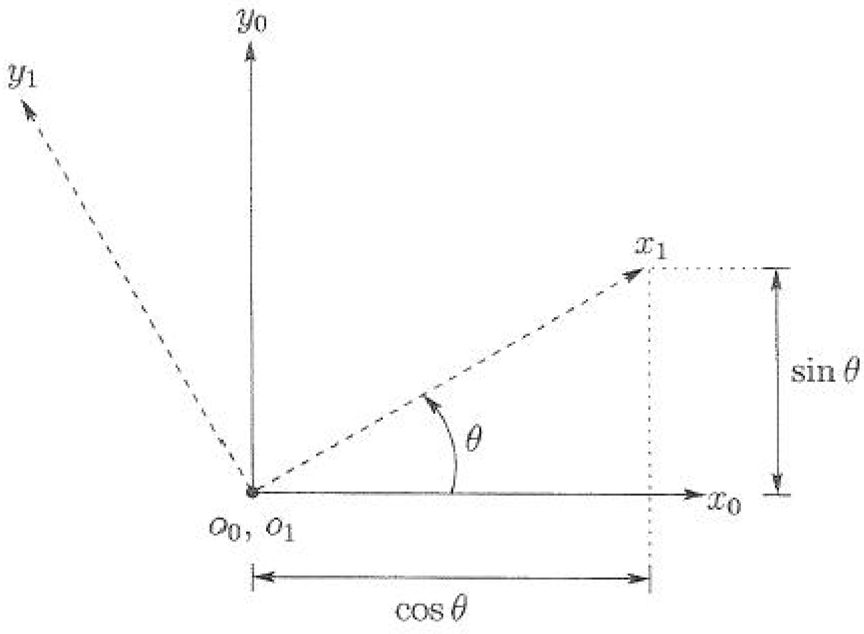
REPRESENTAÇÃO DE PONTOS E VECTORES



Sistemas de coordenadas: $o_0x_0y_0$ e $o_1x_1y_1$

$$p^0 = \begin{bmatrix} 5 \\ 6 \end{bmatrix} \qquad p^1 = \begin{bmatrix} -2.8 \\ 4.2 \end{bmatrix} \qquad v_1^0 = \begin{bmatrix} 5 \\ 6 \end{bmatrix} \qquad v_1^1 = \begin{bmatrix} 7.77 \\ 0.8 \end{bmatrix}$$

REPRESENTAÇÃO DE ROTAÇÕES NO PLANO



$$R_1^0 = \left[\ x_1^0 \quad | \quad y_1^0\ \right] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1.x_0 & y_1.x_0 \\ x_1.y_0 & y_1.y_0 \end{bmatrix}$$

GRUPO ORTOGONAL ESPECIAL

Conjunto de matrizes nxn designado por SO(n) tal que para qualquer $R \in SO(n)$, temos:

- $R^T = R^{-1}$ (ortogonal)
- As colunas/linhas de *R* são ortogonais entre si
- Cada coluna/linha de *R* é um vector unitário
- det(*R*) = 1 (referencial “right-handed)

As matrizes de rotação pertencem a este grupo.

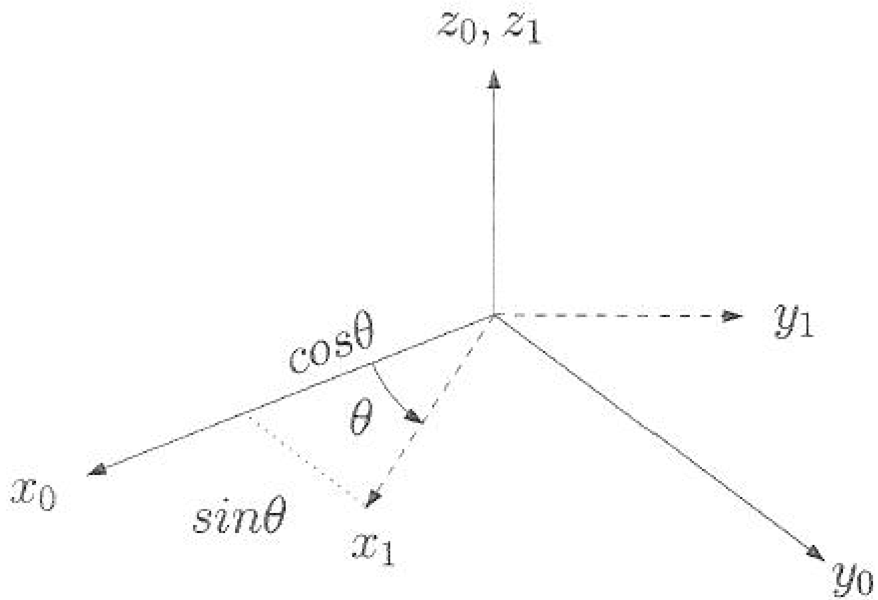
Calcular a inversa de uma matriz de rotação é calcular a matriz de rotação do mesmo ângulo com sinal contrário.

REPRESENTAÇÃO DE ROTAÇÕES NO ESPAÇO

Para dois sistemas de coordenadas $o_0x_0y_0z_0$ e $o_1x_1y_1z_1$, teremos a matriz de rotação:

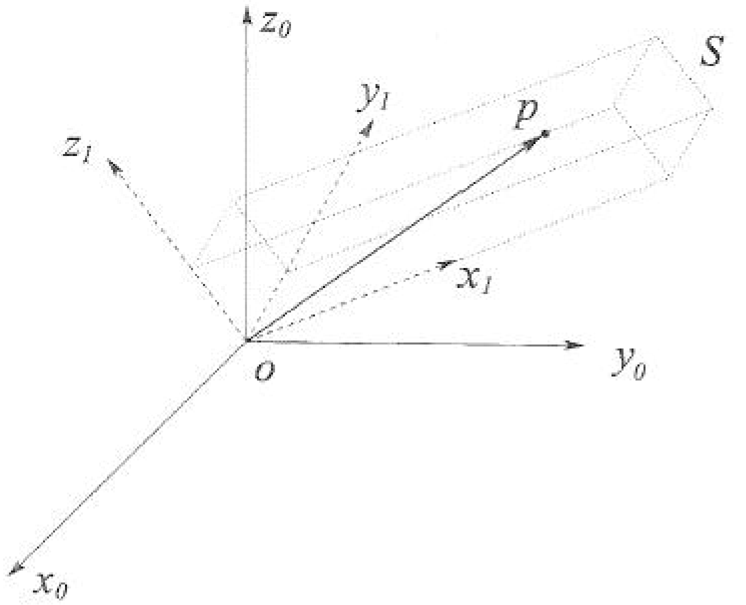
$$R_1^0 = \begin{bmatrix} x_1.x_0 & y_1.x_0 & z_1.x_0 \\ x_1.y_0 & y_1.y_0 & z_1.y_0 \\ x_1.z_0 & y_1.z_0 & z_1.z_0 \end{bmatrix}$$

ROTAÇÃO EM TORNO DO EIXO Z



$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =: R_{z,\theta}$$

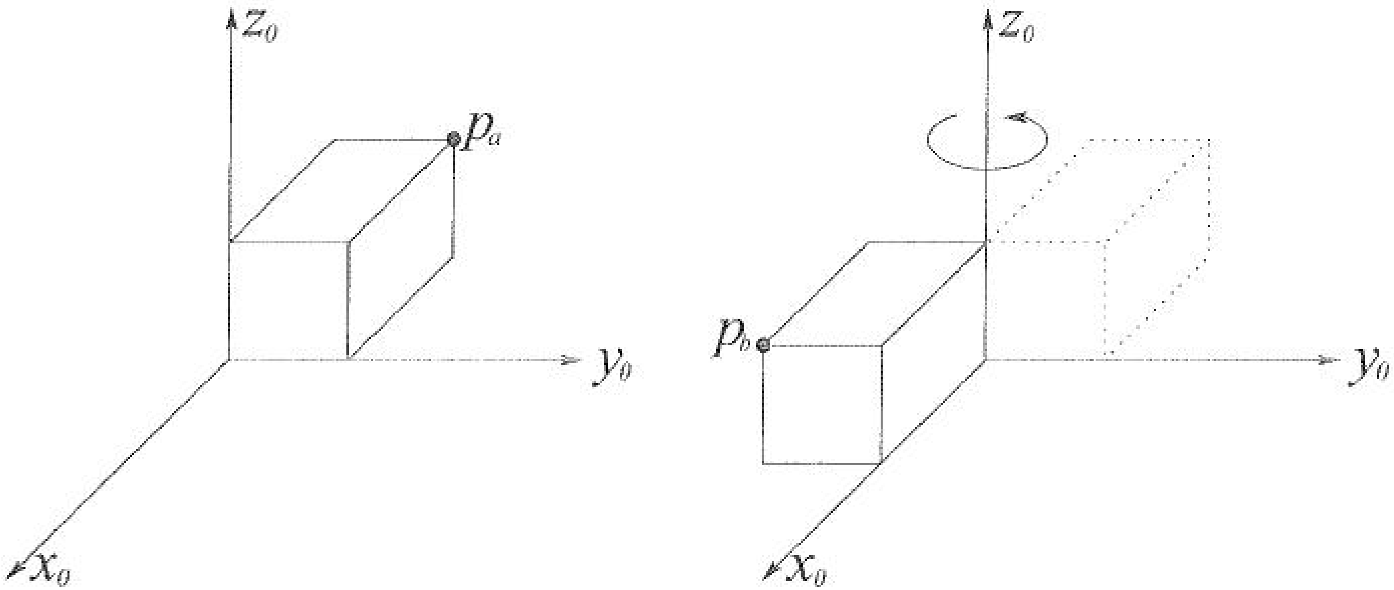
TRANSFORMAÇÕES ROTACIONAIS
(mudança de sistema de coordenadas)



$$p^1 = u\, x_1 + v\, y_1 + w\, z_1$$

$$p^0 = \begin{bmatrix} p.x_0 \\ p.y_0 \\ p.z_0 \end{bmatrix} = R_1^0\, p^1$$

TRANSFORMAÇÕES ROTACIONAIS
(rotação de pontos/vectores)



(a) (b)

Sendo: $R_1^0 = R_{z,\pi}$, $p_b^0 = R_{z,\pi}\, p_b^1 = R_{z,\pi}\, p_a^0$

Genericamente, temos: $p_b = R\, p_a$

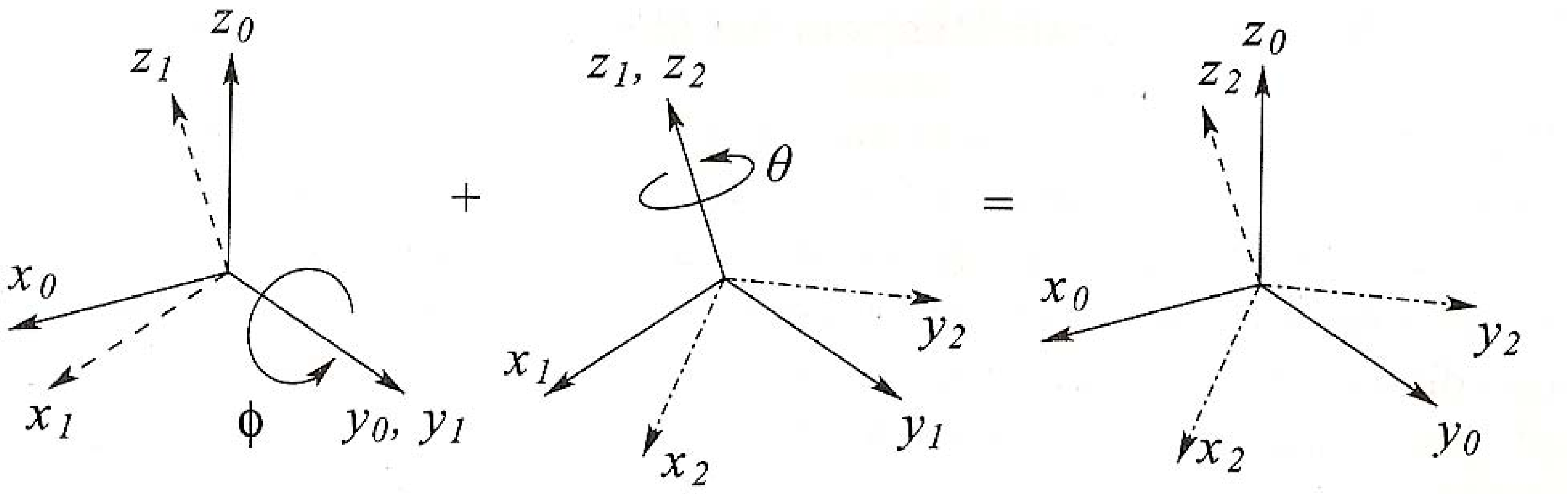
TRANSFORMAÇÕES SIMILARES

Seja A uma matriz que representa uma transformação linear no referencial $o_0x_0y_0z_0$ e B a mesma transformação linear no referencial $o_1x_1y_1z_1$, então temos:

$$B = (R_1^0)^{-1} A \, R_1^0$$

onde R_1^0 é a matriz de relação entre o referencial $o_1x_1y_1z_1$ e o referencial $o_0x_0y_0z_0$

COMPOSIÇÃO DE ROTAÇÕES EM TORNO DO REFERENCIAL ACTUAL

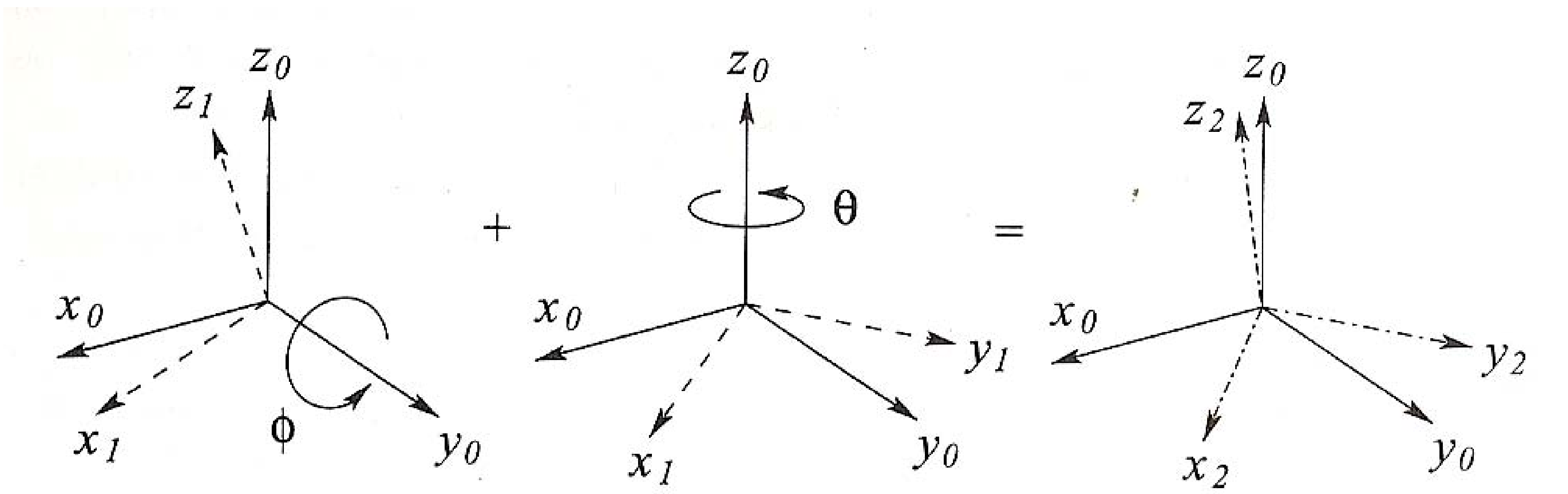


Sejam os sistemas de coordenadas $o_0x_0y_0z_0$, $o_1x_1y_1z_1$, e $o_2x_2y_2z_2$,

Relacionados pelas matrizes de rotação R_1^0 e R_2^1

Então teremos: $p^0 = R_1^0 R_2^1 \, p^2$ ou seja: $R_2^0 = R_1^0 R_2^1$

COMPOSIÇÃO DE ROTAÇÕES EM TORNO DE UM REFERENCIAL FIXO



Neste caso: $R_2^0 = R\, R_1^0$

REGRAS DE COMPOSIÇÃO DE TRANSFORMAÇÕES ROTACIONAIS

Dado um referencial fixo $o_0x_0y_0z_0$, e um referencial actual $o_1x_1y_1z_1$ com uma matriz de rotação entre ambos R_1^0.

Obtem-se um terceiro referencial $o_2x_2y_2z_2$, caracterizado pela matriz R_2^1 relativa ao referencial actual, através de:

$$R_2^0 = R_1^0 \; R_2^1$$

Se a segunda rotação R é feita em relação ao referencial fixo $o_0x_0y_0z_0$, então:

$$R_2^0 = R \, R_1^0$$

PARAMETRIZAÇÃO DE ROTAÇÕES

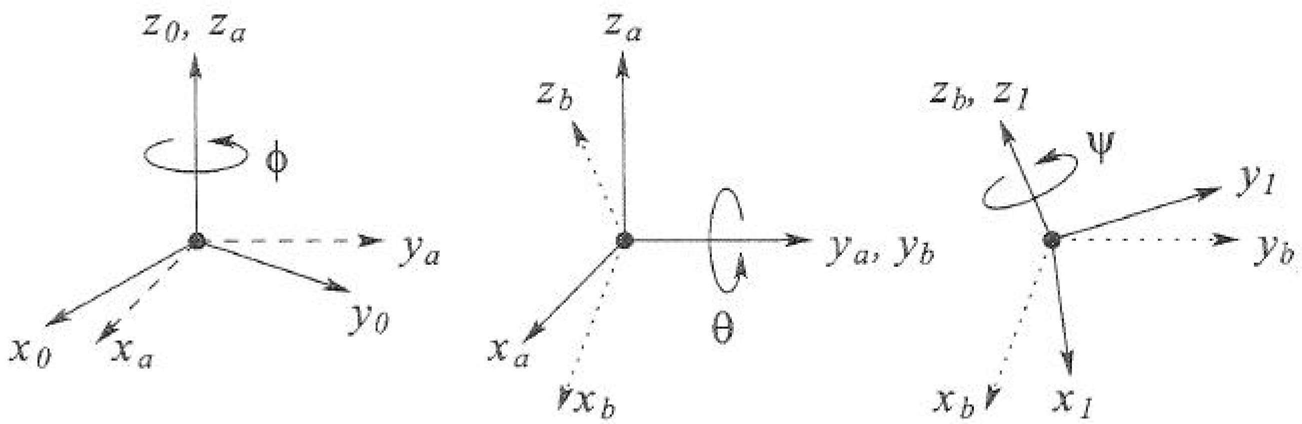
Um corpo rigido só tem 3 graus de liberdade para rotações e uma matriz $R \in SO(3)$ tem 9 elementos, logo não são todos independentes:

$$\sum_i r_{ij}^2 = 1, \qquad j \in \{1, 2, 3\} \qquad \text{(colunas são vectores unitários)}$$

$$r_{1i} r_{1j} + r_{2i} r_{2j} + r_{3i} r_{3j} = 0, \qquad i \neq j \quad \text{(colunas ortogonais)}$$

resultam 6 equações com 9 incógnitas.

