

Lab ED 013 / 014 - Florin Anton, Silviu Răikaru  
 Sisteme de Conducere a Robotilor  
 ↓  
 "Control"

16-08-2012

Punctaj lab < <sup>prezentă</sup>  
 lucrare  
 examen prob  
 teorie

Robotul = Instalație tehnică

Procesul controlat: proc. de mișcare  $\leftarrow$  obț. prin conținut și număr mișcări individuale  $\rightarrow$  g. l.  $\rightarrow$  d. o. f.

(grad libertate) g. l. - obț. asociind un segment cu o articulație

1. Roboti industriali  $\rightarrow$  manufacturing  $\rightarrow$  mediu industrial  
 - proc.-asamblare/montaj  
 - prelucrare: vorșire, finisare, slefuire

2. Roboti fixi - fixati în 3 moduri pe sol

Noe farar - ABB

pe banc de lucru (top table) //

3. Roboti mobile - nu sunt flexibili

$\Rightarrow$  5 cl. cunre. de roboti industriali

- 1. Cercular - 4 g. l. - f. precis
- 2. Cilindric
- 3. Sferic (polar)

4,5,6 g. l.

4. Articulat vertical (anthropomorfic)

5. Articulat orizontal (SCARA - Selective Compliant Adaptable Robot Architecture) - 4 g. l. - f. precis

1,2,3,4,5  $\rightarrow$  manipulator

Terminologie

Sistem robot - compus din manipulator (robot manipulator) + controler  
 parte mecanică

- controller

calculator (multiprocesor)

proc de ing. 2.  
 (imaginii)

mag. de sis/transfor

parte aut.

procesor de sigură

terminal (IBM PC)

f. proc. matematice  
 f. planif. si gen. traiectoriilor

- terminal PC editare program  
interfață om-masina
- m.c. proc. de ax = m.c. g. l = "n"
- prim. proc. de ax se fac măsurări de deplasare
  - modul de învățare (Teach Box, Teach pendant, Manual Control Pendant - MCP)
  - producător: Adept Technology (se îndreaptă la lab)
- 2 tipuri de operatii sf-instrucțiuni program (IP)
  - comenzile monitor (CM)
- 2 etape: învățare (configureare) - Learning  $\rightarrow$  12 ore  $\rightarrow$  CM  
operare - fol. în f.r.  $\rightarrow$  1 minut  $\rightarrow$  IP

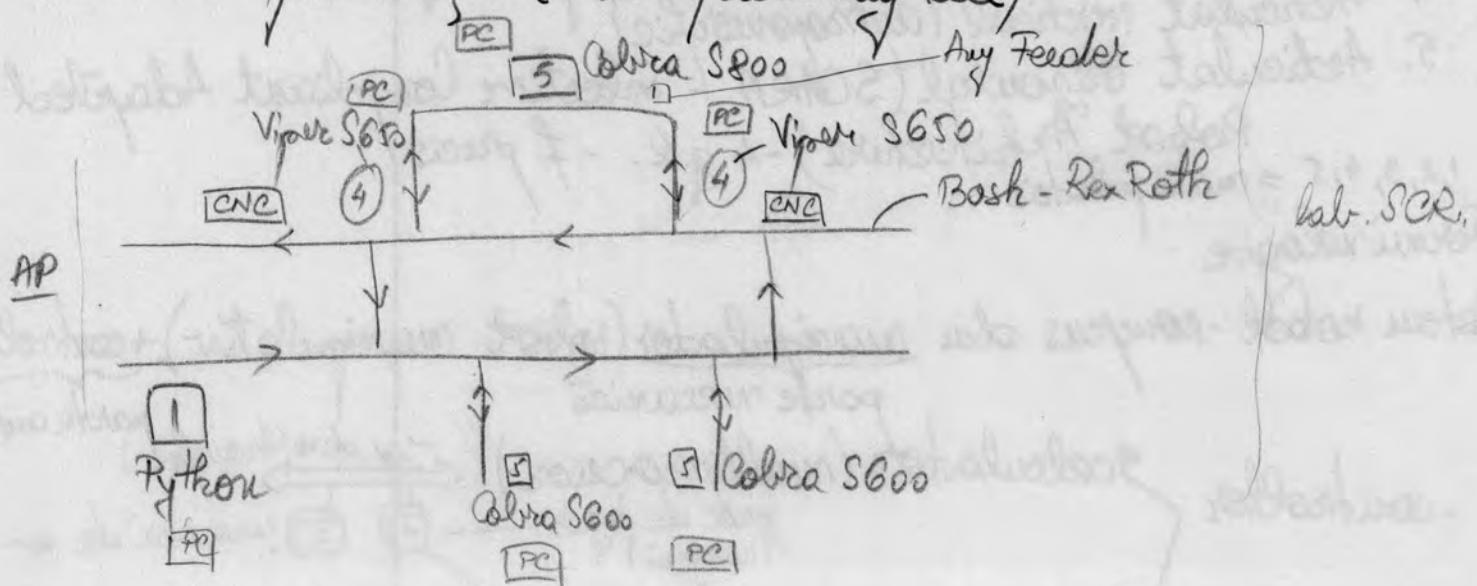
Manipulator robot = braț + efectoare terminal (end - effectiv)

3 segmente  
permite realizarea a 3 g.l.

$\rightarrow$  TMF: tool mounting flange  
(distanță fixă de la griptor)  
 $\rightarrow$  griptor - permite 1, 2 sau 3 g.l.  
 $\rightarrow$  tool - poate să fie și niciun

- roboți industriali cu 4 g. l.-6 g. l.

Cellula de fabricatie (Manufacturing cell)



- la lab - V<sup>+</sup> → Adept Vision

Bibliografie:

1. Adept User Manual | → comenzi misc  
2. Adept User Guide | Fuchidere/deschidere gripper  
3. Adept Vision User Guide | i/E  
Reference Guide | control progr.  
4. "Programarea robotilor", Ed. AGIR, 2011, Th. Borangiu, fl. Anton Al. Dumitache → probl. scrise in V<sup>+</sup>  
5. "Robot modelling and simulation", Th. Borangiu, Ed. Academiei Române, 2004. → teorie  
"Robot modelling and simulation. Problems", Th. Borangiu, R. Tonescu, Dan I. Stefanovici, Ed. Academiei Române, 2006  
6. "Advanced Robot Motion Control", Th. Borangiu, Ed. Academiei Române, 2005  
7. "Intelligent Image Processing in Robots and Manufacturing", Th. Borangiu, Ed. Academiei Române, 2006.

Naturăa misc asigurată de 1 g. l.

↳ tip articulație → SIMPLA

1. Articulație de rotație (R)

/ \ dir. axei de rotație este fixă  
X Z

2. Articulație de translație (T) - sau prismatică

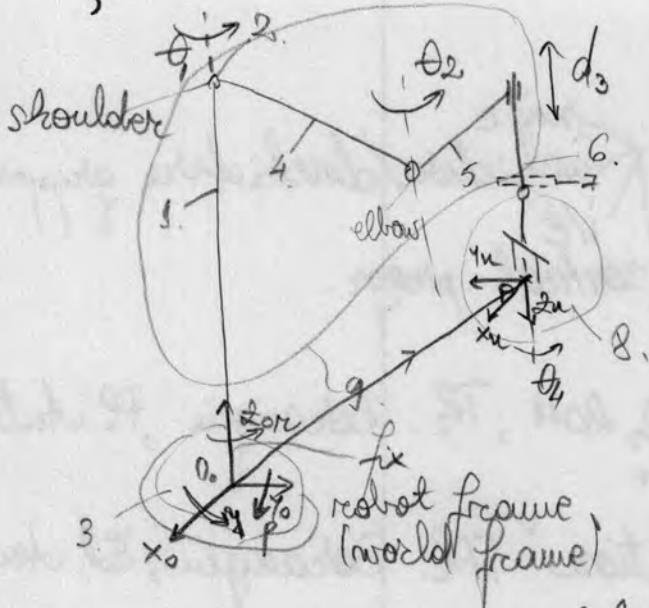
↔ dir. axei de rotație este fixă

• la cl. de robotti: 1. PPP  
2. RPP

3. RRP  
4. RRR

5. hibrid RRP

# Schita unui robot SCARA



1. Coloana fixă anumeată de un motor
2. articulație de rotație
3. bază fixată ferm
4. braț interior
5. braț exterior
6. tija
7. TIP
8. efortor terminat
9. braț.

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  - joint variables  $\rightarrow$  ans. formeză un sp. articulațiilor,  $\tilde{R}$   
variabile în articulații (var. interne)

$n=4$ ,  $q_i : 1 \leq i \leq n$ ,  $q$ -mar.

$$q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ \dots \ q_n]^T$$

$P$ -pct. conculs - ceea ce ne interesează când fizice să se mișcă  
robotul

- lui  $P$  îi se asociază un set. ss. de coordonate

$z_u$  - aliniat cum se vede în fig (axe de mișcă:  $z_u(\bar{a})$ )

$y_u$  - aliniat cu dir. de închidere/deschidere a degetelor.  
- axă slide

$x_u$  - aliniat cu normala  $x_u(\bar{n})$

$\rightarrow$  un pct. are conur.  $x, y, z, y_1, p, r_e$ . (în robotică)

p.e. lui  $x$  pe dir.  $x_0y_0z_0$

- în mod. min. - 3 conur. ce exprimă rotație  $\rightarrow$  set Euler (set de  $*$ )

-  $y$  - yaw

-  $p$  - pitch

-  $r$  - roll

$x_0y_0z_0$  - ss. de coordonate al lumii, fix

$x_u y_u z_u$  - ss. de coordonate al robotului, ~~lumii~~, mobil, conculs.

- model geometric direct  
invers.