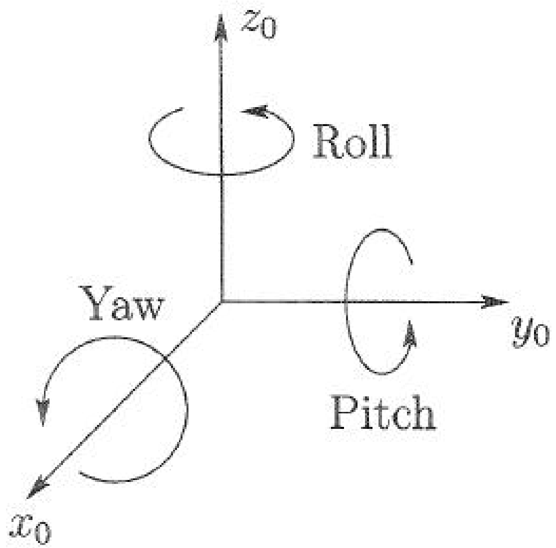
ÂNGULOS DE EULER-ZYZ



$$R_{ZYZ} = R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta C_\psi - S_\phi S_\psi & -C_\phi C_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta \\ S_\phi C_\theta C_\psi + C_\phi S_\psi & -S_\phi C_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta \\ -S_\theta C_\psi & S_\theta S_\psi & C_\theta \end{bmatrix}$$

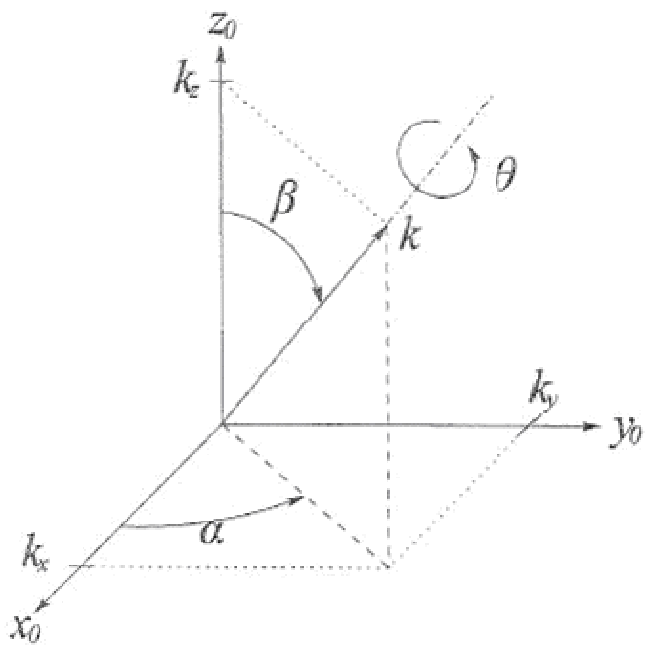
ÂNGULOS ROLL, PITCH, YAW



$$R = R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{x,\psi} = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi & c_\psi \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & -s_\phi c_\psi + c_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi \\ s_\phi c_\theta & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & -c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & c_\phi s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix}$$

REPRESENTAÇÃO EIXO / ÂNGULO



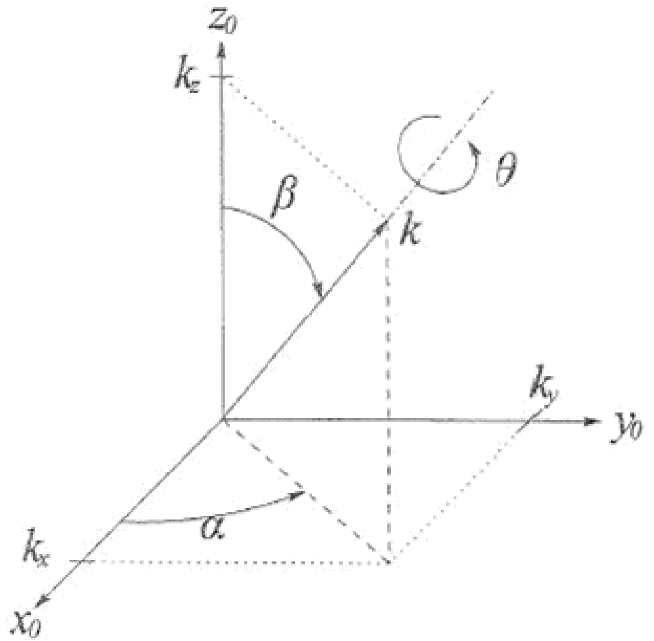
Vector em torno do qual se faz a rotação θ: $k = [\ k_x \quad k_y \quad k_z\ ]$

Matriz de rotação que coloca o eixo *z* em *k*: $R = R_{z,\alpha}\, R_{y,\beta}$

Teremos então: $R_{z,\theta} = R^{-1} R_{k,\theta}\, R \;\Leftrightarrow\; R_{k,\theta} = R\; R_{z,\theta}\, R^{-1}$

$$\Leftrightarrow\; R_{k,\theta} = R_{z,\alpha} R_{y,\beta}\; R_{z,\theta}\, R_{y,-\beta} R_{z,-\alpha}$$

REPRESENTAÇÃO EIXO / ÂNGULO



Vector em torno do qual se faz a rotação θ: $k = [\, k_x \quad k_y \quad k_z \,]^T$

$$R_{k,\theta} = \begin{bmatrix} k_x^2 v_\theta + c_\theta & k_x k_y v_\theta - k_z s_\theta & k_x k_z v_\theta + k_y s_\theta \\ k_x k_y v_\theta + k_z s_\theta & k_y^2 v_\theta + c_\theta & k_y k_z v_\theta - k_x s_\theta \\ k_x k_z v_\theta - k_y s_\theta & k_y k_z v_\theta + k_x s_\theta & k_z^2 v_\theta + c_\theta \end{bmatrix}$$, sendo $v_\theta = 1 - c_\theta$

REPRESENTAÇÃO EIXO / ÂNGULO

A representação não é única: $R_{k,\theta} = R_{-k,-\theta}$

Para uma matriz de rotação genérica R, teremos:

$$\Theta = \cos^{-1}\left(\frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2}\right) \quad \text{e} \quad k = \frac{1}{2\sin\Theta}\begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix}$$

Pode-se representar através de um único vector não unitário:

$$r = [\ \Theta\, k_x \quad \Theta\, k_y \quad \Theta\, k_z\ ]^T$$

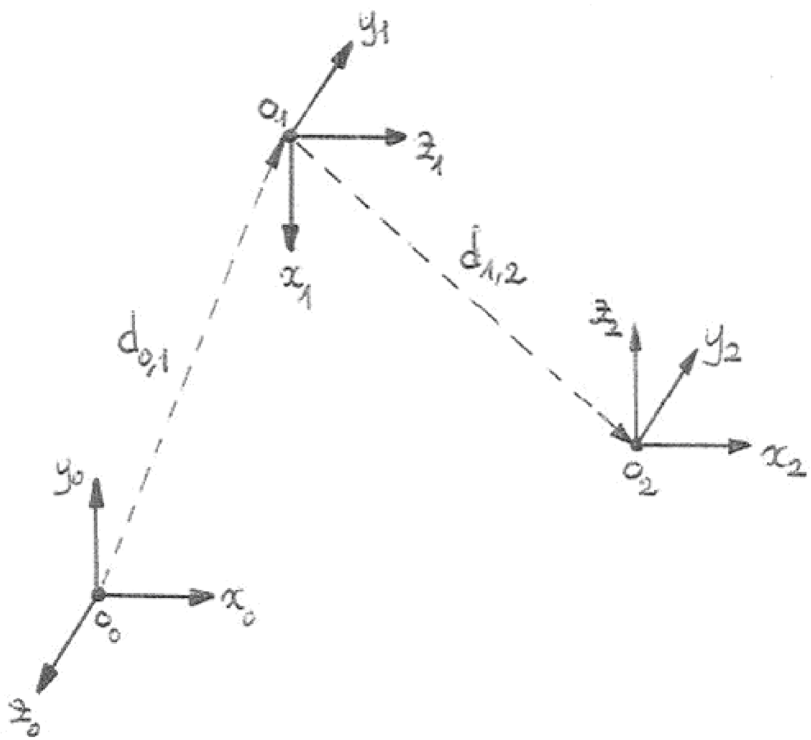
MOVIMENTAÇÃO DE CORPOS RÍGIDOS

O movimento de um corpo rígido é composto por uma translação e uma rotação.

Ou seja é um par (d,R) com $d \in \mathbb{R}^3$ e $R \in SO(n)$

Grupo especial Euclidiano $SE(3) = \mathbb{R}^3 \times SO(3)$

MOVIMENTAÇÃO DE CORPOS RÍGIDOS



Temos: $p^0 = R_1^0 p^1 + d_{0.1}^0$ e $p^1 = R_2^1 p^2 + d_{1.2}^1$

Por outro lado: $p^0 = R_2^0 p^2 + d_{0.2}^0$

Manipulando as equações: $p^0 = R_1^0 R_2^1 p^2 + R_1^0 d_{1.2}^1 + d_{0.1}^0$

TRANSFORMAÇÕES HOMOGÉNEAS

Temos: $p^0 = R_1^0 R_2^1 p^2 + R_1^0 d_{1.2}^1 + d_{0.1}^0$

Note-se que: $\begin{bmatrix} R_1^0 & d_{0.1}^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2^1 & d_{1.2}^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^0 R_2^1 & R_1^0 d_{1.2}^1 + d_{0.1}^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

Ou seja o movimento (d,R) de um corpo pode ser representado por uma matriz na forma:

$$H = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sendo R uma matriz ortogonal, teremos: $H^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

TRANSFORMAÇÕES HOMOGÉNEAS

Sejam os vectores:

$$P^0 = \begin{bmatrix} p^0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \text{e} \qquad P^1 = \begin{bmatrix} p^1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

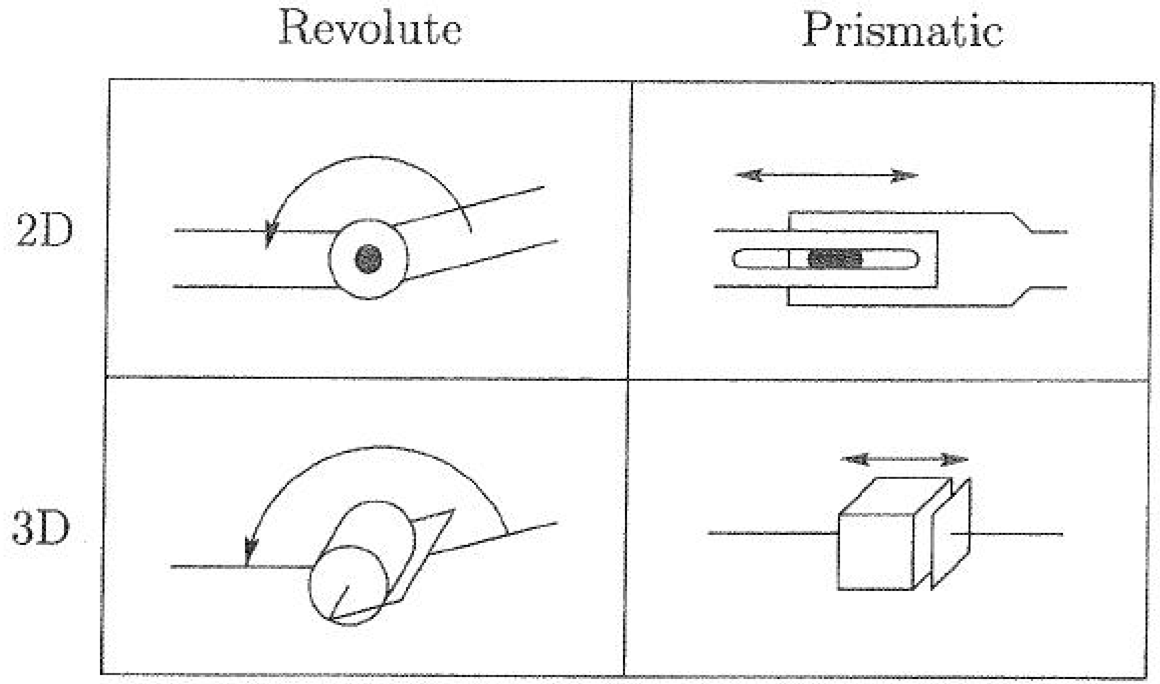
Então teremos:

$$P^0 = H_1^0 \, P^1$$

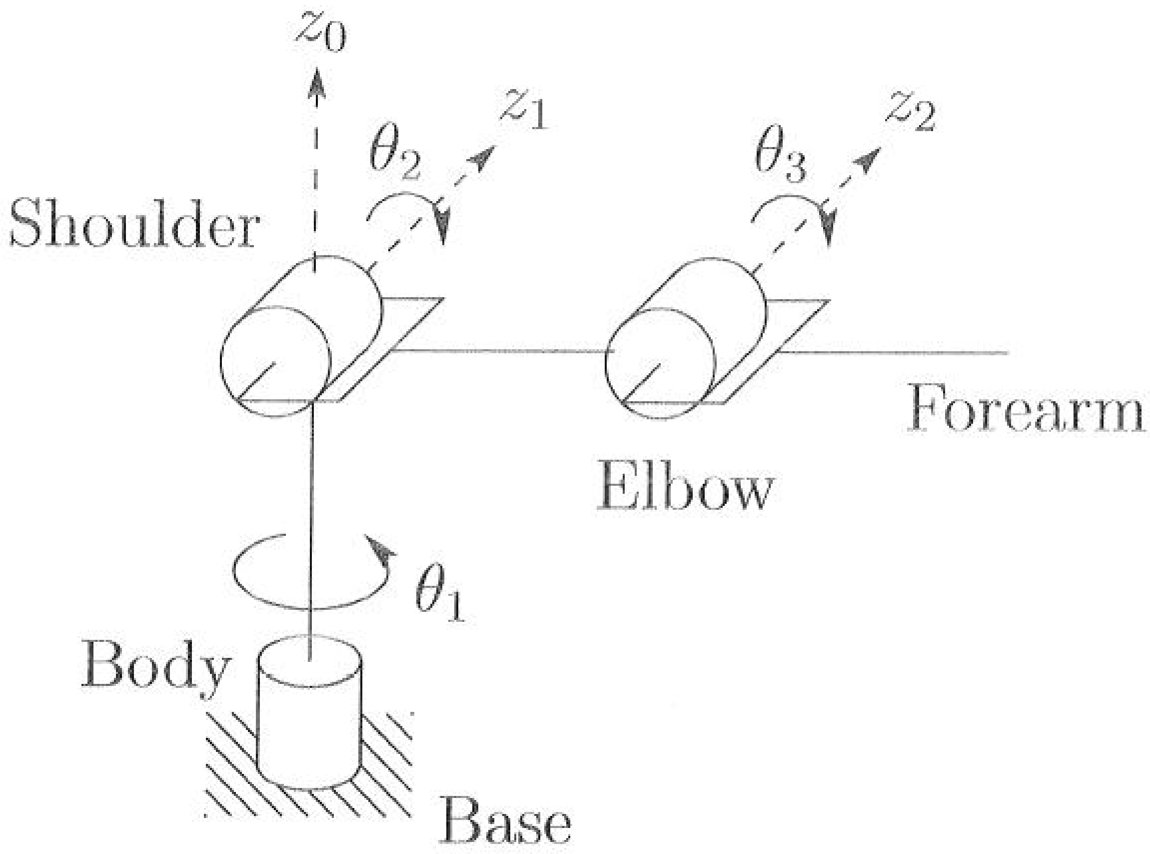
Uma matriz relativa a uma sequência de movimentos goza das mesmas propriedades das matrizes de rotação.

MANIPULADORES ROBÓTICOS

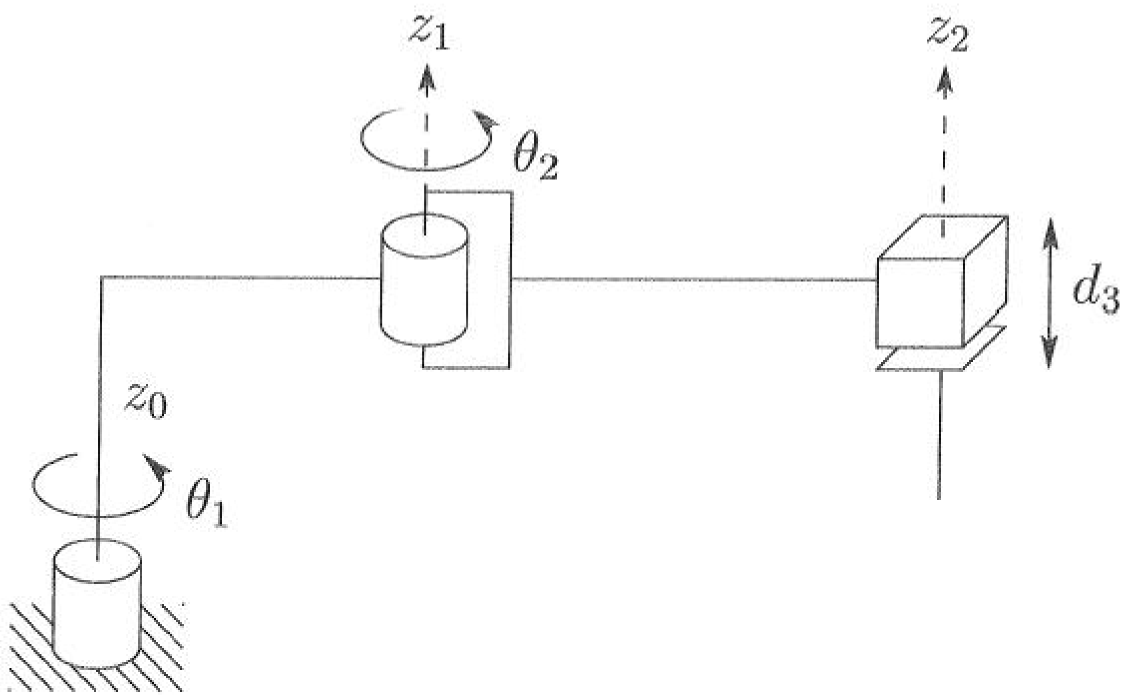
Representação simbólica dos segmentos e articulações



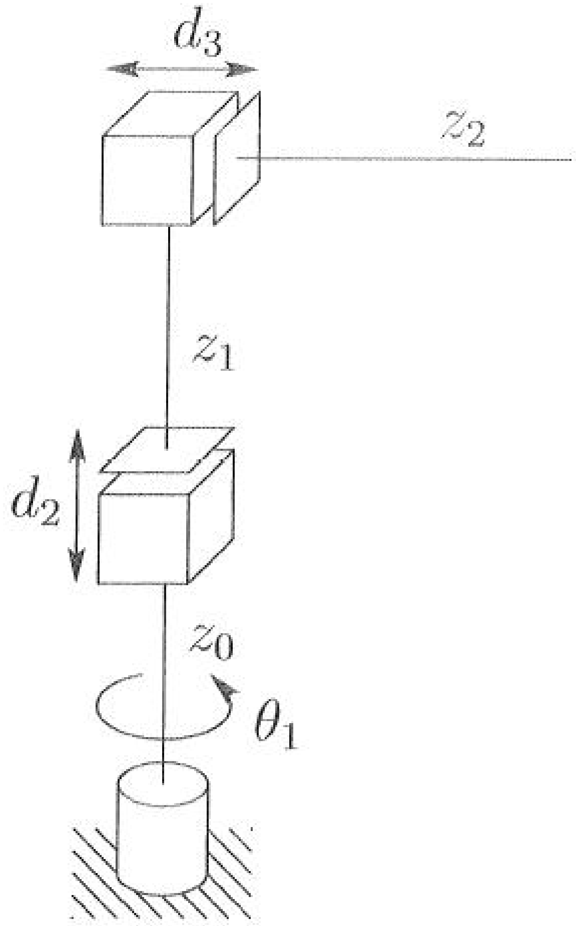
MANIPULADOR ANTROPOMÓRFICO (RRR)



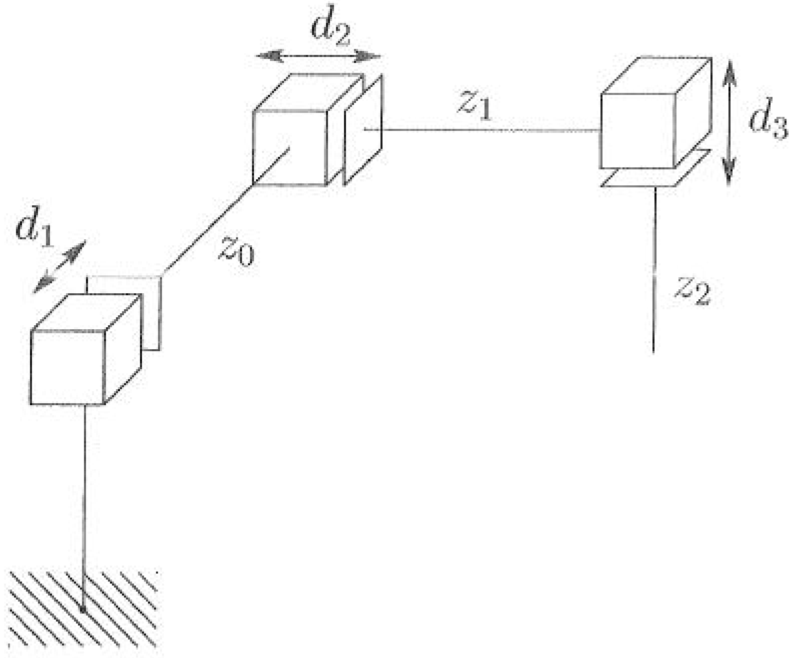
MANIPULADOR ESFÉRICO (RRP)