Integrare  $R_i$  cu sis. de V.A.

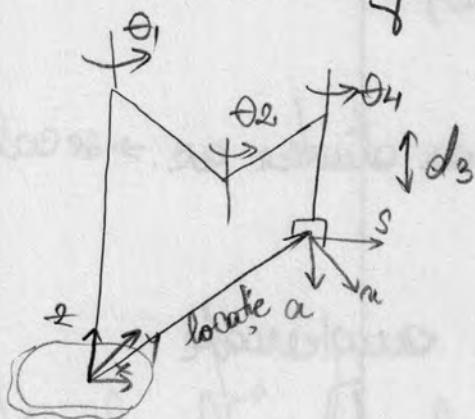
V.A. - vedere artificială

$R_i$  - robot industrial

Cinematică directă

- plecând de la fiecare articulație ~~rotatii~~ + info segment

$\Rightarrow$  CD.  $\Rightarrow$  cu geometrie pot să det. locație {pozitie  
orientare}



articulație

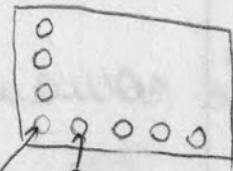
~~rotatii~~

+ info segment

a = 2

n = normală pe pl. celor 2 degete ale gripperului

slide = dist. în care se deschide/inchide gripperul.



$P(poz. ob)$   $\rightarrow$  poz celelalte obiecte sunt calc

( $x, y, z, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ )

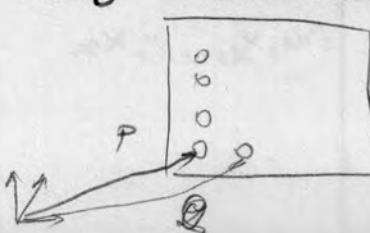
Cinematică inversă

- având o locație calculată anterior

HIM

$$\begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ P'_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$P'_{1 \times 3}$  - distorsiunea de perspectivă



$R_{3 \times 3}$  - matrice de rot

$P_{3 \times 1}$  - vect. de poz.

(rot pe x, rot pe y,  
rot pe z)

1 - factor de scalare

locatie + info seg  $\Rightarrow$   $\boxed{ci} \Rightarrow z_0, \dots, z_n$  (rezultă un set de rotatii absolute)

$z_i \rightarrow z_f$  (Ca să ajung la un  $z_{final}$  direct - cu  $z_{initial}$  treb.  
 $\Delta q$  să calc. un set  $\Delta q$ )

- treb. să calculeze mișc. în spațiu articulației - f. spl.  
 (st) - fct. pe baza  
 planur. axei conduceătoare  
 în sp. cartesian (Sc)

a) S.A.

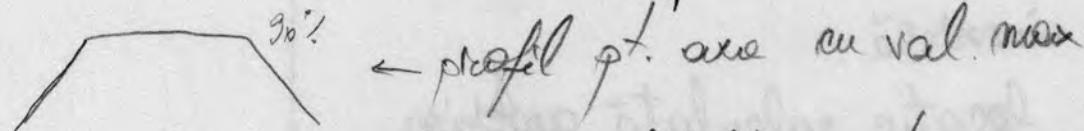
Aveam  $\Delta q_0, \Delta q_1, \dots, \Delta q_n \Rightarrow$  se alege max distanță ac.  $\Rightarrow$  se calc.  
 Ierarhia cel mai lung.

$\Delta q_1 = \max(\Delta q_0, \dots, \Delta q_n) \Rightarrow$  set de angrenaj

Angrenaj =  $\frac{\Delta q_0}{\Delta q_1}, 1, \dots, \frac{\Delta q_n}{\Delta q_1} \Rightarrow$  set de val subunit.

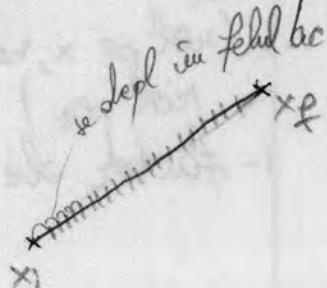
$\Rightarrow$  ce sunt trecute în leg. atașată la sfs. de comandă al  
 controlerului de mișc.

$\Rightarrow$  către fiecare axă se dă comandă ce axă să se deplasă cu  $\Delta q_1$ , scalată cu  $\frac{\Delta q_0}{\Delta q_1}$