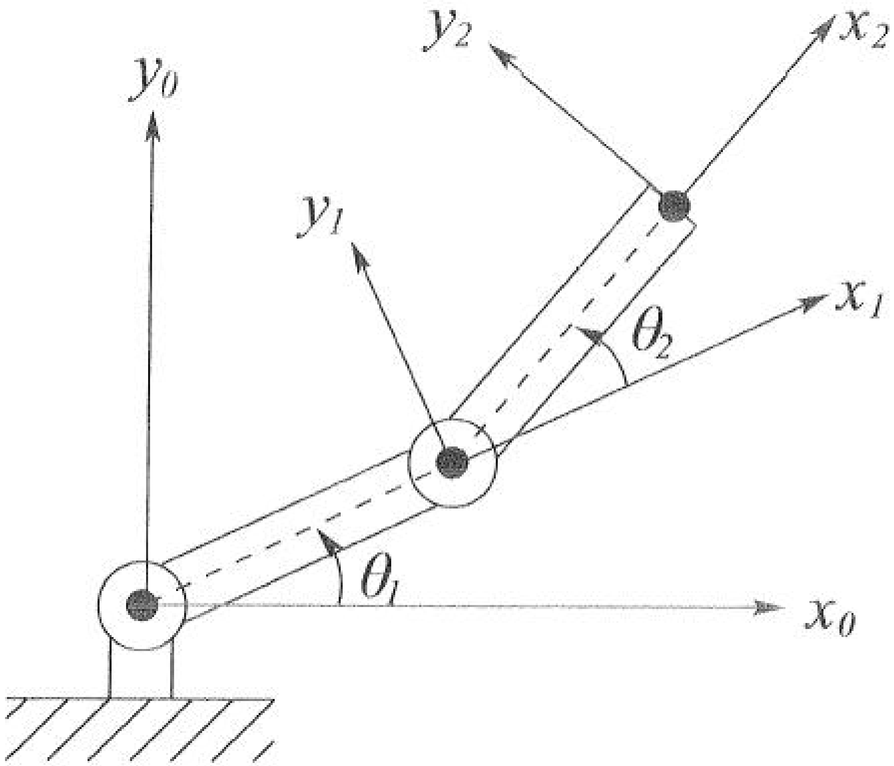
MANIPULADOR CILINDRICO (RPP)



MANIPULADOR CARTESIANO (PPP)

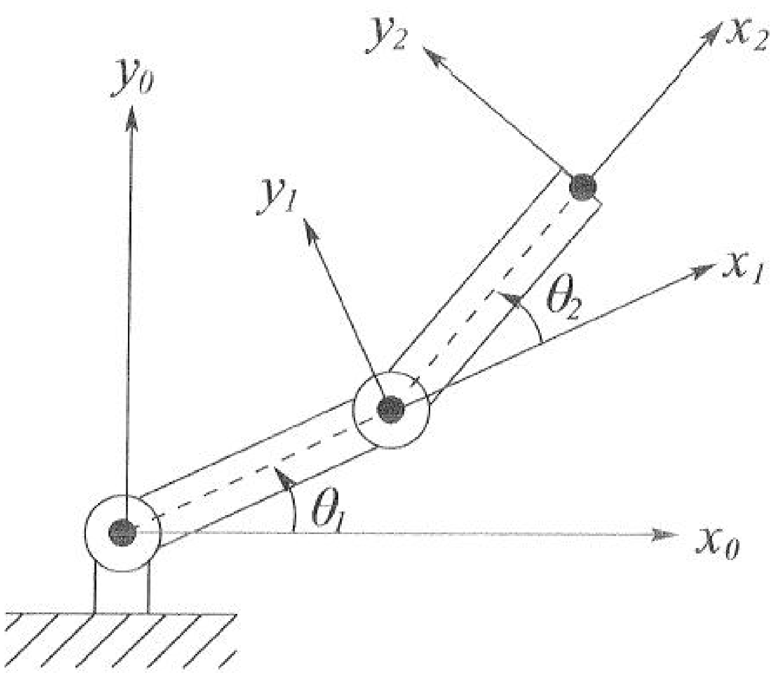


CINEMÁTICA DIRECTA



Permite o cálculo das coordenadas e orientação da extremidade do manipulador a partir do valor de cada articulação.

MANIPULADOR PLANAR DE 2 ARTICULAÇÕES



Posição da extremidade: $x = a_1\cos(\theta_1) + a_2\cos(\theta_1+\theta_2)$

$y = a_1\sin(\theta_1) + a_2\sin(\theta_1+\theta_2)$

Orientação da extremidade: $R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2) & -\sin(\theta_1+\theta_2) \\ \sin(\theta_1+\theta_2) & \cos(\theta_1+\theta_2) \end{bmatrix}$

CONVENÇÕES

1 – n articulações (1,2,…,n) e n+1 segmentos (0,1,…,n)

2 – a articulação *i* liga o segmento *i-1* ao segmento *i*

3 – quando se actua na articulação *i* o segmento *i* move-se

4 – o segmento *0* (base) é fixo e não se move

5 – cada articulação é caracterizada por um valor:

$$q_i = \begin{cases} \theta - & \text{rotativa} \\ d - & \text{prismática} \end{cases}$$

6 – o referencial $o_i x_i y_i z_i$ está ligado ao segmento *i*

CINEMÁTICA DIRECTA

Seja

$$A_i = A_i(q_i)$$

as matrizes correspondentes às transformações homogéneas que relacionam os referenciais $o_i x_i y_i z_i$ com os referenciais $o_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$, então:

$$T_j^i = A_{i+1}\, A_{i+2} \,.\,.\,.\, A_{j-1} A_j, \quad \text{para } i < j$$

relaciona o referencial $o_j x_j y_j z_j$ com o referencial $o_i x_i y_i z_i$.

MÉTODO DH (Denavit-Hartenberg)

- Qualquer transformação homogénea pode ser representada por 6 números: 3 para a rotação e 3 para a translação.
- O método DH reduz o número mínimo para 4 através de uma escolha apropriada dos referenciais.
- No método DH cada transformação homogénea tem a forma:

$$A_i = Rot_{z,\theta_i}\, Trans_{z,d_i}\, Trans_{x,a_i}\, Rot_{x,\alpha_i}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

MÉTODO DH

Resulta:

$$A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i\ C\alpha_i & S\theta_i\ S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i\ C\alpha_i & -C\theta_i\ S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

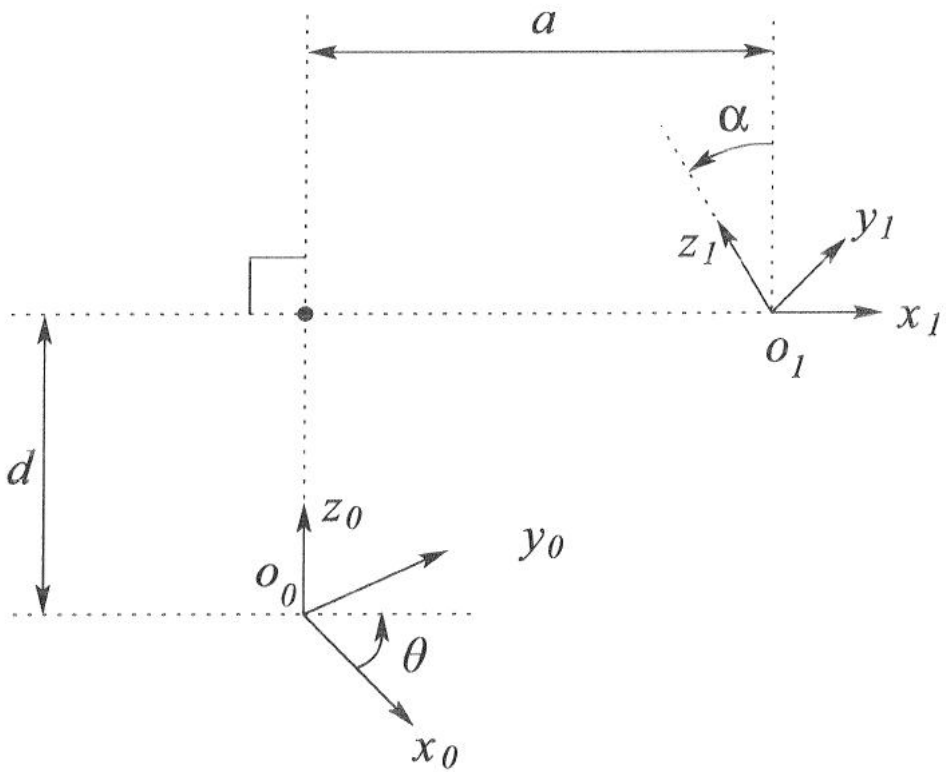
a_i = comprimento do segmento (distância entre o_i e z_{i-1})

α_i = torção do segmento (ângulo entre z_i e z_{i-1})

d_i = desvio do segmento (distância entre x_i e o_{i-1})

θ_i = ângulo da articulação (ângulo entre x_i e x_{i-1})

MÉTODO DH



DH1: x_1 deve ser perpendicular a z_0

DH2: x_1 deve intersectar z_0

DH – ATRIBUIÇÃO DOS REFERENCIAIS

1 – atribuir o eixo z_i como sendo o eixo de actuação da articulação i+1.

2 – escolher x_0 e y_0 pela regra da mão direita.

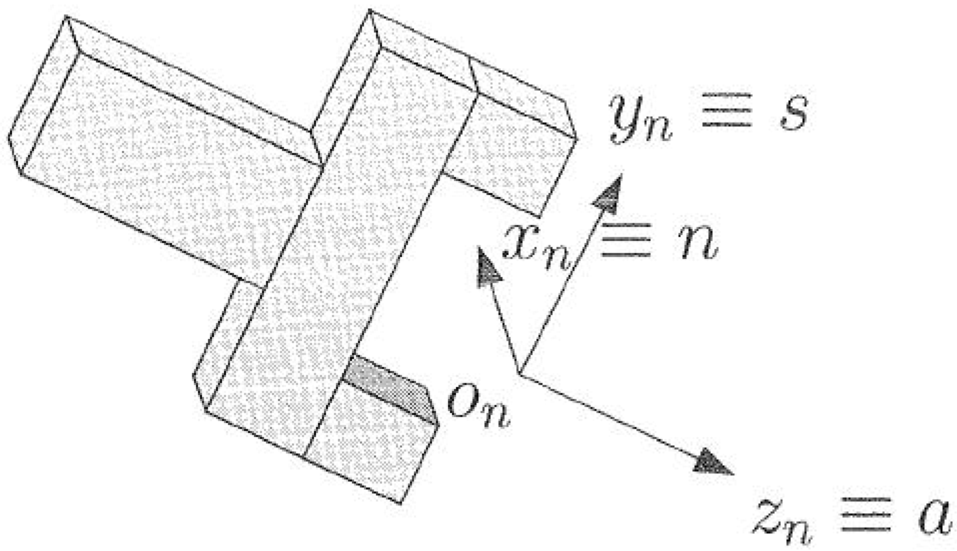
3 – iterativamente escolher $o_i x_i y_i z_i$ em função de $o_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ conforme os casos seguintes:

a) z_i e z_{i-1} não estão no mesmo plano: então existe um linha perpendicular a ambos que liga os dois pela menor distância. Esta linha define o eixo x_i e o ponto onde intersecta z_i a origem o_i. Escolhe-se y_i pela regra da mão direita.

b) z_i e z_{i-1} são paralelos: escolhe-se a linha perpendicular a ambos que passe por o_{i-1}.

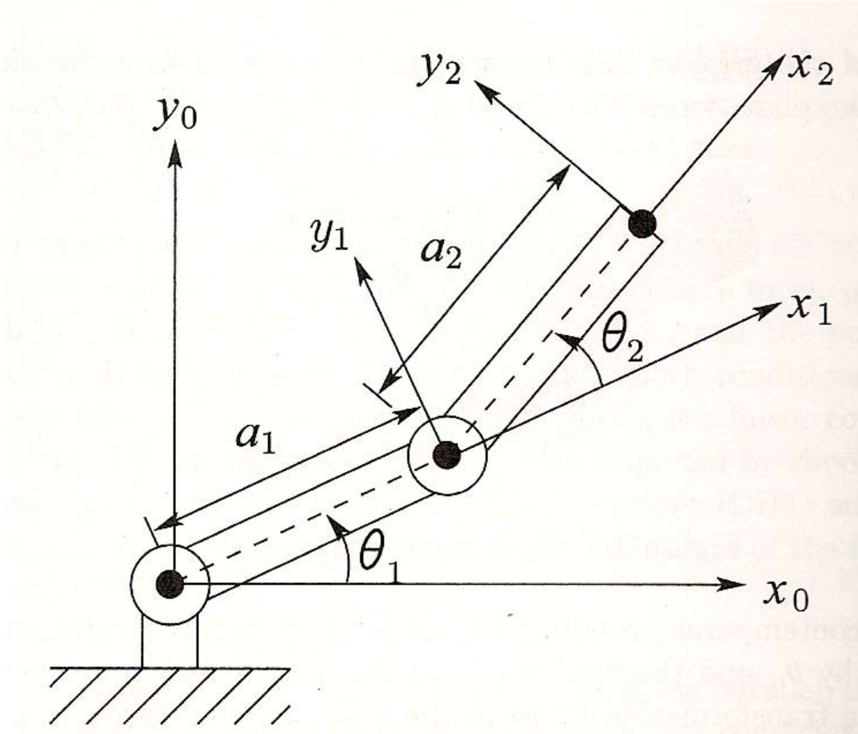
c) z_i intersecta z_{i-1}: o eixo x_i é escolhido de forma a ser perpendicular ao plano formado por z_i e z_{i-1}. O sentido positivo é arbitrário. A escolha para a origem o_i é o ponto de intersecção entre z_i e z_{i-1}.

FERRAMENTA



- $o_n x_n y_n z_n$ - referencial da ferramenta
- o_n – centro da ferramenta colocado no meio dos dedos
- sentidos: a = aproximação, s = deslizamento, n = normal
- normalmente z_n coincide com z_{n-1}

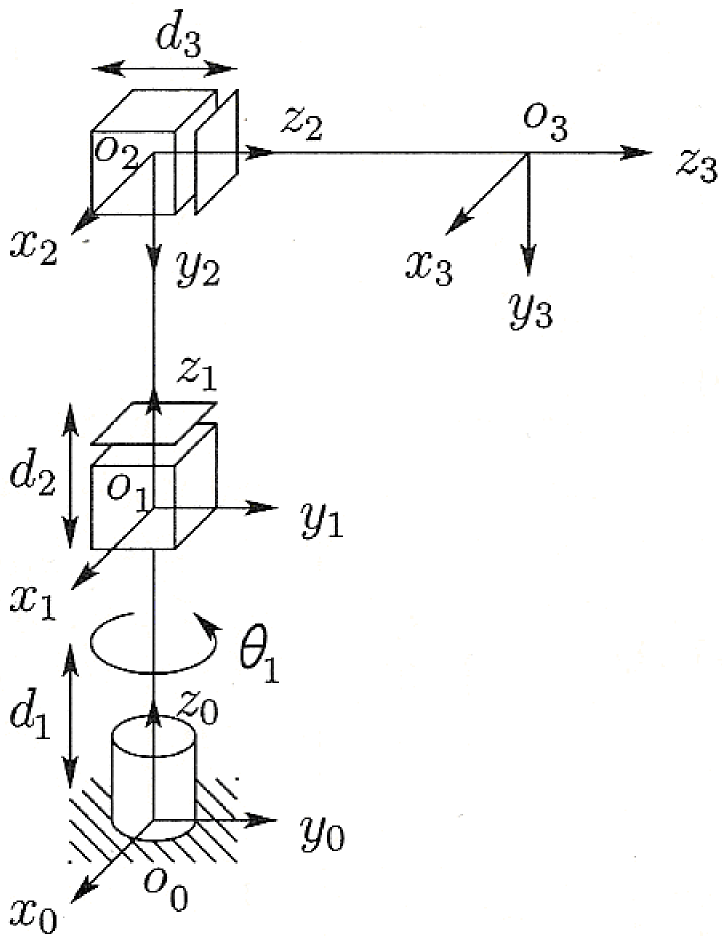
MÉTODO DH: EXEMPLO A 2D



Segmento i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	0	0	θ_1^*
2	a_2	0	0	θ_2^*

* - variáveis

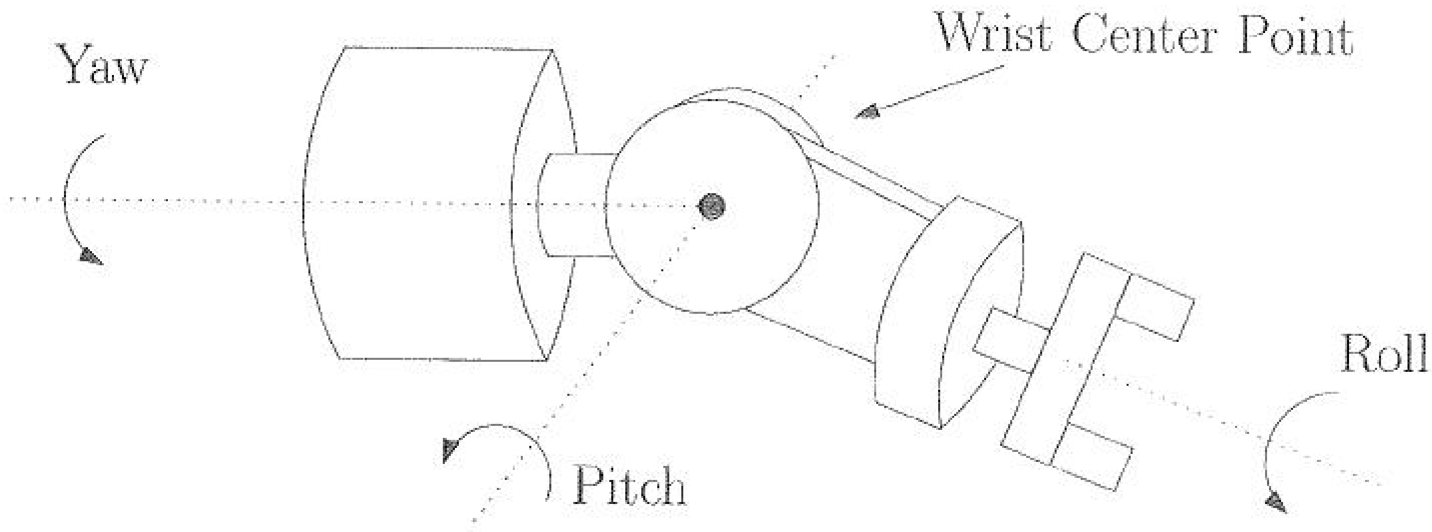
EXEMPLO: MANIPULADOR CILINDRICO



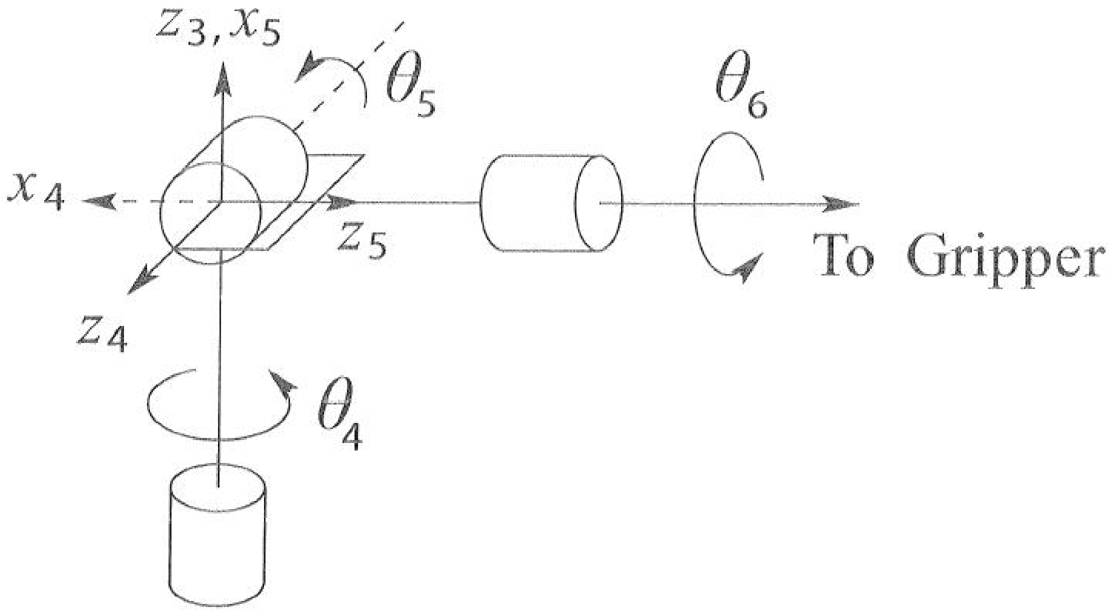
Segmento i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	θ_1^*
2	0	-90º	d_2^*	0
3	0	0	d_3^*	0