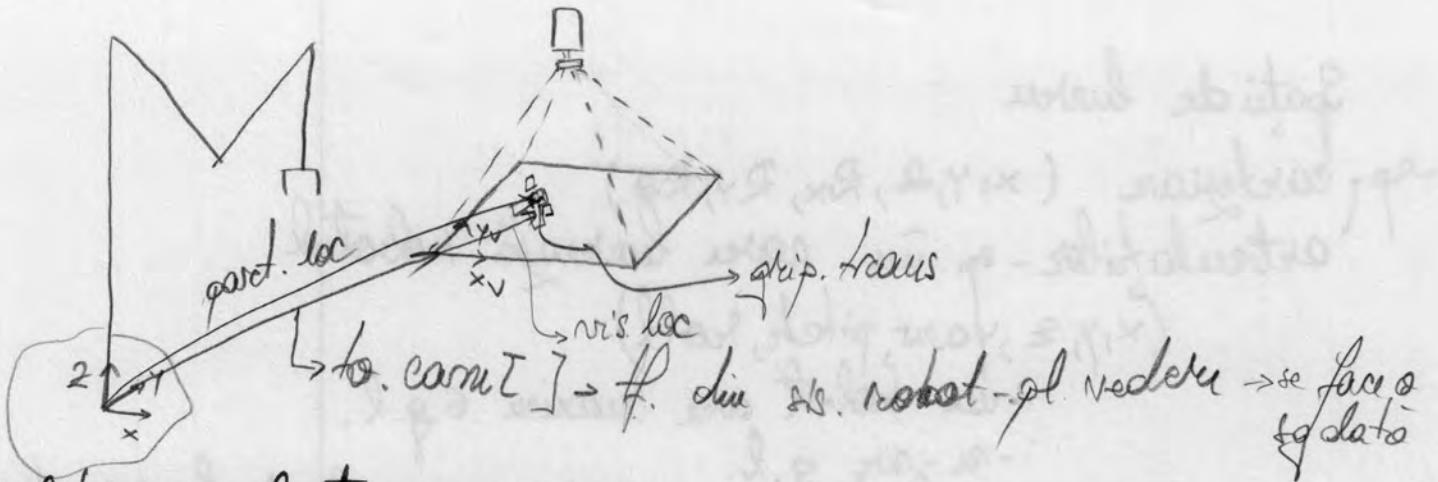
O axă este urmărită de celelalte axe (aceea urmărită este cea  
 cu val max)  $\Rightarrow$  planur. axei conduceătoare.

b) SP



- treb. să calc. distanță între un pct. initial și  
 altul final  $\Rightarrow$  se segmentează

- se gen. un vector de pct.  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$



- calibrare electro-mecanică
- calibrarea camerei
- calibrare camera - robot
  - se obt. rap: mm/pixel - ar treb. să fie cât mai mic.  
x/y - ar treb. să fie 1.
  - calibrarea se face de oricără ori se mișcă pl. vedere sau robotul
  - vis. loc ≠ din pl. vedere în centru de masă a obiectului
    - ↳ se calc. din toti pixelii celor  
conspurci
    - ↳ se calc. în mom. exe. prog.



→ un obiect → încadram ob. într-o elipsă  
- axă de inerție min fără mare  
a elipsei → trece prin centru de  
masă

- axe de inerție min - să orientăm obiectul
- grip. trans - se face off-line
- conur. color 3 ≠: po set part. loc = to. cam[cam]: vis. loc:  
grip. trans.
  - ↳ se referă la o  
cam. virtuală

## Spatiu de lucru

- sp. cartesian ( $x_1, y_1, R_x, R_y, R_z$ )
- articulatilor - sp. în care lucrașă robotul ( $x_1, y_1, z_1, yaw, pitch, roll$ )
  - un robot are maxim 6 g. l.
  - n - nr. g. l.
  - roboti cu  $> 6$  g. l. s. n. roboti hyper redundanti
- între cele 2 sp. ne mișcăm cu  $\alpha$ : CD și CI
- Comando mișc.
- pl. mișc  $\rightarrow$  invățarea pct. de interes
- gen. mișc  $\rightarrow$  parte sf!
- urmărirea traiectoriei

CD - de la articulații la  $x, y, z$   
     - are o sg. sol.

CI - de la  $x, y, z$  la articulații  
     - are mai multe sol.

Robot cartesian - precizie f. bună

Subiecte de examen

- tip roboti (descirete)
- comanda mișc.

$$\ast S_a = \sin \alpha$$

$$\ast C_a = \cos \alpha$$

# Spatii in robotica

← sp. experientă miscarea (3 sp)

1. Spatiul articulațiilor (pt. modelarea structurii care realizează miscarea) = sp. nr. interne

- n. dimensional

- vect. articulațiilor :  $z \in \mathbb{R}^n$ ,  $n = \text{nr. g. l.}$  articulație de translată
- $\exists$ :  $n=4$   $z = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]^T = [\underline{\theta_1}, \underline{\theta_2}, \underline{\theta_3}, \underline{\theta_4}]^T$  var. rotatice det. de artic. de rotație

- griperul poate avea un nr. de articulații  $\downarrow 1, (2)$

$r = \text{roll}$

$p = \text{pitch}$

$y = \text{yaw}$

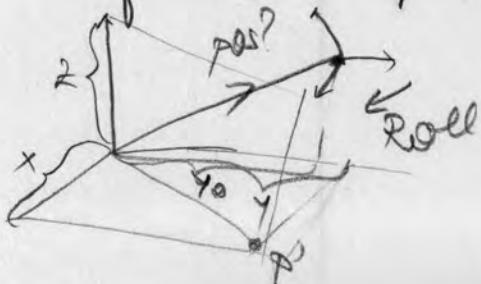
$1 \quad (r)$   
 $2 \quad (p, r)$   
 $3 \quad (y, p, r)$