* - variáveis

PUNHO ESFÉRICO



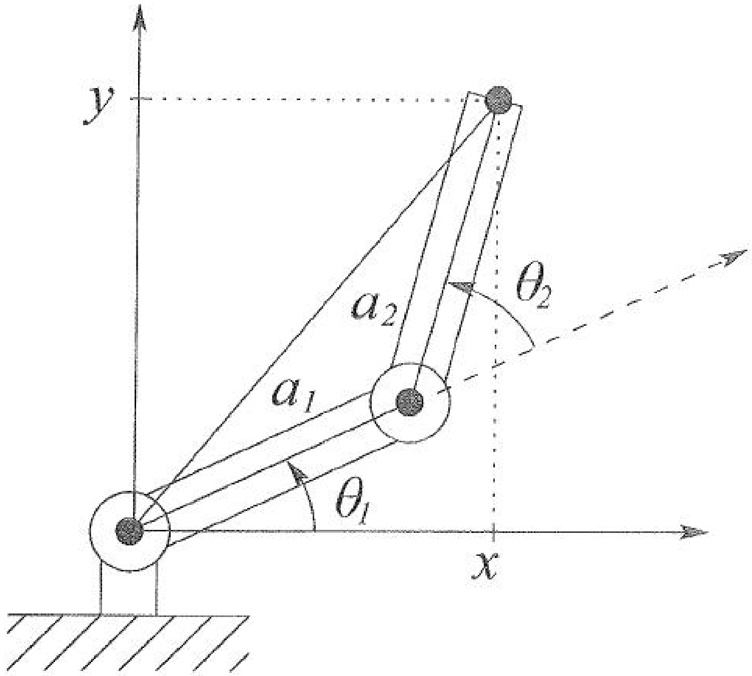
MÉTODO DH PARA O PUNHO ESFÉRICO



Segmento i	a_i	α_i	d_i	θ_i
4	0	-90º	0	θ_4^*
5	0	90º	0	θ_5^*
6	0	0	d_6	θ_6^*

* - variáveis

CINEMÁTICA INVERSA

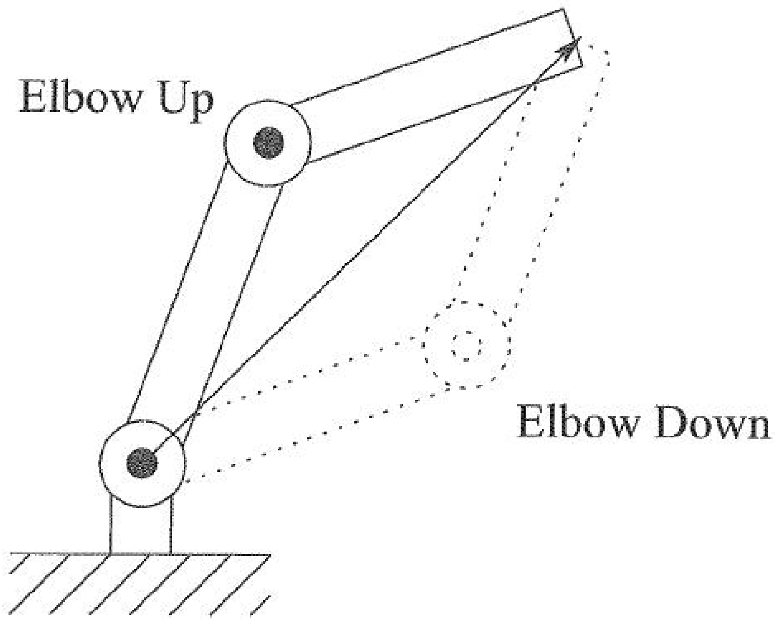


$$\cos\theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\frac{y}{x} - \tan^{-1}\frac{a_2\sin\theta_2}{a_1 + a_2\cos\theta_2}$$

CINEMÁTICA INVERSA

Outra solução:



$$\theta_2^* = -\theta_2$$

$$\theta_1^* = \tan^{-1}\frac{y}{x} - \tan^{-1}\frac{a_2 \sin\theta_2^*}{a_1 + a_2\cos\theta_2^*}$$

CINEMÁTICA INVERSA – CASO GERAL

Dada a transformação homogénea:

$$H = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Encontrar-se a solução:

$$T_n^0(q_1, q_2, \ldots, q_n) = H$$

Em que:

$$T_n^0(q_1, q_2, \ldots, q_n) = A_1(q_1)A_2(q_2)\ .\ .\ .\ A_n(q_n)$$

CINEMÁTICA INVERSA – CASO GERAL

Da expressão:

$$T_n^0(q_1, q_2, \ldots, q_n) = H$$

Resultam12 equações com n incógnitas:

$$T_{ij}(q_1, q_2, \ldots, q_n) = h_{ij} \qquad i = 1,2,3 \quad j = 1,2,3,4$$

CINEMÁTICA INVERSA – SOLUÇÕES

- A cinemática directa tem sempre uma solução única enquanto a cinemática inversa pode ter ou não solução e não ser única.

- São preferíveis formas fechadas do tipo:

  - $q_k = f_k(h_{12}, h_{12}, . . ., h_{33})$, $k = 1, 2, ..., n$

  pois permitem ter-se uma solução rápida e no caso de múltiplas soluções permitem a escolha de uma delas.

- A existência de solução pode depender de considerações matemáticas e de construção (as articulações rotativas nem sempre rodam 360º)

CINEMÁTICA INVERSA – DESACOPLAMENTO

O problema geral é muito difícil mas para manipuladores com 6 eixos. Com pelo menos 3 eixos intersectando-se num ponto (o punho), é possível desacoplar-se o problema em dois mais simples:

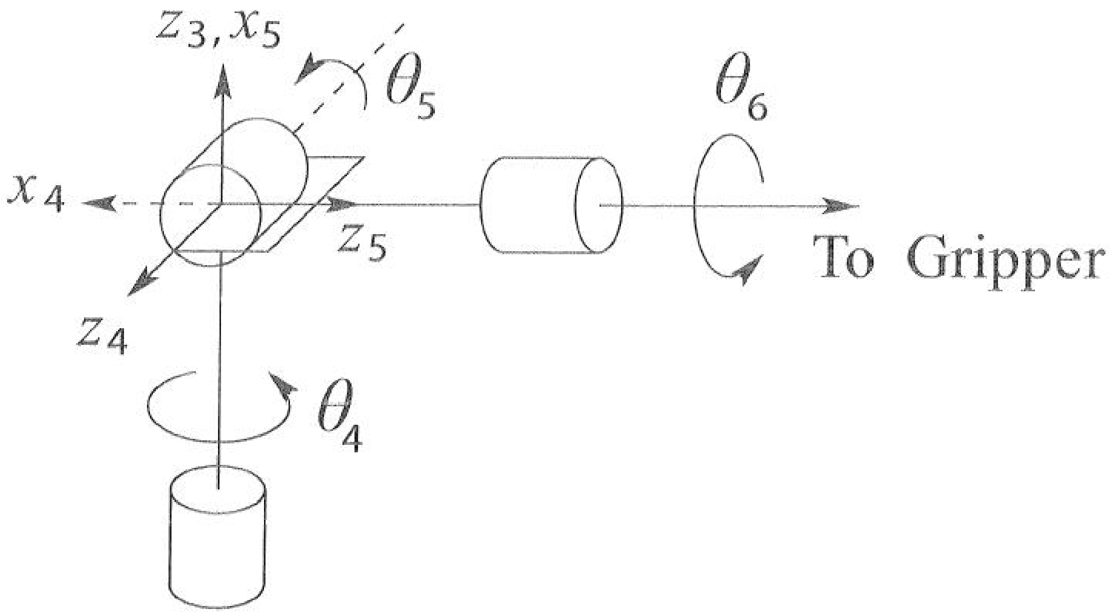
- cinemática inversa da posição do ponto central do punho.

$$o_6^0\,(q_1, q_2, q_3) = o$$

- cinemática inversa da orientação do punho.

$$R_6^3\,(q_4, q_5, q_6) = (R_3^0)^T R, \text{ sendo } R = R_6^0$$

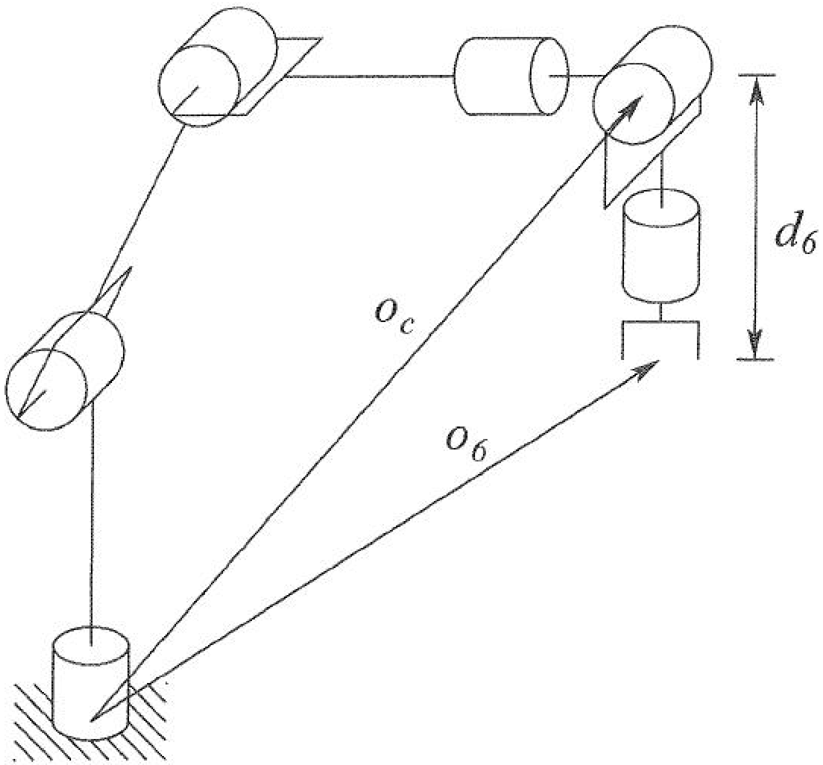
CINEMÁTICA INVERSA – DESACOPLAMENTO



- Sendo o_c o ponto de intersecção das 3 últimas articulações (z_3, z_4 e z_5), as origens o_4 e o_5 estarão sempre no ponto central do punho (o_c).

- Os movimentos dos 3 últimos segmentos não afectam a posição o_c.

CINEMÁTICA INVERSA – DESACOPLAMENTO



Correspondendo a última coluna de R às coordenadas de z_6 no referencial de base, teremos:

$$o = o_c^0 + d_6 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

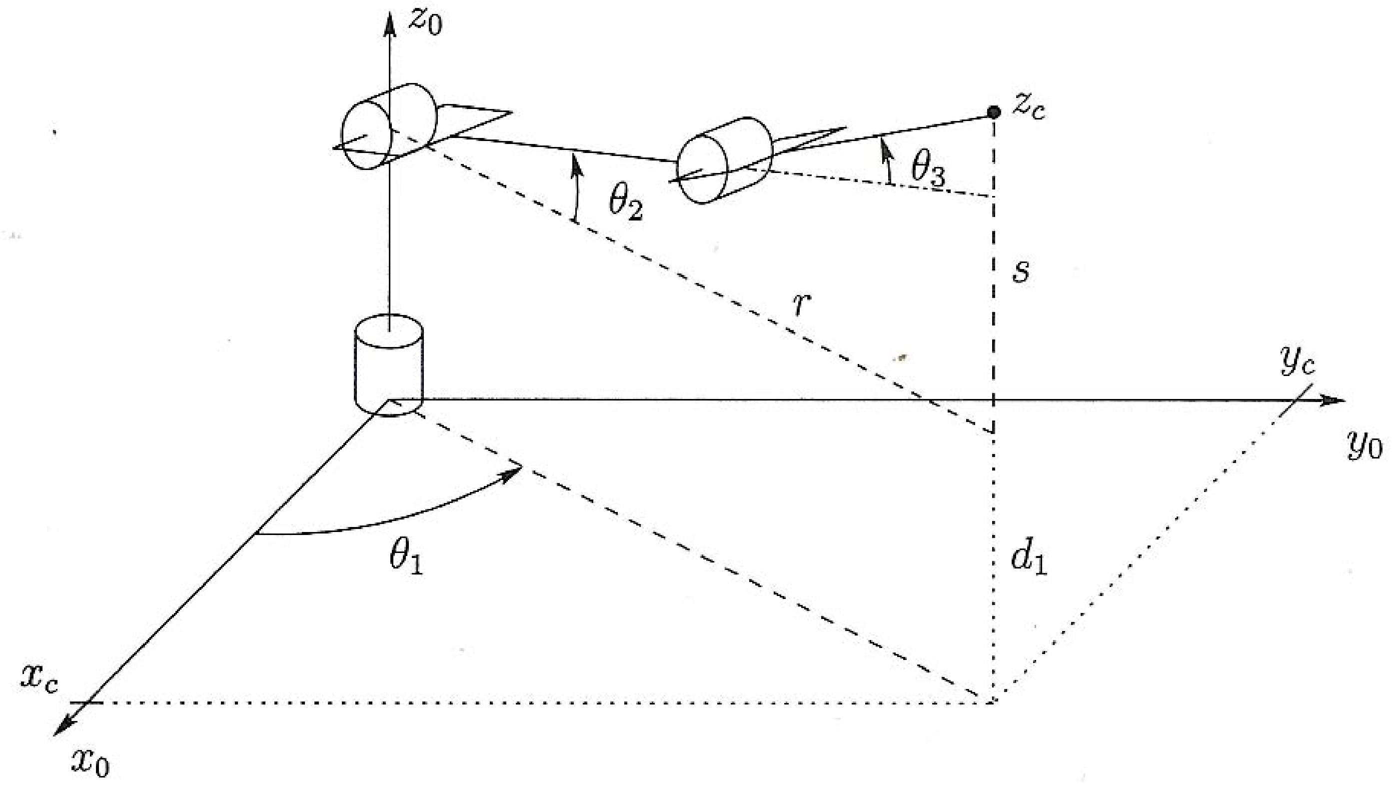
ou seja:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_x - d_6 r_{13} \\ o_y - d_6 r_{23} \\ o_z - d_6 r_{33} \end{bmatrix}$$

que depende apenas das 3 primeiras articulações e determina R_3^0, sendo:

$$R_6^3 = (R_3^0)^T R$$

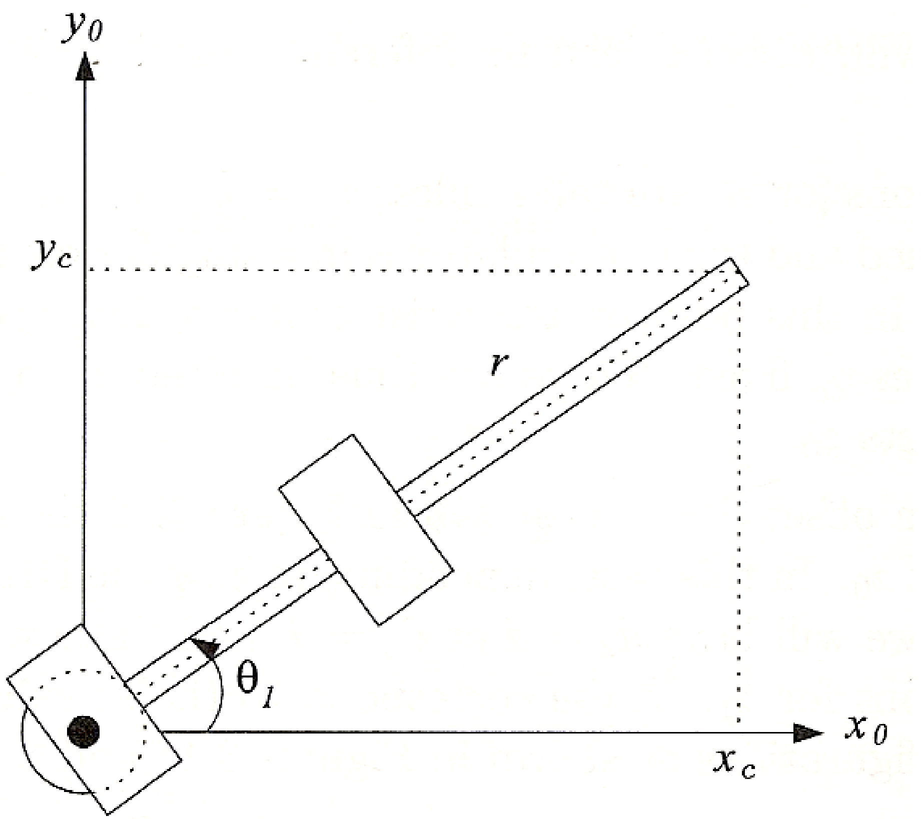
CINEMÁTICA INVERSA – Aprox. Geométrica



Para se encontrar a variável q_i projecta-se o manipulador no plano formado por x_{i-1}- y_{i-1}.

CINEMÁTICA INVERSA – Aprox. Geométrica

Projecção no plano formado por x_0-y_0.

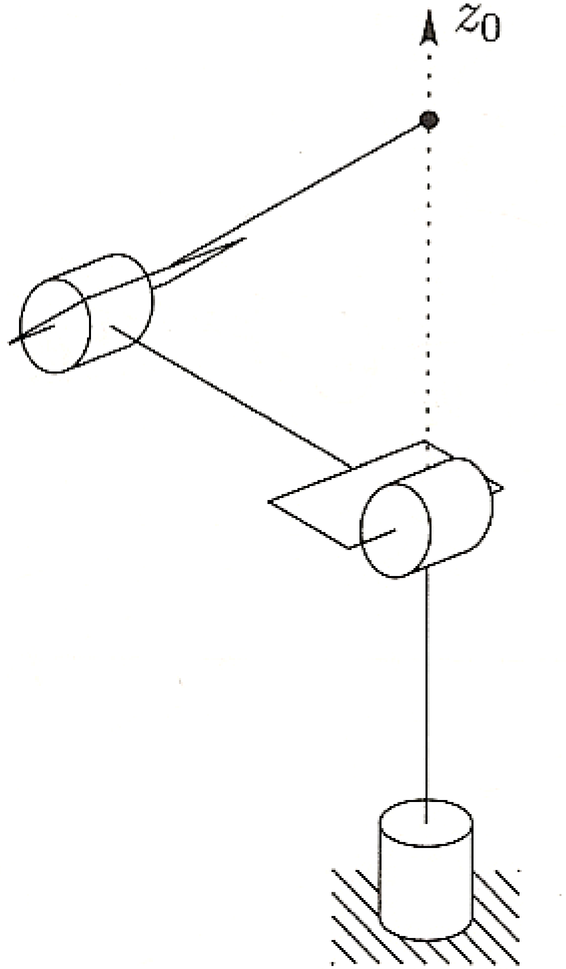


Soluções:

$$\theta_1 = \mathrm{Atan2}(x_c, y_c) \quad \text{ou} \quad \theta_1 = \pi + \mathrm{Atan2}(x_c, y_c)$$

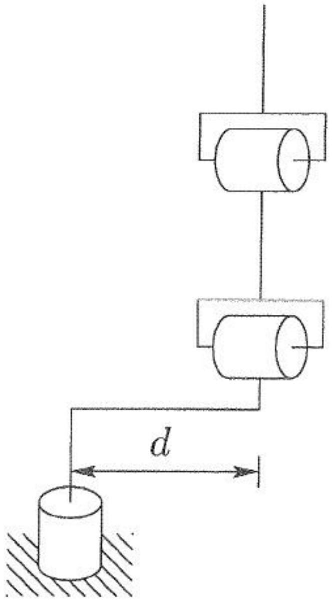
CINEMÁTICA INVERSA – Aprox. Geométrica

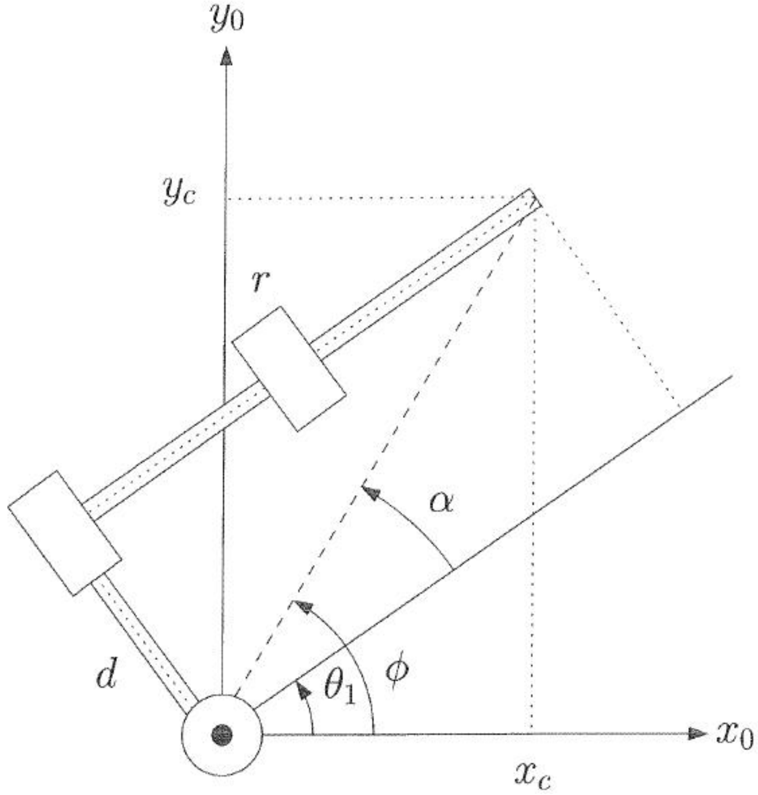
Problema quando o centro do punho está no eixo z_0