- două modele - model cinematic direct (DK) fară leg.  
inverse (IK)  
alte sp. articulațiilor și sp. operational

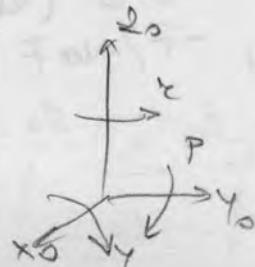
2. Spatiul operational (pt. descrierea aplicatiilor) - cas particular - sp. cartesian

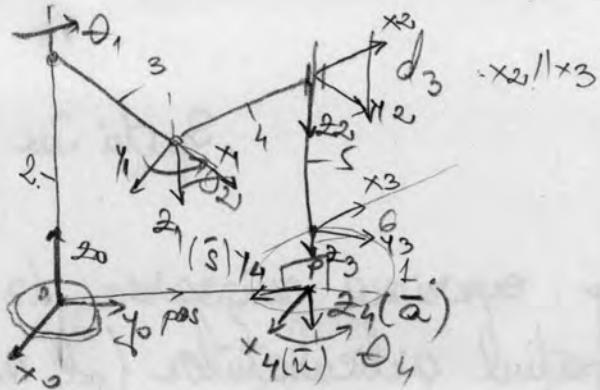
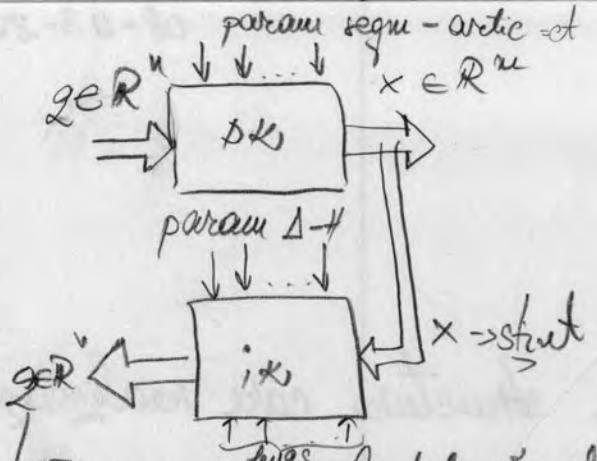
- nu dimensional

- vect pos și orientare care descrie miscarea :  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $n \neq n$  în general



- pos:  $\rightarrow x, y, z$ .  
 Rot:  $y, p, r$





1. end-effector → end-tip-point

2. link<sub>0</sub> = segment 0

3. link<sub>1</sub>

4. link<sub>2</sub>

5. link<sub>3</sub>

6. link<sub>4</sub>

P - pct. la marg. degetelor  
(→ translatează la capătul  
stării bunei sau mălaii  
în care funcționează robotul)

P - pct. la marg. degetelor  
(→ translatează la capătul  
stării bunei sau mălaii  
în care funcționează robotul)

- Roll: orientarea a pct.  $P_{x_4 y_4 z_4}$   
față de ~~Oo~~  $O_o x_o y_o z_o$

- 1g. l < 1 link - 1 joint

- param. segm.-artic s. u. param. Denavit-Hartenberg (1950)

~1980 Paul, Luk, Walker → alg ALSPA. → Vărate cum se

$x_1, x_2, x_3$  - în prelungirea brațelor robotului

$y_1, y_2, y_3$  - axiale

expunere misc.  
sist. de coord  
în vec. fct. de  
sc i-1

$$SC_1 \leftarrow SC_0$$

$$SC_2 \leftarrow SC_1$$

:

$$SC_n \leftarrow SC_{n-1}$$

$$SC_n \leftarrow f(SC_0)$$

- feugis - indicatori binari, ce săn. u. configurații

- L/R (left-right)

- U/D (elbow up-down)

- F/noF (flipp-no-flipp)



Problematice conducere (control automat) a mișcării

- 3 procese:
  - planificare (planning)
  - t.c. | generarea traiectoriilor (trajectory generation)
  - | realizarea (menținere/reglarea traiectoriei) (trajectory tracking)

- mișc. robotului - realizează peste segmente de mișcare. def.  
prim → pct. initial  
→ pct. final  
specificație căii (dorn) - geometrie  $\leftarrow$  path

$$\text{linie dreaptă} \times \text{arc} \rightarrow (\theta_{1f}, \theta_{2f}, \theta_{3f}, \theta_{4f})$$

$P_i$  - curvă limitată în sp. articulațiilor  
 $(\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i})$

$$\theta_{1i} - \theta_{1f}$$

$$\theta_{4i} - \theta_{4f}$$

$$\Delta \theta_i = \max_{i \in \{1, 2, 3, 4\}}$$

$$r_i = \max$$

$$v_i = r_i \cdot \frac{\Delta \theta_i}{\Delta \theta_i}$$

- la automate programabile se execută

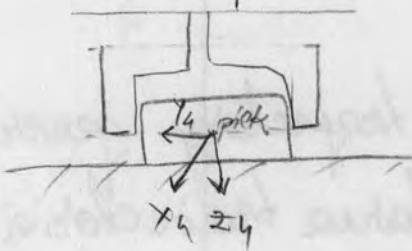
RN (reglare numerică)

Motion Control

- N: 7531 - 8 axe de mișcare - electronic gearing = "axă condu-



- $p_i, p_f$  - se obtin prin învățare pet robot (la vedere artificiale și să se extimează)



HERE pick → un pet. în sp. operational

HERE + pick →  $x, y, z, Rx, Ry, Rz$  - transf. relativă  
pos roll

→ pet de precizie

$p_i$  + orientare = amplasament = "pet robot" = locație

$$q \xrightarrow{dk_i} x$$

$dk_i$  - cinematică directă implicită

$$dk_e - \xrightarrow{\quad} \text{explicită}$$

Obs:  $dk_i$  - var. numerică a lui  $dk$

pet. de precizie îi corespunde ans  $q_1 \dots q_n$  (val. var. numerice)

$$\overline{HTM} \leftarrow dk_e$$

Instrument operational

$$\overline{HTM} \rightarrow \begin{bmatrix} \text{Rot} & \text{pos} \\ f_1 & f_2 & f_3 \end{bmatrix}_{4 \times 4}$$

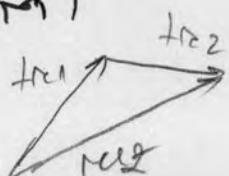
fară vedere  $f_1 = f_2 = f_3 = 0$   
cu vedere  $f_1 \neq f_2 \neq f_3 \neq 0$

$$\text{Rot} = [\bar{u} \ \bar{s} \ \bar{a}] = \begin{bmatrix} u_x & s_x & a_x \\ u_y & s_y & a_y \\ u_z & s_z & a_z \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$90^\circ$

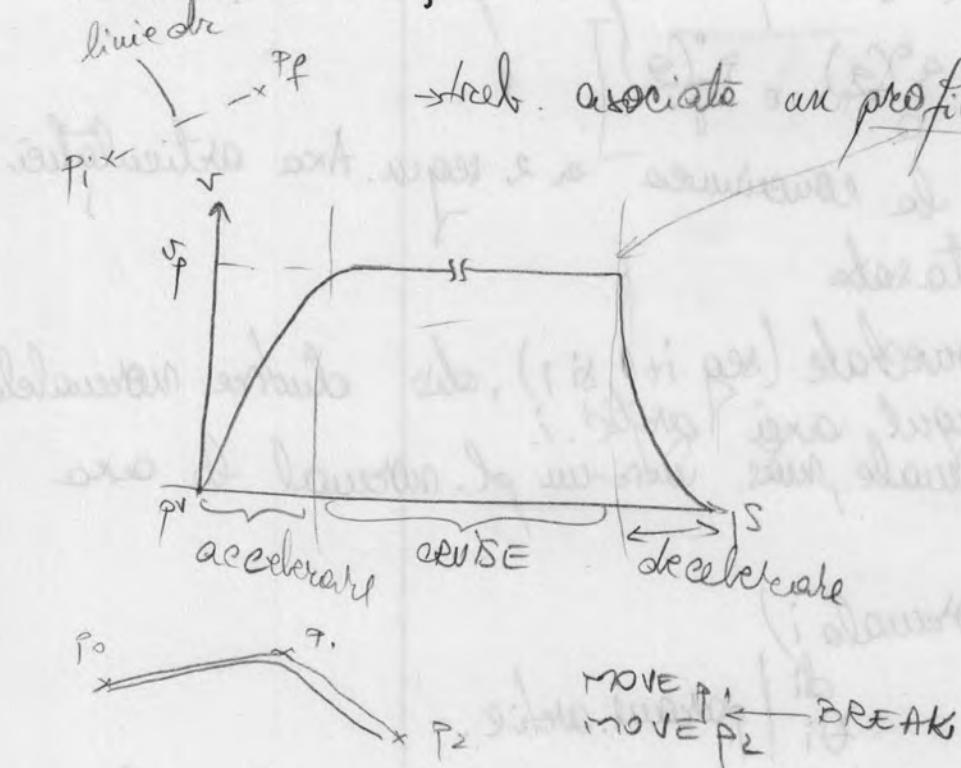
$$\begin{aligned} u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 &= 1 \\ s_x^2 + s_y^2 + s_z^2 &= 1 \\ a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 &= 1 \end{aligned}$$

Compoziție transf. de precizie pick : stack =  $\cdot \cdot \cdot \cdot HTM$   
(compoziție a 2 tf. în secvență înmulțirea cu matricele  $HTM$ )



$$HTM_1 \cdot HTM_2$$

Generarea mișc.