CINEMÁTICA INVERSA – Aprox. Geométrica

Configuração com desvio no ombro (configuração braço esquerdo)

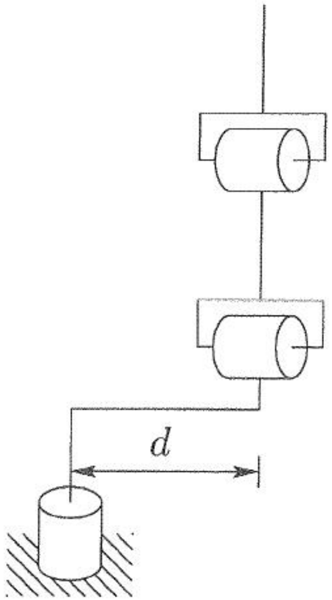


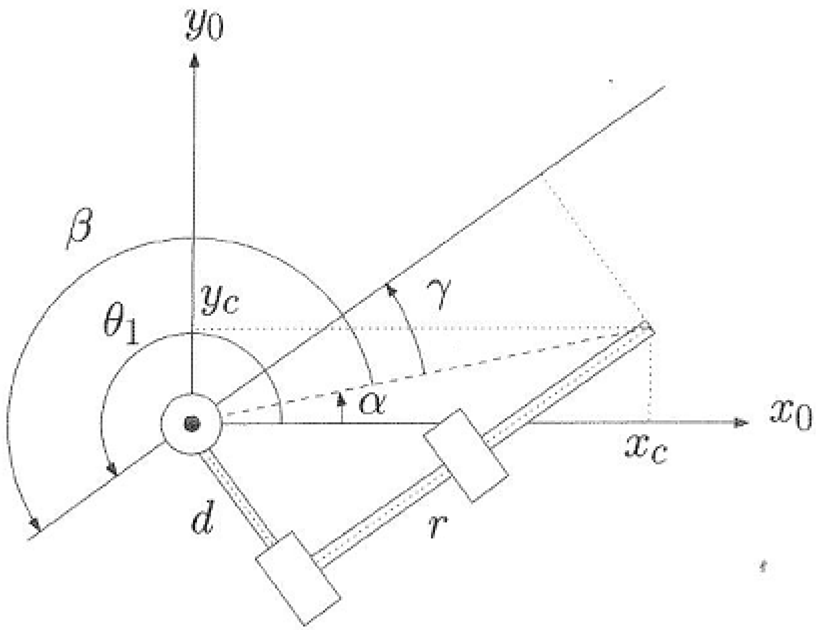


$\theta_1 = \Phi - \alpha$, $\Phi = \text{Atan2}(x_c, y_c)$, $\alpha = \text{Atan2}(r,d) = \text{Atan2}(\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d^2}, d)$

CINEMÁTICA INVERSA – Aprox. Geométrica

Configuração com desvio no ombro (configuração braço direito)





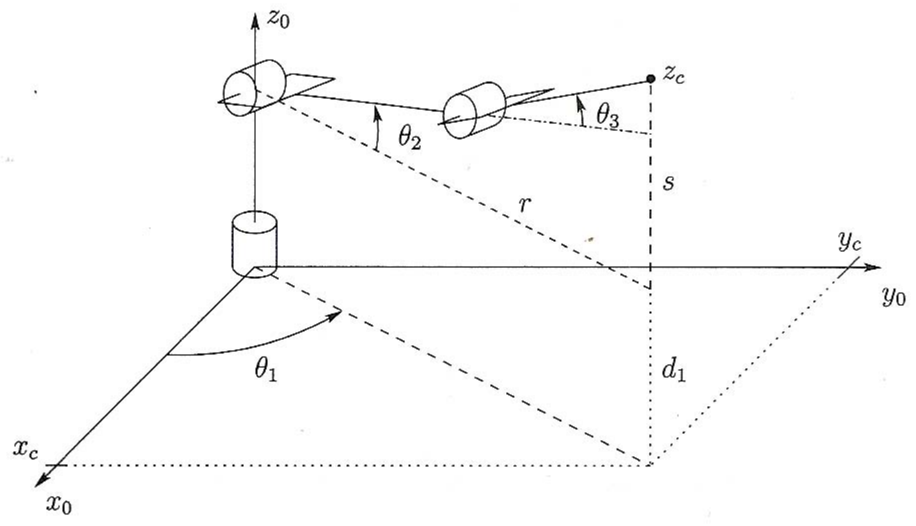
$\theta_1 = \alpha + \beta$

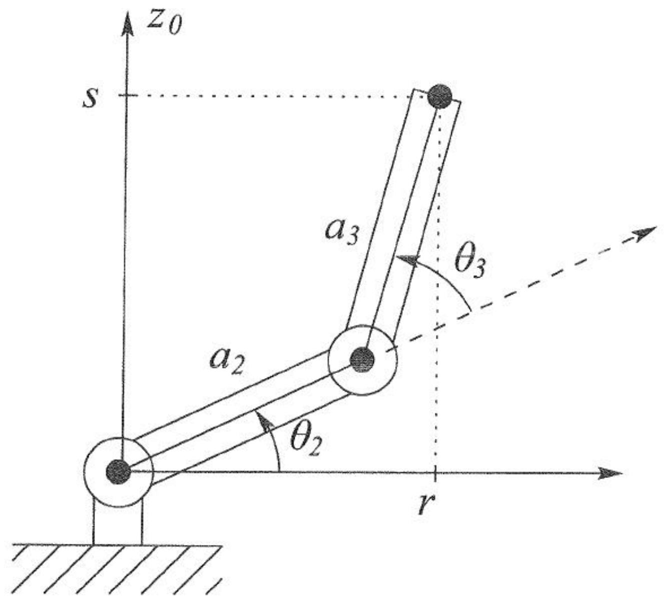
$\alpha = \mathrm{Atan2}(x_c, y_c)$,

$\beta = \gamma + \pi$, sendo $\gamma = \mathrm{Atan2}(r,d) = \mathrm{Atan2}(\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d^2}, d)$

CINEMÁTICA INVERSA – Aprox. Geométrica

Cálculo de θ₃

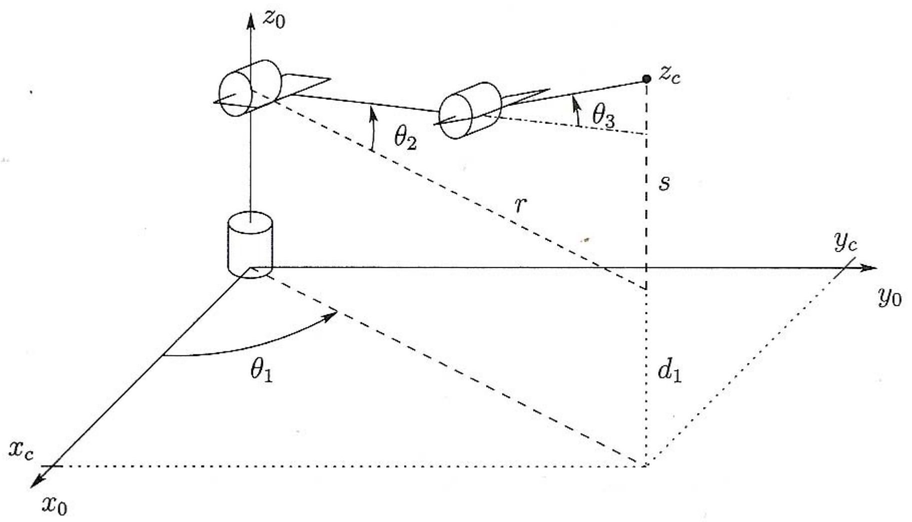


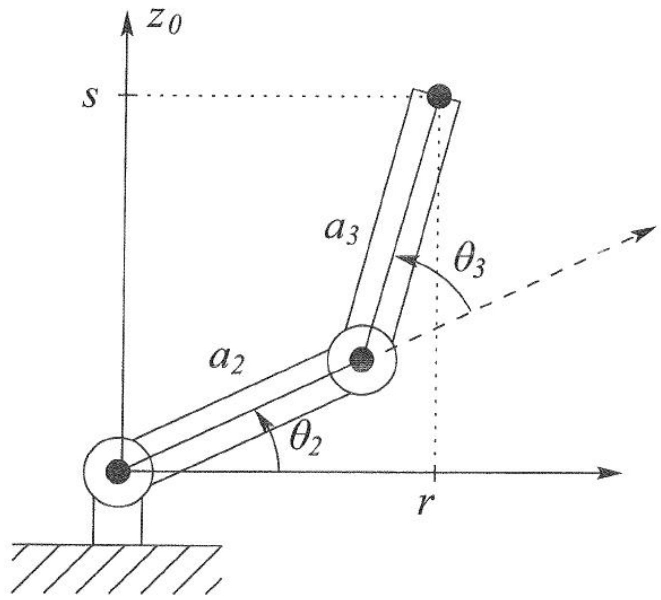


$$\cos\theta_3 = \frac{r^2 + s^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}$$,sendo $r^2 = x_c^2 + y_c^2 - d^2$ e $s = z_c - d_1$

CINEMÁTICA INVERSA – Aprox. Geométrica

Cálculo de θ_2

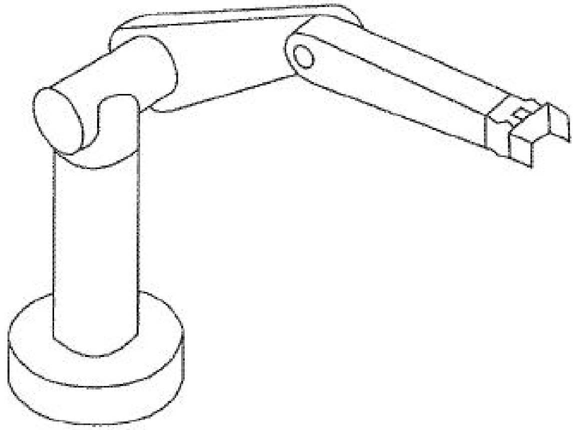




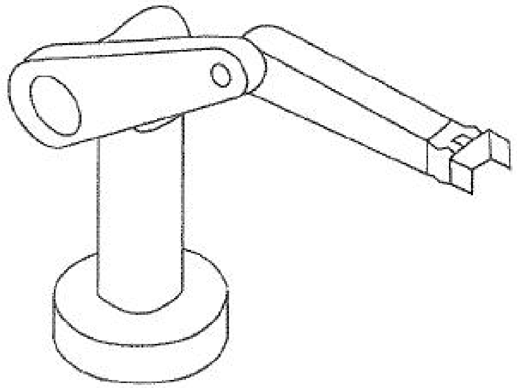
θ_2 = Atan2(r,s) - Atan2(a_2+$a_3$cosθ_3, $a_3$sinθ_3)

CINEMÁTICA INVERSA – Aprox. Geométrica

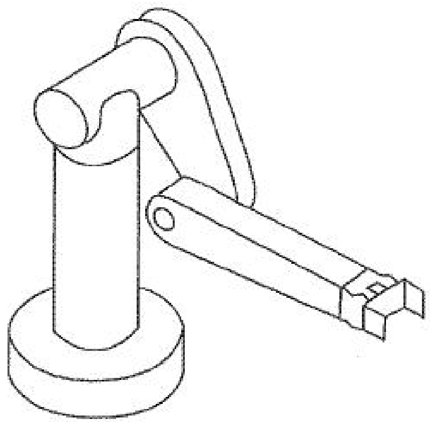
Resultam 4 soluções possíveis

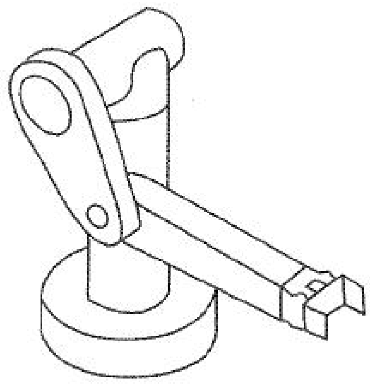


Left Arm Elbow Up

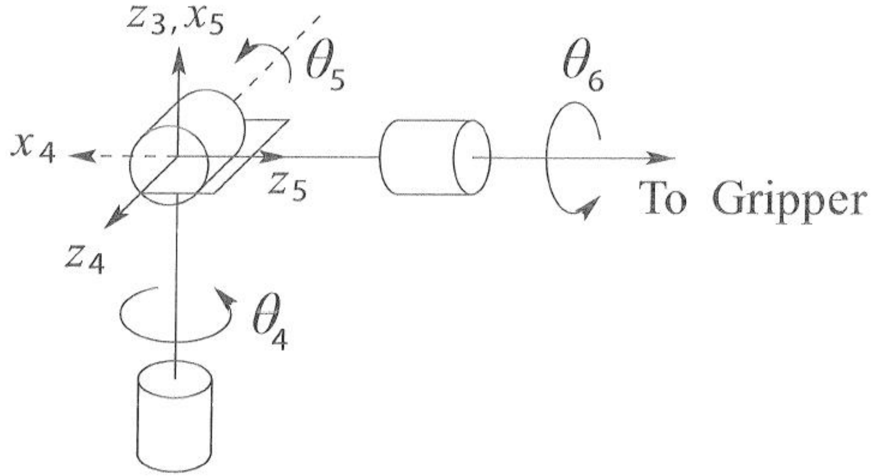


Right Arm Elbow Up





CINEMÁTICA INVERSA – (orientação)



$$T_6^3 = A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} R_6^3 & o_6^3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4c_5s_6 - s_4c_6 & c_4s_5 & c_4s_5d_6 \\ s_4c_5c_6 + c_4s_6 & -s_4c_5s_6 + c_4c_6 & s_4s_5 & s_4s_5d_6 \\ -s_5c_6 & s_5s_6 & c_5 & c_5d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Euler: } R_{ZYZ} = R_{z,\Phi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} C\phi\, C\theta\, C\psi - S\phi\, S\psi & -C\phi\, C\theta\, S\psi - S\phi\, C\psi & C\phi\, S\theta \\ S\phi\, C\theta\, C\psi + C\phi\, S\psi & -S\phi\, C\theta\, S\psi + C\phi\, C\psi & S\phi\, S\theta \\ -S\theta\, C\psi & S\theta\, S\psi & C\theta \end{bmatrix}$$

CASO 1: r_{13} e r_{23} não são ambos nulos ($s_\theta \neq 0$)

$$R = \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta C_\psi - S_\phi S_\psi & -C_\phi C_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta \\ S_\phi C_\theta C_\psi + C_\phi S_\psi & -S_\phi C_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta \\ -S_\theta C_\psi & S_\theta S_\psi & C_\theta \end{bmatrix}$$

$c_\theta = r_{33}$ e $s_\theta = \sqrt{1 - r_{33}^2}$

$\theta = \text{Atan2}(r_{33}, \sqrt{1 - r_{33}^2})$

$\phi = \text{Atan2}(r_{13}, r_{23})$

$\psi = \text{Atan2}(-r_{31}, r_{32})$

$c_\theta = r_{33}$ e $s_\theta = -\sqrt{1 - r_{33}^2}$

$\theta = \text{Atan2}(r_{33}, -\sqrt{1 - r_{33}^2})$

$\phi = \text{Atan2}(-r_{13}, -r_{23})$

$\psi = \text{Atan2}(r_{31}, -r_{32})$

CASO 2: r_{13} e r_{23} são ambos nulos (s_θ=0)

Com $c_\theta = 1$, resulta:

$$R = \begin{bmatrix} c_\phi\, c_\psi - s_\phi\, s_\psi & -c_\phi\, s_\psi - s_\phi\, c_\psi & 0 \\ s_\phi\, c_\psi + c_\phi\, s_\psi & -s_\phi\, s_\psi + c_\phi\, c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\phi+\psi} & -s_{\phi+\psi} & 0 \\ s_{\phi+\psi} & c_{\phi+\psi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ou seja, $\Phi + \Psi = \text{Atan2}(r_{11}, r_{21})$

Com $c_\theta = -1$, resulta:

$$R = \begin{bmatrix} -c_{\phi-\psi} & -s_{\phi-\psi} & 0 \\ s_{\phi-\psi} & c_{\phi-\psi} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

ou seja, $\Phi - \Psi = \text{Atan2}(-r_{11}, r_{21})$

CINEMÁTICA - VELOCIDADE

Matematicamente a cinemática directa define uma função entre o espaço das posições e orientações no sistema de eixos cartesianos e o espaço das posições das articulações do Robô. As relações entre as velocidades são determinadas pelo Jacobiano desta função.

VELOCIDADE ANGULAR – EIXO FIXO

Quando um corpo rígido se move num movimento de rotação em torno de um eixo fixo, cada ponto desse corpo move-se em círculo. Os centros desses círculos localizam-se no eixo de rotação.

Seja θ o ângulo medido na perpendicular ao eixo de rotação que passa num determinado ponto. Se *k* for um vector na direcção do eixo de rotação então a velocidade angular é dada por:

$$w = \dot{\theta}\, K$$

Dada a velocidade angular, a velocidade linear de uma dado ponto é dada por:

$$v = w \times r$$

onde *r* é um vector da origem (no eixo de rotação) para o ponto.

MATRIZES ANTI-SIMÉTRICAS

Uma matriz nxn é anti-simétrica se:

$$S + S^T = 0$$

este grupo de matrizes é denominado por *so(3).*

Pela definição concluímos que são matrizes do tipo:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -s_3 & s_2 \\ s_3 & 0 & -s_1 \\ -s_2 & s_1 & 0 \end{bmatrix}$$

MATRIZES ANTI-SIMÉTRICAS - PROPRIEDADES

Dado um vector

$$a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \text{, define-se } S(a) = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix}$$

Propriedades:

1) $S(\alpha a + \beta b) = \alpha S(a) + \beta S(b)$

2) $S(a)p = a \times p$, para $a, p \in \mathbb{R}^3$

3) $RS(a)R^T = S(Ra)$, para $R \in SO(3)$ e $a \in \mathbb{R}^3$

4) $x^T S x = 0$, para $S \in so(n)$ e $x \in \mathbb{R}^n$

DERIVADA DE UMA MATRIZ DE ROTAÇÃO

Seja $R(\theta) \in SO(3)$, teremos então:

$$R(\theta)R^{T}(\theta) = I$$

Derivando-se ambos os termos:

$$\frac{d}{d\theta}R(\theta)R^{T}(\theta) + R(\theta)\frac{d}{d\theta}R^{T}(\theta) = 0$$

Definindo-se a matriz anti-simétrica, $S = \frac{d}{d\theta}R(\theta)R^{T}(\theta)$, resulta:

$$\frac{d}{d\theta}R(\theta) = SR(\theta)$$

ou seja a derivada de uma matriz de rotação é o produto de uma matriz anti-simétrica por essa matriz de rotação.

DERIVADA DE UMA MATRIZ DE ROTAÇÃO

Seja $R(\theta) = R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\theta & -s_\theta \\ 0 & s_\theta & c_\theta \end{bmatrix}$

então teremos:

$$S = \frac{d}{d\theta} R(\theta) R^T(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = S(i)$$

em que $i = [1\ 0\ 0]^T$

ou seja $\frac{d}{d\theta} R_{x,\theta} = S(i) R_{x,\theta}$ (também $\frac{d}{d\theta} R_{y,\theta} = S(j) R_{y,\theta}$ e $\frac{d}{d\theta} R_{z,\theta} = S(k) R_{z,\theta}$)

no caso geral: $\frac{d}{d\theta} R_{a,\theta} = S(a) R_{a,\theta}$

VELOCIDADE ANGULAR – CASO GENÉRICO

Considere-se uma velocidade angular *w(t)* em torno de um eixo qualquer, estando este eixo em movimento. A matriz de rotação correspondente será variável no tempo, seja $R(t) \in SO(3)$.

Teremos então:

$$\dot{R}(t) = S(w(t))R(t)$$

onde w(t) é um vector que representa a velocidade angular em relação ao referencial fixo no instante de tempo t.