← contr. o mulțime de jet export

cale + profil miș = traiectorie

15-03-2012

### Cinematica directă (AK)

- robot: lant cinematic deschis
- 4.1. Sist. de coordonate ale seg. și param săi
- atașău fie căruia segm. un sist. de coord și il exprimău în fel de precedentul.
- scop DR: dăt poz și orientarea efectoarei terminal ca o fel. de var. articulațiilor.
- Poz. și orientarea unui corp rigid rel. la sist. de coord  $x_0 - y_0 - z_0$  sunt descrise cu:
  - poz. vect. de origine
  - vect. unitarii di eadreului atașat corpului

Fct. sunel. la casul de sunel se expr. prin HTM:

$$r = \begin{bmatrix} u^0(z) & s^0(z) & a^0(z) & r^0(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- axa articulatiei este st. la concavitatea a 2 regi. Axe articulatiei  
vin cu 2 normale atasate

- di: poz. rel. a 2 reg. conectate (reg i+1 si i), dist. dintre normalele  
mai s de-a lungul axei articulatiei;
- fi: ± altie. intre normale, mas. intre-un pl. normal la axe  
articulatiei;

$\theta_i$  (normale i-, normale i)

- ai:  $\left| \begin{array}{l} \text{param. regi.} \\ -\infty \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{l} \theta_i \\ \text{param. artic.} \end{array} \right|$

- ai: dist. min intre axele articulatiei i+1, mas. de-a lungul  
normalei comunice intre axele i si i+1

- xi = ± intre axele articulatiei i si i+1, mas. intre-un pl. pe q:  
 $x = \pm(z_{i+1} - z_i) \rightarrow$  unghi de torsionare

Obs: fiecare regi are 2 axe de articulatie in afara de 1 de  
extremul

#### 4.2. Reprez. Devarit-Hartenberg

P1 - met. matrice de st. sistematice a unui sis. de coord. atasat  
fiecarei regi.

P2 - HTM<sub>4x4</sub> descrie fiecare sis. de coord/ regi. in ordine in rap.  
cu sis. de coord. atasat regi-ant.

P3: prim comp; casul efect. terminal  $\Rightarrow f. \& exp. \text{ in coord.}$   
Dupa

P4: un sis. poate fi exp. pt. fiecare regi.

P5: - artie - 1 g. l.  $\Rightarrow (x_i, y_i, z_i)$  - pt. artie  $i+1$ , fixat pt. seg 1.

P6: -  $(x_i, y_i, z_i)$  este fixat în sequ. i și se mișcă solută cu sequ.

P7:

P8:

B) St. sis. de coord. ale sequ. și def. param. sale.  
Reg. pt. det. sis. de coord. ale sequ.

R1: • Axa  $z_{i-1}$  se află de-a lungul axei de mișc. a artie. i.  
• Dacă este loc. la intersecție  $z_i$  cu normalele comună la axele  $z_{i-1}$  și  $z_i$ .

R2: •  $x_i$  - normală la  $z_i$  cu sensul de la ea în afară (se alege de-a lungul normalicii comună la  $z_{i-1}$  și  $z_i$ , cu sensul artie  $i \rightarrow$  artie  $i+1$ )  
•  $y_i$  - complexează sis. octonormal de înăuntru ob.

Obs: - dc. 2 axe de artie coase. sunt paralele, normale nu este unică, o alegem noi.

- dc.  $z_{i-1}$  și  $z_i$  concurență  $\Rightarrow$  sensul lui  $x_i$  este arbitrar.
- ult. sis. de coord poate fi plasat oricărui în mijloc,  
sq. coud:  $x_i$  normală la  $z_{i-1}$
- $O_o - x_0 y_0 z_0$  ( $\forall$ ) în baza suport, sq. coud.  $z_0$  să fie aliniată cu  $z_i$  normală.
- De asemenea pt. așezarea sequ. de coord/sequ. și calc. de param.

Pas 1: - se st. sis. octonormal de coord, de înăuntru ( $x_0 y_0 z_0$ ) la baza suport, cu  $z_0$  de-a lungul axei de mișc. a artie. i și indicând către unulul robotului.