VELOCIDADE ANGULAR – VERIFICAÇÃO

Seja p^1 um ponto fixo a um referencial que se está a mover, teremos:

$$p^0 = R_1^0 p^1$$

Para se determinar a velocidade do ponto p derivamos em ordem ao tempo, obtendo-se:

$$\dot{p}^0 = \dot{R}_1^0 p^1 = S(w(t))R_1^0 p^1 = w(t)xR_1^0 p^1 = w(t)xp^0$$

ADIÇÃO DE VELOCIDADES ANGULARES

Sejam $o_0x_0y_0z_0$, $o_1x_1y_1z_1$ e $o_2x_2y_2z_2$ três referenciais tais que:

- $o_0x_0y_0z_0$ esteja fixo
- todos têm a mesma origem
- $R_1^0(t)$ e $R_2^1(t)$ representem as orientações relativas entre os referenciais

e seja $\boldsymbol{w}_{i,j}^{k}$ o vector da velocidade angular correspondente a $R_j^i(t)$ nas coordenadas do referencial $o_kx_ky_kz_k$.

ADIÇÃO DE VELOCIDADES ANGULARES

Seja:

$$R_2^0(t) = R_1^0(t)\, R_2^1(t)$$

Derivando:

$$\dot{R}_2^0 = \dot{R}_1^0 R_2^1 + R_1^0 \dot{R}_2^1$$

$$\Leftrightarrow \dot{R}_2^0 = S(w_{0,1}^0) R_1^0 R_2^1 + R_1^0 S(w_{1,2}^1) R_2^1$$

$$\Leftrightarrow \dot{R}_2^0 = S(w_{0,1}^0) R_2^0 + R_1^0 S(w_{1,2}^1) (R_1^0)^T R_1^0 R_2^1$$

$$\Leftrightarrow \dot{R}_2^0 = S(w_{0,1}^0) R_2^0 + S(R_1^0\, w_{1,2}^1) R_2^0$$

$$\Leftrightarrow S(w_{0,2}^0) R_2^0 = [S(w_{0,1}^0) + S(R_1^0 w_{1,2}^1)] R_2^0$$

$$\Leftrightarrow w_{0,2}^0 = w_{0,1}^0 + R_1^0 w_{1,2}^1$$

ADIÇÃO DE VELOCIDADES ANGULARES

Generalizando-se para n referenciais:

$$R_n^0(t) = R_1^0(t)\,R_2^1(t)\,.\,.\,.\,R_n^{n-1}(t)$$

teremos:

$$w_{0,n}^{0} = w_{0,1}^{0} + R_1^0\,w_{1,2}^{1} + \,.\,.\,.\, + R_{n-1}^{0}\,w_{n-1,n}^{n-1}$$

$$\Leftrightarrow\; w_{0,n}^{0} = w_{0,1}^{0} + w_{1,2}^{0} + \,.\,.\,.\, + w_{n-1,n}^{0}$$

VELOCIDADE DE UM PONTO

Suponhamos que o movimento do referencial $o_1x_1y_1z_1$ em relação ao $o_0x_0y_0z_0$ é dado pela transformação homogénea:

$$H(t) = \begin{bmatrix} R_1^0(t) & o_1(t) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para um ponto genérico $p(t)$:

$$p^0(t) = R_1^0(t)p^1 + o_1(t)$$

Derivando a posição do ponto, teremos:

$$\dot{p}^0(t) = \dot{R}_1^0(t)p^1 + \dot{o}_1(t) = S(w(t))R_1^0(t)p^1 + \dot{o}_1(t) = w(t) x r(t) + v(t)$$

JACOBIANO DO MANIPULADOR

Considere-se um manipulador com n articulações cujas variáveis são:

$$q(t) = [q_1(t)\ q_2(t)\ \ . . .\ q_n(t)]^T$$

e a transformação homogénea da base para a extremidade:

$$T_n^0(q) = \begin{bmatrix} R_n^0(q) & o_n^0(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Seja a velocidade angular da extremidade w_n^0 dada por:

$$w_n^0 = J_w \dot{q}$$

e a velocidade linear dada por: $v_n^0 = \dot{o}_n^0 = J_v \dot{q}$

JACOBIANO DO MANIPULADOR

O Jacobiano do manipulador é por definição:

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix}$$

sendo a velocidade do corpo definida como:

$$\xi = \begin{bmatrix} V_n^0 \\ W_n^0 \end{bmatrix}$$

ou seja:

$$\xi(t) = J\,\dot{q}\,(t)$$

JACOBIANO – VELOCIDADE ANGULAR

Se a articulação *i* é rotativa o eixo de rotação é dado por z_{i-1} ,

logo:

$$w^{i-1}_{i-1,i} = \dot{q}_i z^{i-1}_{i-1} = \dot{q}_i k, \quad \text{em que } k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Se a articulação *i* é prismática não existe rotação entre o referencial *i* e o referencial *i-1*, logo:

$$w^{i-1}_{i-1,i} = 0$$

JACOBIANO – VELOCIDADE ANGULAR

Sabendo-se que:

$$w^0_{0,n} = w^0_{0,1} + R^0_1\, w^1_{1,2} + \ldots + R^0_{n-1}\, w^{n-1}_{n-1,n}$$

resulta:

$$w^0_{0,n} = \lambda_1 \dot{q}_1\, k + \lambda_2 \dot{q}_2\, R^0_1 k + \ldots + \lambda_n \dot{q}_n\, R^0_{n-1} k$$

$$= \lambda_1 \dot{q}_1\, z^0_0 + \lambda_2 \dot{q}_2\, z^0_1 + \ldots + \lambda_n \dot{q}_n z^0_n = J_w \dot{q}$$

com λ_i= 1 se a articulação for rotativa e λ_i= 0 se for prismática.

JACOBIANO – VELOCIDADE LINEAR

A velocidade linear da extremidade do manipulador é:

$$\dot{o}_n^0$$

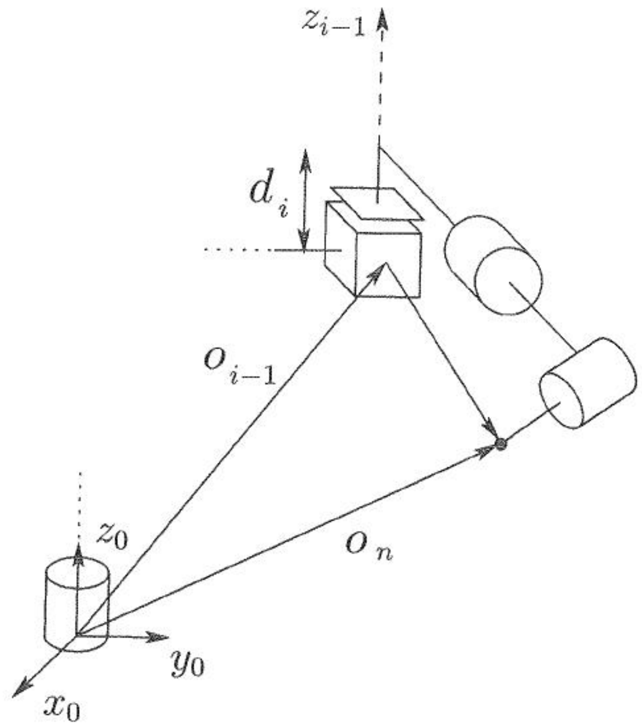
Derivando, resulta:

$$\dot{o}_n^0 = \frac{\partial o_n^0}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial o_n^0}{\partial q_2}\dot{q}_2 + \ldots + \frac{\partial o_n^0}{\partial q_n}\dot{q}_n$$

Ou seja:

$$J_v = \left[\frac{\partial o_n^0}{\partial q_1} \quad \frac{\partial o_n^0}{\partial q_2} \quad \ldots \quad \frac{\partial o_n^0}{\partial q_n} \right]$$

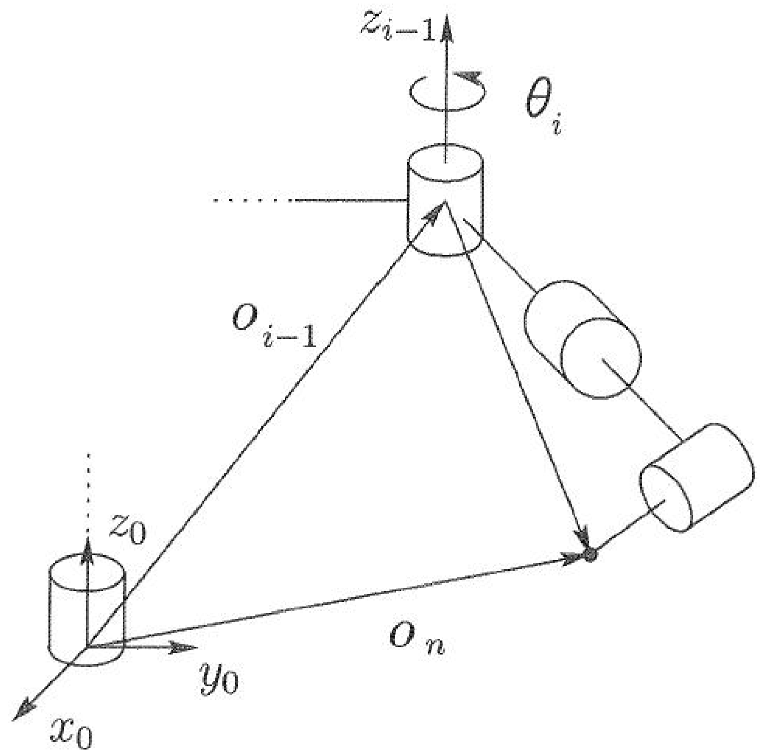
JACOBIANO – VELOCIDADE LINEAR



Para articulações prismáticas, temos:

$$\dot{o}_n^0 = \dot{d}_i z_{i-1}^0 = \dot{d}_i R_{i-1}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

JACOBIANO – VELOCIDADE LINEAR



Para articulações rotativas, temos:

$$\dot{o}_n^{\,0} = w(t) \mathrm{x} r = \dot{\theta}_i \, z_{i-1}^{0} \mathrm{x} (o_n^0 - o_{i-1}^0)$$

JACOBIANO – RESUMO

O Jacobiano é dado por:

$$\begin{bmatrix} v_n^0 \\ w_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \dot{q}\,(t)$$

onde:

$$J_v = [J_{v1} \;\; J_{v2} \; . \; . \; . \; J_{vn}], \qquad J_{vi} = \begin{cases} z_{i-1}^0 \times (o_n^0 - o_{i-1}^0) & \text{- articulação rotativa} \\ z_{i-1}^0 & \text{- articulação prismática} \end{cases}$$

$$J_w = [J_{w1} \;\; J_{w2} \; . \; . \; . \; J_{wn}], \qquad J_{wi} = \begin{cases} z_{i-1}^0 & \text{- articulação rotativa} \\ 0 & \text{- articulação prismática} \end{cases}$$

SINGULARIDADES

Dada a relação:

$$\xi(t) = J\,\dot{q}\,(t)$$

Quando as colunas de *J* deixam de ser todas independentes entre si, temos uma singularidade.

SINGULARIDADES

Desacoplamento das singularidades com punho esférico.

$$J = [J_P \;\; J_O]$$

Sendo as últimas 3 articulações esféricas, teremos:

$$J_O = \begin{bmatrix} z_3 x(o_6 - o_3) & z_4 x(o_6 - o_4) & z_5 x(o_6 - o_5) \\ z_3 & z_4 & z_5 \end{bmatrix}$$

Se escolhermos $o_6 = o_5 = o_4 = o_3$, resulta:

$$J_O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ z_3 & z_4 & z_5 \end{bmatrix}$$

SINGULARIDADES

O Jacobiano fica então com a forma:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & 0 \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}$$

Sendo o seu determinante dado por:

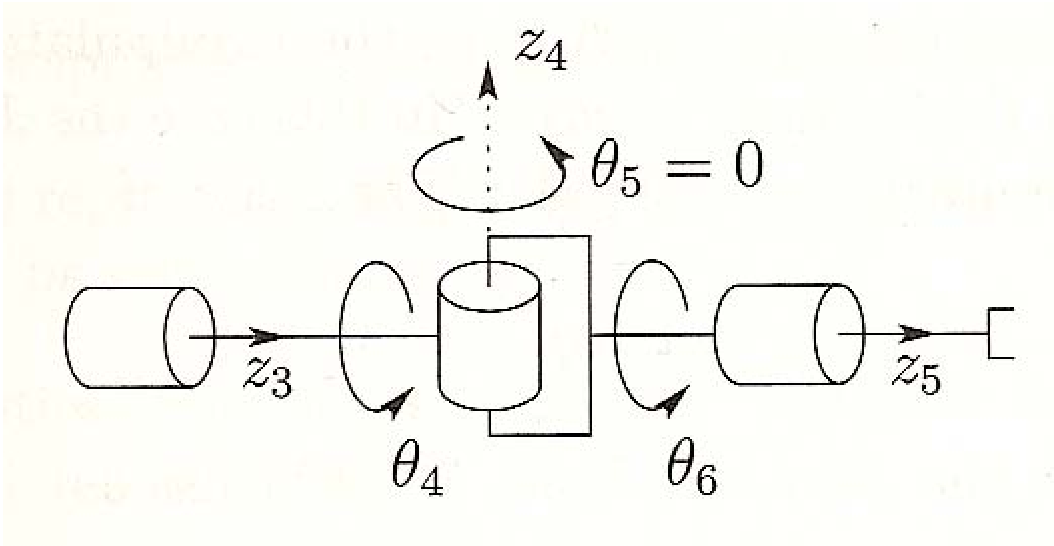
$$\det(J) = \det(J_{11})\,\det(J_{22})$$

SINGULARIDADES

No caso do punho esférico:

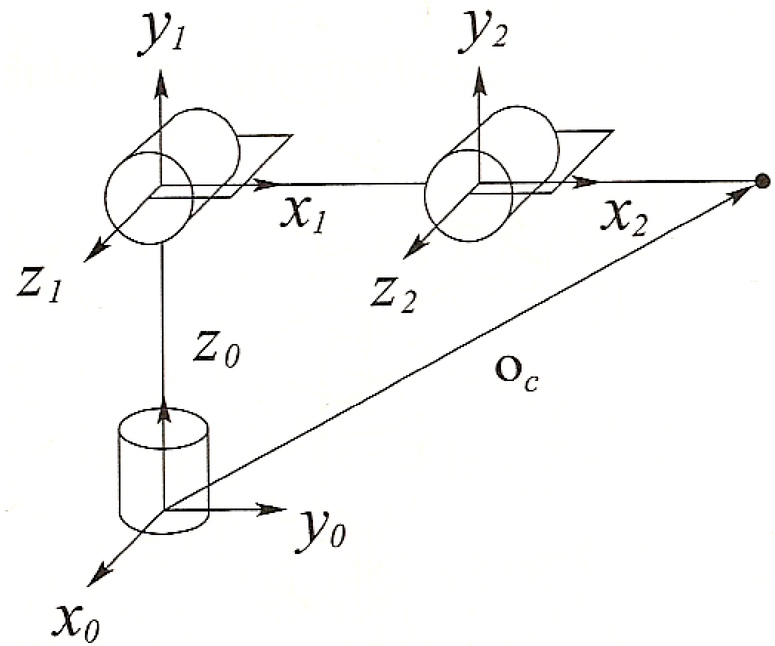
$$\det(J_{22}) = \det(\begin{bmatrix} z_3 & z_4 & z_5 \end{bmatrix})$$

O determinante será nulo se z_3 for colinear com z_5:



SINGULARIDADES

No seguinte braço:



temos

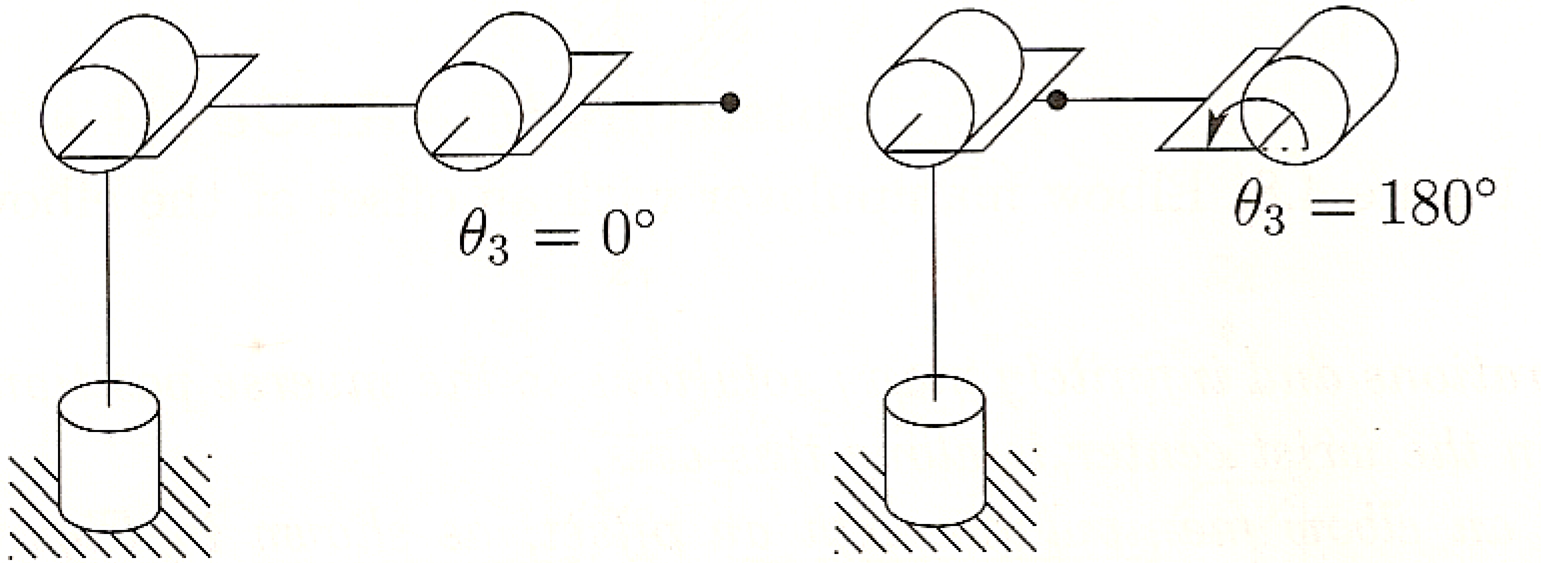
$$J_{11} = \begin{bmatrix} -a_2 s_1 c_2 - a_2 s_1 c_{23} & -a_2 s_2 c_1 - a_2 s_{23} c_1 & -a_3 c_1 s_{23} \\ a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} & -a_2 s_1 s_2 - a_3 s_1 s_{23} & -a_3 s_1 s_{23} \\ 0 & a_2 c_2 + a_3 c_{23} & a_3 c_{23} \end{bmatrix}$$

e

$$\det(J_{11}) = a_2 a_3 s_3 (a_2 c_2 + a_3 c_{23})$$

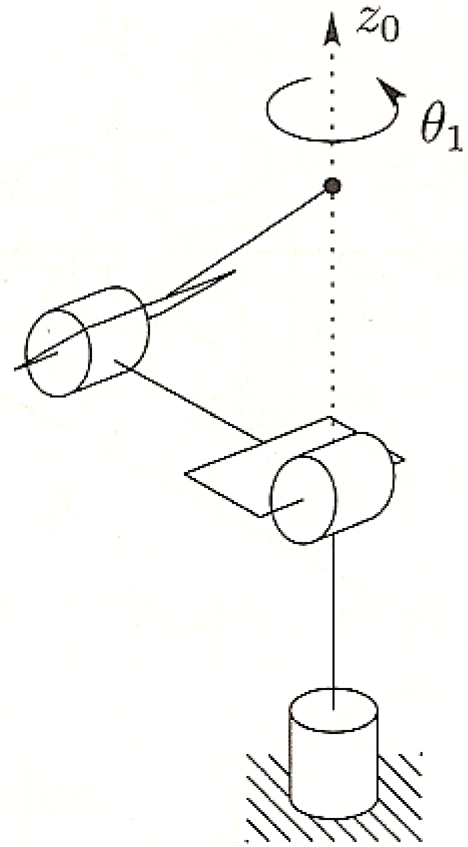
SINGULARIDADES

O determinante de J_{11} será nulo para $s_3=0$:



SINGULARIDADES

O determinante de J_{11} será também nulo para $a_2c_2+a_3c_{23} = 0$



FORÇAS E BINÁRIOS

Suponhamos que as forças e binários na extremidade do manipulador são:

$$F = [\ F_x\ F_Y\ F_Z\ n_x\ n_Y\ n_Z\ ]^T$$

A relação estática com os binários (forças) nas articulações será dada por:

$$T = J^T(q)\ F$$

FORÇAS E BINÁRIOS

Da relação $\xi(t) = J(q)\,\dot{q}(t)$, podemos para deslocamentos infinitesimais dizer que:

$$\delta X = J(q)\,\delta q$$

o trabalho realizado será dado por:

$$\delta w = F^T \delta X - T^T \delta q$$

ou seja,

$$\delta w = (F^T J(q) - T^T)\delta q$$

da condição de equilíbrio, retira-se:

$$T = J^T(\mathrm{q})\,F$$

VELOCIDADE INVERSA

Pretende-se conhecer o valor da velocidade das articulações sabendo-se a velocidade da extremidade do manipulador utilizando-se a relação:

$$\xi(t) = J\,\dot{q}(t)$$

Se o manipulador tiver 6 articulações e *J(q)* for invertível, então:

$$\dot{q}(t) = J^{-1}\xi(t)$$

VELOCIDADE INVERSA

Se o manipulador tiver menos de 6 articulações então só existe solução se:

$$\text{rank}\, J = \text{rank}\, [J \ \xi\,]$$

ou seja ξ pertencer ao espaço gerado pelas colunas de J.

Pode-se utilizar um método de eliminação Gaussiana para se encontrar a solução.

Se o manipulador tiver mais de 6 articulações então temos que utilizar a pseudo-inversa de J (existem diversas soluções).

CAPACIDADE DE MANIPULAÇÃO

A medida da capacidade de manipulação é dada por:

$$\mu = |\det(J)|$$

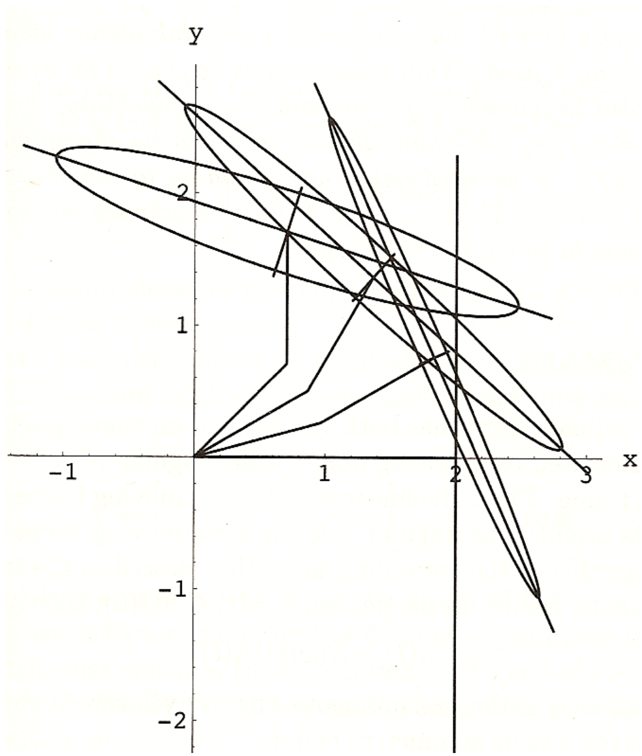
e está relacionada com um volume de um elipsóide.

O manipulador deve trabalhar preferencialmente em zonas com elevada capacidade de manipulação.

CAPACIDADE DE MANIPULAÇÃO

Exemplo:

Manipulador planar de dois segmentos com articulações rotativas

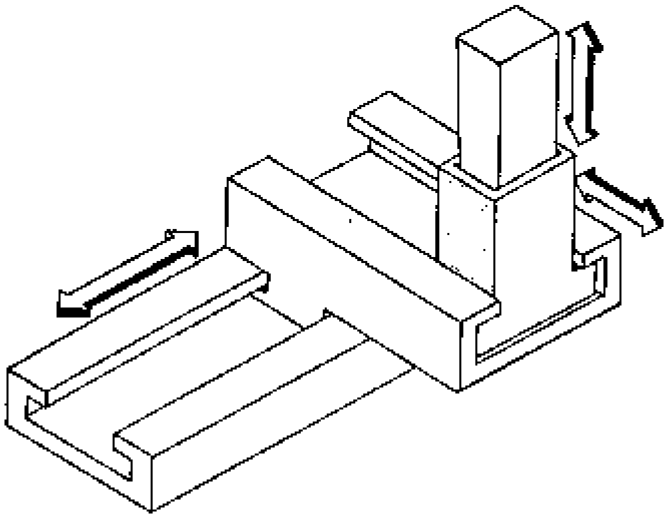


$$J = \begin{bmatrix} -a_1s_1 - a_2s_{12} & -a_2s_{12} \\ a_1c_1 + a_2c_{12} & a_2c_{12} \end{bmatrix}$$

$$\mu = |\det(J)| = a_1a_2|s_2|$$

VOLUME DE TRABALHO

Robot Cartesiano (PPP):

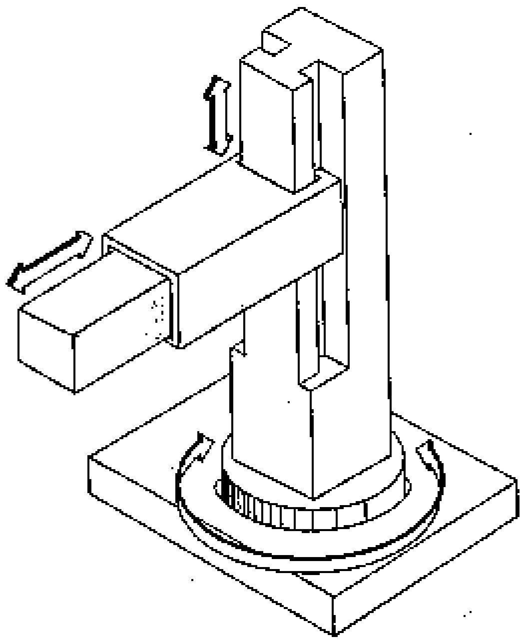


Alcançam qualquer ponto de um cubo de lado L:

$$V = L * L * L$$

VOLUME DE TRABALHO

Robot Cilíndrico (RPP):

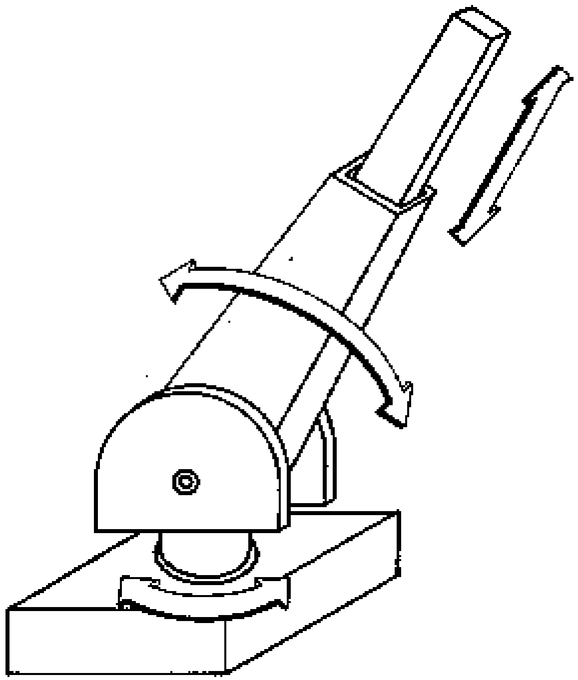


Alcançam qualquer ponto num cilindro de altura L e raio 2L, excepto os pontos do cilindro interno de raio L e altura L:

$$V = 9{,}42 * L * L * L$$

VOLUME DE TRABALHO

Robot Esférico (RRP):

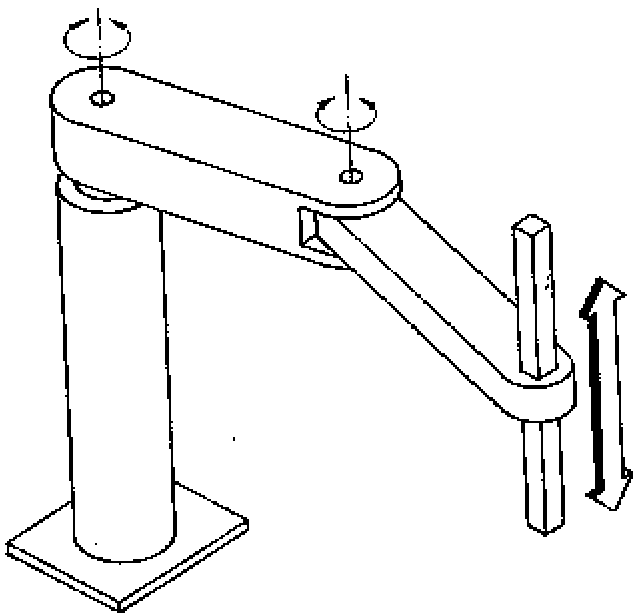


Alcançam qualquer ponto de uma esfera de raio 2L, excepto a esfera interna de raio L:

$$V = 29{,}32 * L * L * L$$

VOLUME DE TRABALHO

Robot de Articulação Horizontal - SCARA (RRP):

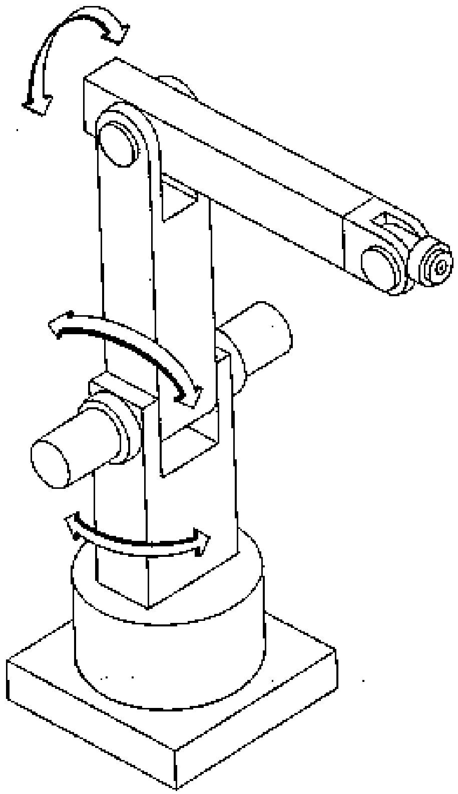


Alcançam qualquer ponto de um cilindro de raio 2L e altura L.

$$V = 12{,}56 * L * L * L$$

VOLUME DE TRABALHO

Robot Antropomórfico (RRR):



Alcançam qualquer ponto de uma esfera de raio 2L:

$$V = 33,51 * L * L * L$$

ACCIONAMENTO ELÉCTRICO

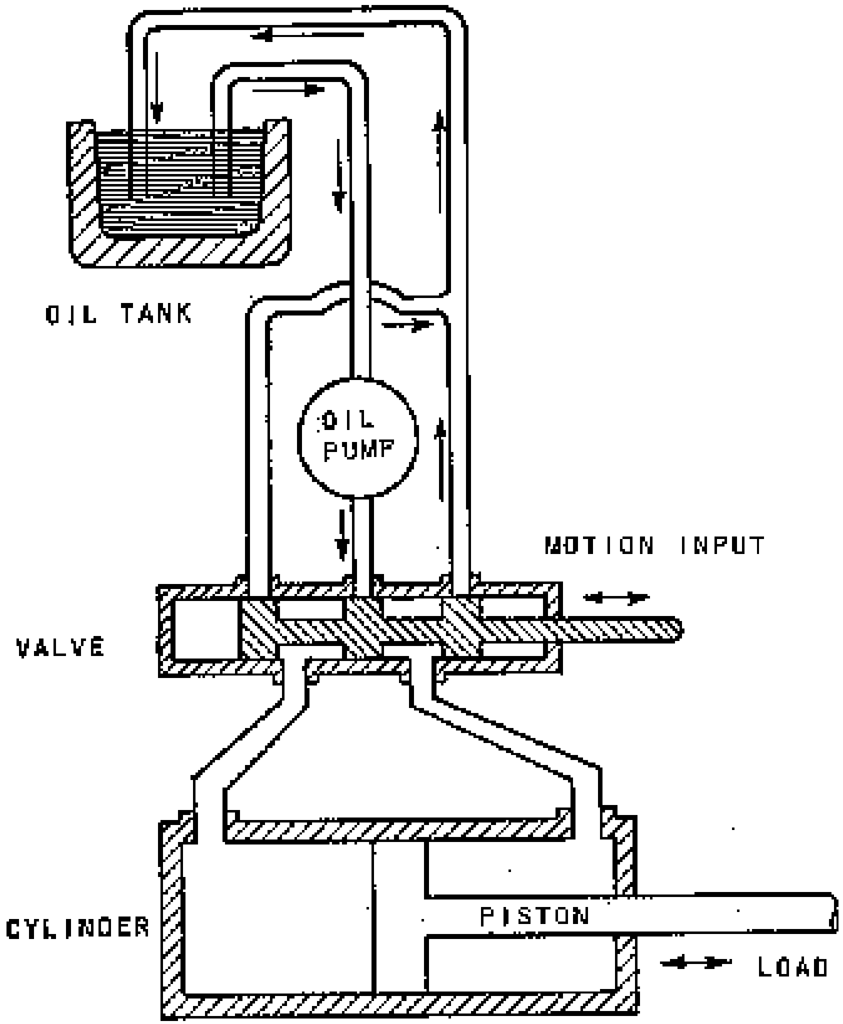
Vantagens:

1. Eficiência e controlo preciso.
2. Estrutura simples e fácil manutenção.
3. Não requer uma fonte de energia cara.
4. Custo relativamente baixo.

Desvantagens:

1. Não manter um binário constante nas mudanças de velocidade de rotação.
2. Danificar-se com cargas pesadas.
3. Baixa razão de potência de saída do motor em relação ao seu peso, necessitando de um motores grandes.

ACCIONAMENTO HIDRÁULICO



ACCIONAMENTO HIDRÁULICO

Vantagens:

1. Alto binário e constante sob uma grande faixa de variação de velocidade.
2. Precisão de operação (entre o eléctrico e o pneumático).
3. Pode manter um binário alto para um longo período de tempo, quando parado.

Desvantagens são:

1. Requer uma fonte de energia cara.
2. Requer uma manutenção cara e intensa.
3. Requer válvulas de precisão caras.
4. Está sujeito a fugas de óleo

ACCIONAMENTO PNEUMÁTICO

Vantagens:

1. Podem funcionar a velocidades altas.
2. Custo relativamente baixo.
3. Fácil manutenção.
4. Podem manter um binário constante numa grande faixa de velocidades.
5. Quando parado, pode manter o binário alto por longos períodos de tempo.

ACCIONAMENTO PNEUMÁTICO

Desvantagens:

1. Não possui alta precisão.

2. Está sujeito a vibrações quando o motor ou cilindro pneumático é parado.

É muito utilizado para abrir e fechar as garras.

ACCIONAMENTOS

Eléctrico é melhor em aplicações envolvendo:

- Alta precisão de posicionamento;
- Cargas de tamanho pequeno e médio;
- Ambientes difíceis para sistemas de compressores de óleo e ar;

Hidráulico em situações envolvendo:

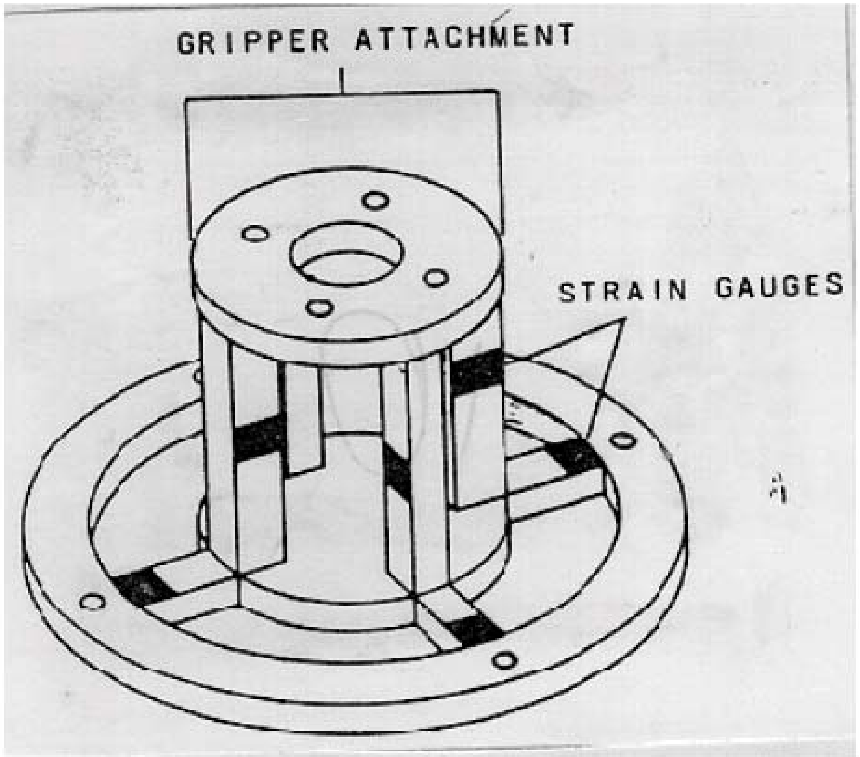
- Cargas pesadas.
- Média / alta precisão no posicionamento e na velocidade;

Pneumático é preferível em aplicações envolvendo:

- Baixa precisão;
- Necessidade de baixo custo;
- Altas velocidades;
- Transferência de cargas pequenas ou médias.

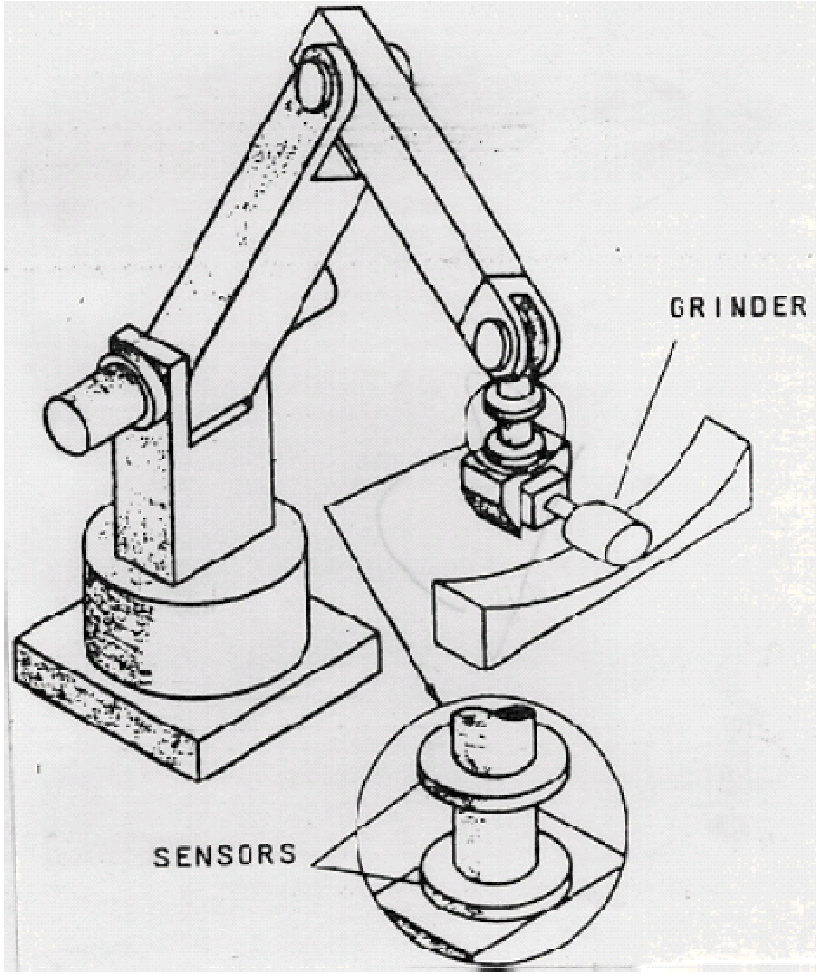
SENSORES

Sensor de força para colocação no punho



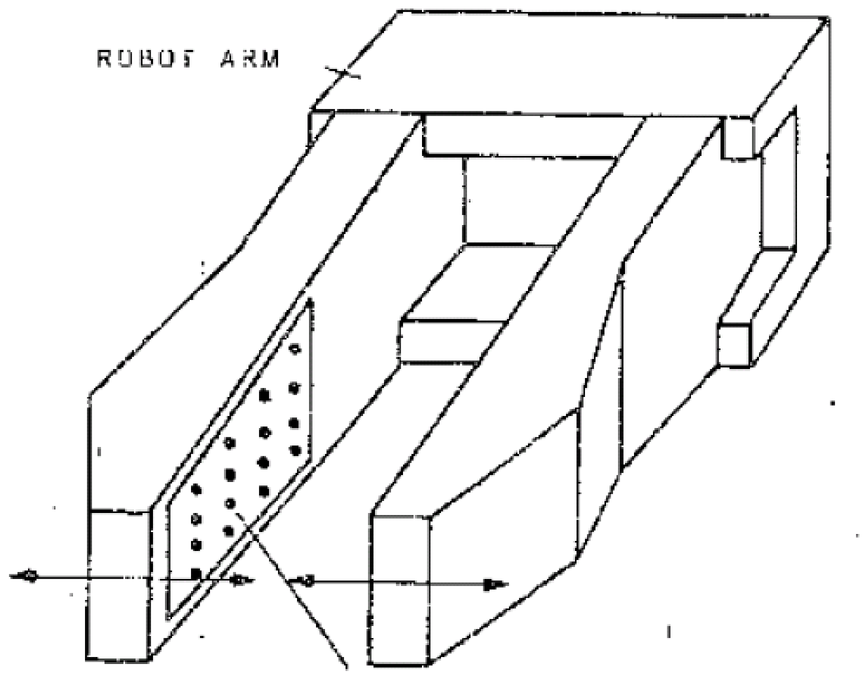
SENSORES

Sensor de força para colocação no punho

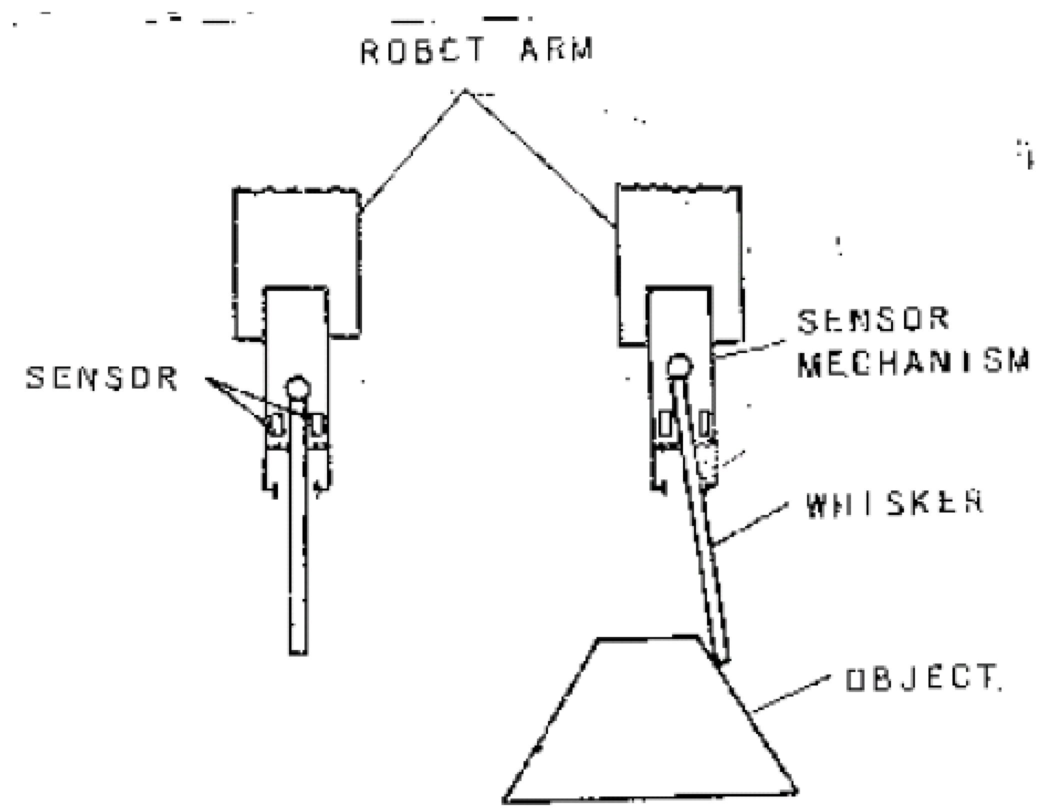


SENSORES

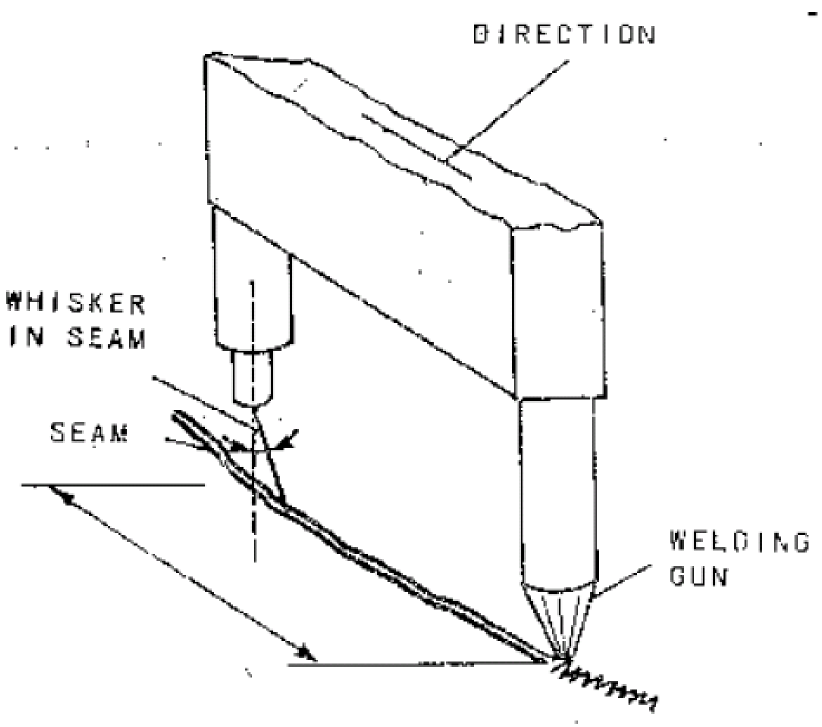
SENSOR TACTIL



SENSORES

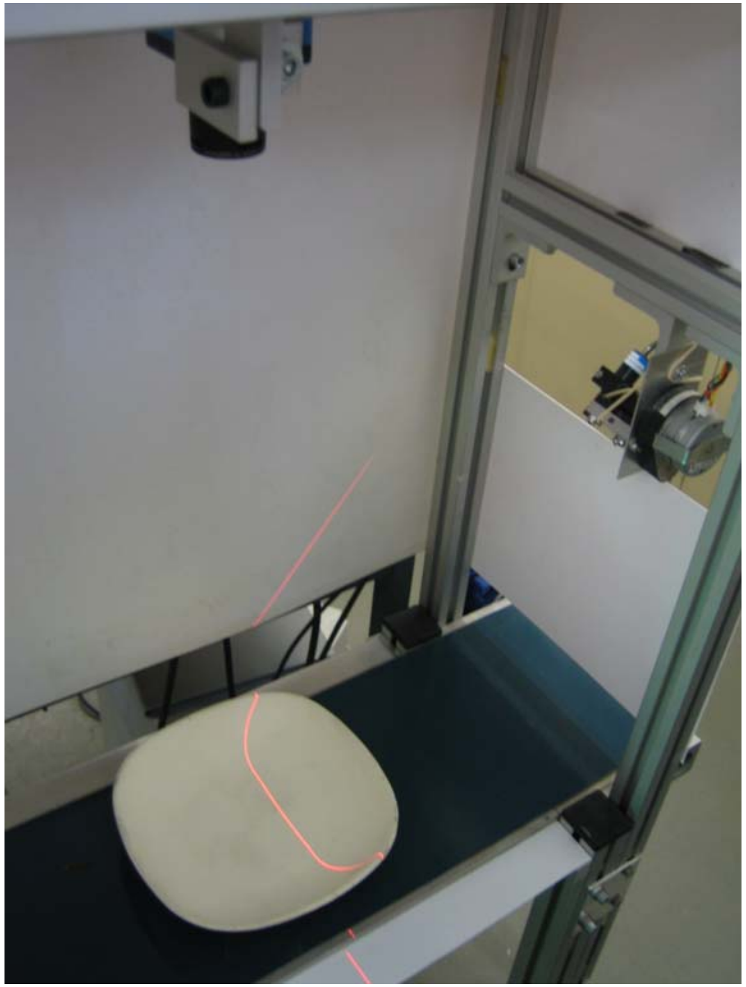


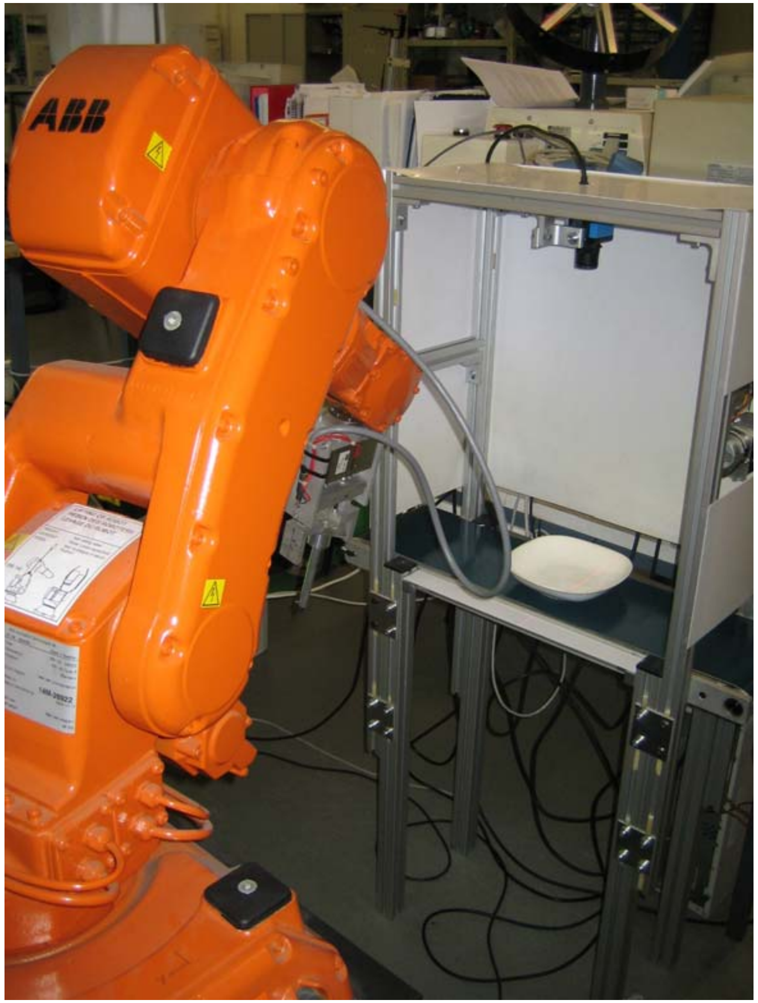
SENSORES



SENSORES

VISÃO ARTIFICIAL





APLICAÇÕES

CAPACIDADES :

X = transporte
Y = manipulação
Z = sensoreamento

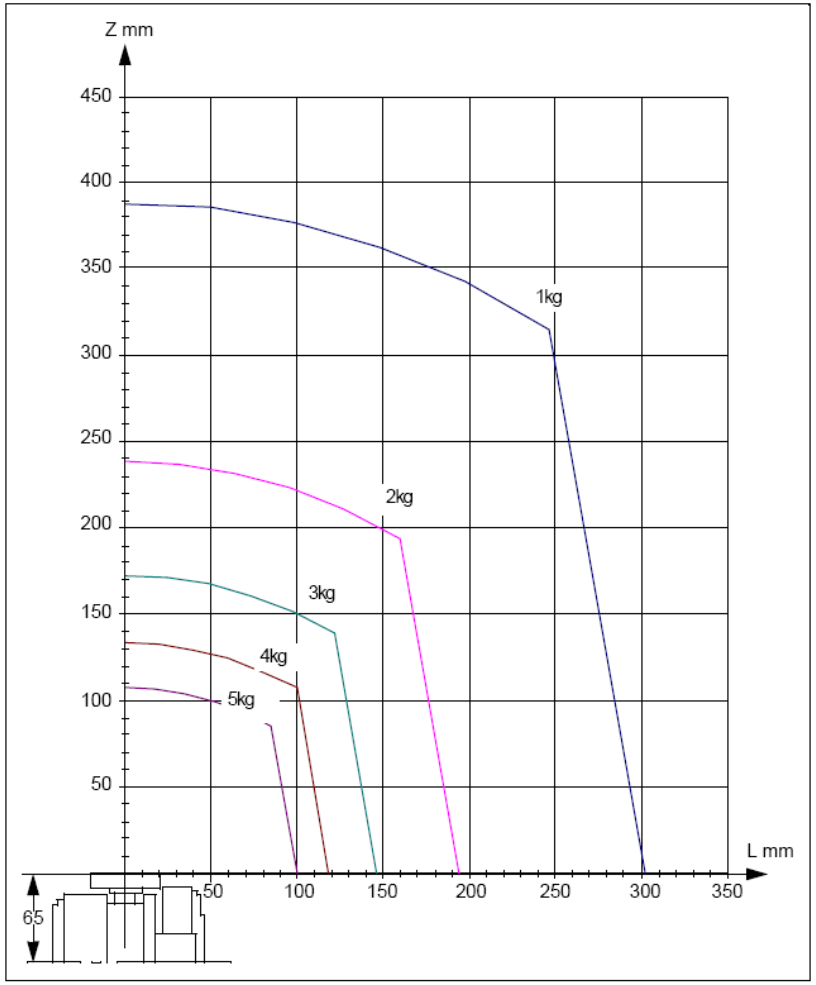
PRINCIPAIS BENEFÍCIOS :

A = melhoria na qualidade do produto
B = aumento de produtividade
C = redução de custos
D = eliminação de trabalho perigoso e desagradável

	EXEMPLOS	X	Y	Z	A	B	C	D
Manipulação de Materiais	Armazenamento Manipulação de Peças Movimentação	●					●	●
Carga e Descarga de Máquinas	Fundição em Molde Prensas Automáticas Máquinas de Ferramenta	●	●			●	●	●
Trabalho com Spray	Pintura Aplicação de cola / resina		●		●		●	●
Solda	Solda a ponto Solda em arco		●		●	●	●	●
Maquinário de Acabamento	Furadeira Triturador Lixador Polidor Cortador		●	●	●	●		●
Montagem	Encaixe de Partes Fixação		●	●		●	●	
Inspeção	Controle Tolerância			●	●			

ESPECIFICAÇÕES

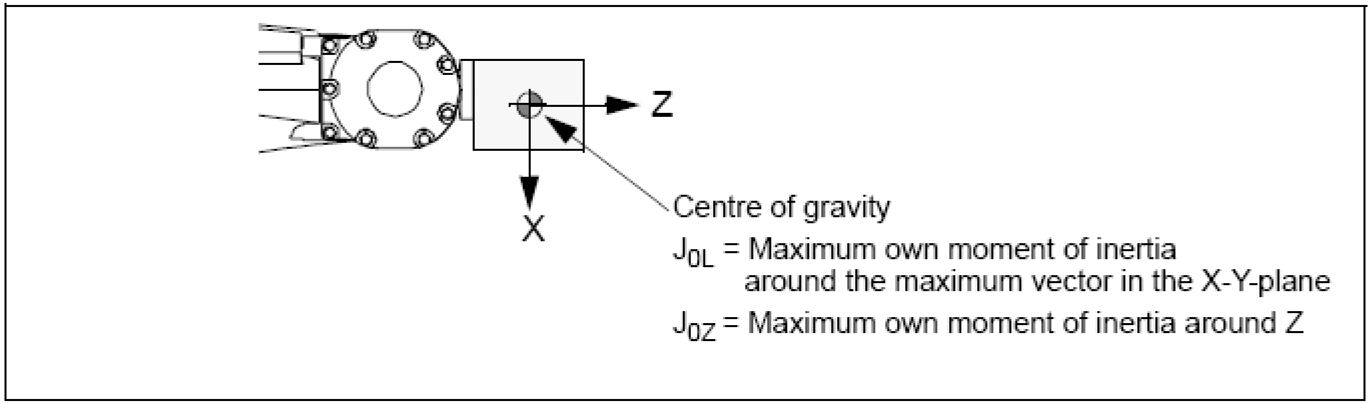
CARGA ADMISSIVEL



Z = see the above diagram and the coordinate system in the Product Specification S4Cplus
L = distance in X-Y plane from Z-axis to the centre of gravity

ESPECIFICAÇÕES

CARGA ADMISSIVEL



ESPECIFICAÇÕES

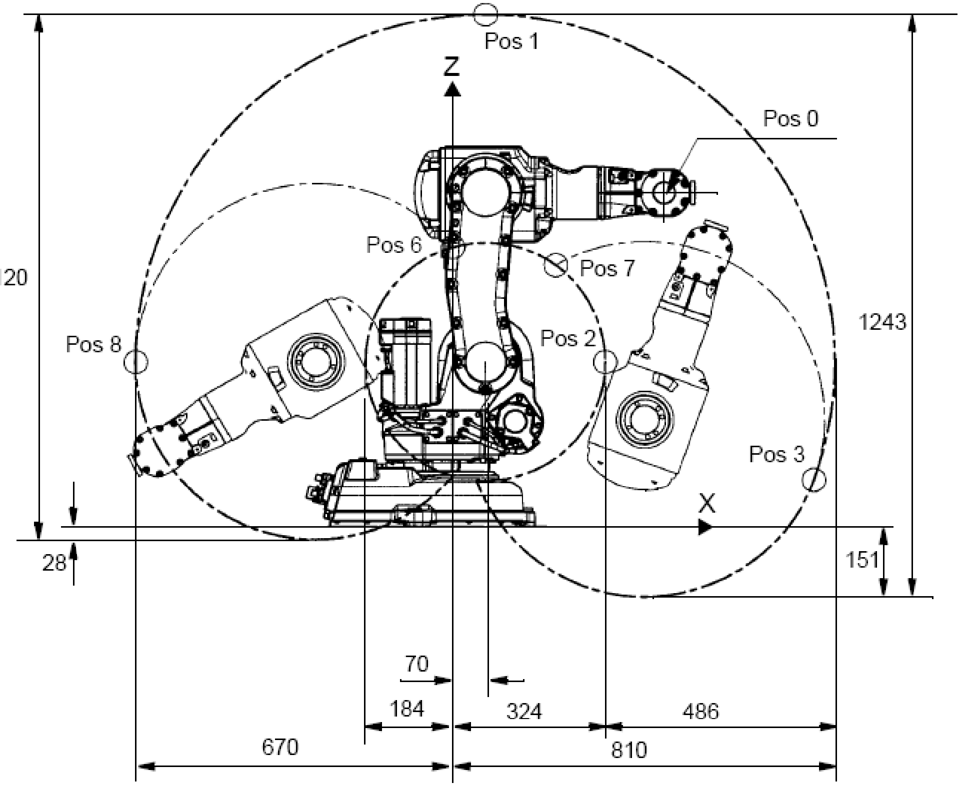
DESLOCAMENTO MÁXIMO NAS ARTICULAÇÕES

(ABB IRB140 M2000)

Type of motion		**Range of movement**
Axis 1	Rotation motion	+180° – -180°
Axis 2	Arm motion	+110° – -90°
Axis 3	Arm motion	+50° – -230°
Axis 4	Wrist motion	+200° – -200° Default
		+165 revolutions – -165 revolutions Max**)
Axis 5	Bend motion	+120° – -120°
Axis 6	Turn motion	+400° – -400° Default
		+163 revolutions – -163 revolutions Max**)

ESPECIFICAÇÕES

VOLUME DE TRABALHO



Positions at wrist centre (mm)		
pos.	x	z
0	450	712
1	70	1092
2	314	421
3	765	99
6	1	596
7	218	558
8	-670	352

Angle (degrees)		
pos.	axis 2	axis 3
0	0	0
1	0	-90
2	0	+50
3	110	-90
6	-90	+50
7	110	-230
8	-90	-90

ESPECIFICAÇÕES

Performance according to ISO 9283

At rated load and 1 m/s velocity on the inclined ISO test plane with all six robot axes in motion.

Unidirectional pose repeatability:
RP = 0.03 mm

Linear path accuracy:
AT = 1.0 mm

Linear path repeatability:
RT = 0.15 mm

Minimum positioning time, to within 0.5 mm of the position:
0.2 sec. (on 35 mm linear path)

The above values are the range of average test-results from a number of robots. If guaranteed values are required, please contact your nearest ABB Flexible Automation Centre.

ESPECIFICAÇÕES

VELOCIDADE MÁXIMA

Velocity

Axis no.	IRB 140	IRB 140T
1	200°/s	250°/s
2	200°/s	250°/s
3	260°/s	260°/s
4	360°/s	360°/s
5	360°/s	360°/s
6	450°/s	450°/s

There is a supervision to prevent overheating in applications with intensive and frequent movements.

ESPECIFICAÇÕES

OUTROS FACTORES A TER EM CONTA:

- Entradas e saídas disponíveis
- Interface com o utilizador na própria consola.
- Conexão normalizada com outros equipamentos.
- Manutenção e assistência técnica.
- Eixos externos.
- Alimentação (trifásica/monofásica).
- Linguagem de programação.

PRINCIPIOS DE CONTROLO DOS ROBÔS

- Controlo de posição

- Controlo de força

TIPOS DE TRAJECTÓRIAS

- Interpolação no espaço das juntas

- Interpolação no espaço cartesiano:

movimento linear e circular.

OUTRAS VERTENTES DA ROBÓTICA INDUSTRIAL

* Veículos Industriais Auto-Guiados.

* Células robotizadas

* Armazéns automáticos.