- axele  $x_0$  și  $y_0$  pot fi st. convenabil și sunt normale  
la  $z_0$ :  $(x_0 + z_0, y_0 + z_0)$

Pas 2: Pt.  $i = 1 : n$  exec pas 3-6

Pas 3: St. axei articie. cu axe oblique (ele sunt sau oblique)  
a artic (i+1)

Pas 4: St. originii SC<sub>i</sub>(O<sub>i</sub>): - loc O<sub>i</sub> la intersecția  $z_{i-1}$ ,  $x_i$ ,  
sau la intersecție (normale cu  $z_i$ ,  $z_{i-1}$  și axe  $z_i$ )

Pas 5: St. axei  $z_i$ :  
- st.  $x_i = \pm \frac{(z_{i-1} \times z_i)}{\|z_{i-1} \times z_i\|}$ , sau de-a lungul normală  
cu. la  $z_{i-1}$ ,  $z_i$  col. cu  $z_{i-1} \parallel z_i$

Pas 6: St. axii  $y_i$  după reg mărimii ob.

$$\text{Asgnati } y_i = + \frac{(z_i \times x_i)}{\|z_i \times x_i\|}$$

Pas 7 - St. sc al urmării:

% de obicei, artic. nu este de rot. și consideră la obicei  
lungul alt. artic.  $z_{i-1}$ , și vindicănd chispre (concreat)  
robot în a face.

- st.  $x_u$  a. r.  $x_u + z_{u-1}, x_u + z_u$ . Asigurăți-vă pt.  
a completa sc de urmă ob.

Pas 8: St. paralel. articie și ~~se~~ sequ.

Pt.  $i = 1 : n$  exec pas 9-12

Pas 9: Calc.  $d_i = \text{dist}(O_{i-1}, z_{i-1} \cap x_i) / \text{de-a lungul axei } z_{i-1}$

Pas 10: Calc.  $a_i = \text{dist}(z_{i-1} \cap x_i, O_i) / \text{de-a lungul axei } z_{i-1}$

Pas 11: Calc  $\theta_i = \overbrace{x_{i-1} \cap x_i}^{\text{în jurul axei } z_{i-1}}$

Pas 12: Calc.  $\alpha_i = \overbrace{z_{i-1} \cap z_i}^{\text{în jurul axei } x_i}$

4.4 Proces de op. pt.-SK cu HTM

- se deschide + HTM pt.-Q raportă SC<sub>i</sub> la SC<sub>i-1</sub>
- în fct. de urmăz.

A) segnu. (i-1) și i - artic. de rot. - 1 sg q.l.

- SC de ref: O<sub>i-1</sub> x<sub>i-1</sub> y<sub>i-1</sub> z<sub>i-1</sub>

- SC mobil: O<sub>i</sub> x<sub>i</sub> y<sub>i</sub> z<sub>i</sub>

- sevr. de f: 2. rot. în jurul axei z<sub>i-1</sub> cu dist. a altuia axei x<sub>i-1</sub> cu axa x<sub>i</sub> (x<sub>i-1</sub> || x<sub>i</sub> și vîndică ac sens)

1. tranz. de-a lungul axei z<sub>i-1</sub> cu dist. d<sub>i</sub> pt. a face să coincidă x<sub>i-1</sub> cu x<sub>i</sub>

3. tranz. de-a lungul axei x<sub>i</sub> cu dist. a pt. a face să coincidă cele 2 origini O<sub>i-1</sub>, O<sub>i</sub>, cît și axa x<sub>i-1</sub> cu x<sub>i</sub>.

4. rot' cu x<sub>i</sub> în jurul x<sub>i</sub> pt. a face să coincidă cele 2 sis. de coord SC<sub>i-1</sub>, SC<sub>i</sub>

$$A_i^{i-1} = T_{2-d_i} \cdot T_{2-d_i} \cdot T_{x_i, a_i} \cdot T_{x_i, \alpha_i} = T_{2-d_i} \cdot T_{2-d_i} \cdot T_{x, a} \cdot T_{x, \alpha} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0_2 & 0_2 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0_2 & 0_2 \\ 0_2 & 0_2 & 1 & 0 \\ 0_2 & 0_2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C^{\text{rot}} = \cos, S^{\text{rot}} = \sin.$$

Inversa este fol. la ci.

$$\underline{\text{Obs}} \quad \therefore [A_i^{i-1}]^{-1} = A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 & -\alpha_i \\ -s\theta_i c\alpha_i & c\alpha_i c\theta_i & s\alpha_i & -d_i s\alpha_i \\ s\alpha_i s\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & c\alpha_i & -d_i c\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \text{inverse este } (A_i^{i-1})^T$$

• în  $A_i^{i-1}$  și  $A_{i-1}^i$ ,  $\alpha_i, \alpha_i, \alpha_i, d_i$  sunt ct, în funcție că  $\theta_i$  este var. artic. de rot. (pt. că artic. de rot. are un sg. q-l)

b) Artic. de trans - segm  $(i-1)/i$  conectate printr-o artic de trans.  
- Var. este  $\alpha_i \Rightarrow \alpha_i, \alpha_i, \theta_i$  sunt ct.

$$\Rightarrow A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & 0 \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_i \end{bmatrix} = T_2, d \cdot T_2, \theta \cdot T_2, \alpha.$$

$\alpha_i = 0$  pt. segm. consec. conectate printr-o artic. gisnătice

### Ec. cinematičă

$$T_i^Q = \prod_{j=1}^i A_j^{j-1} = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i^o & p_i^o \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, i=1:n$$

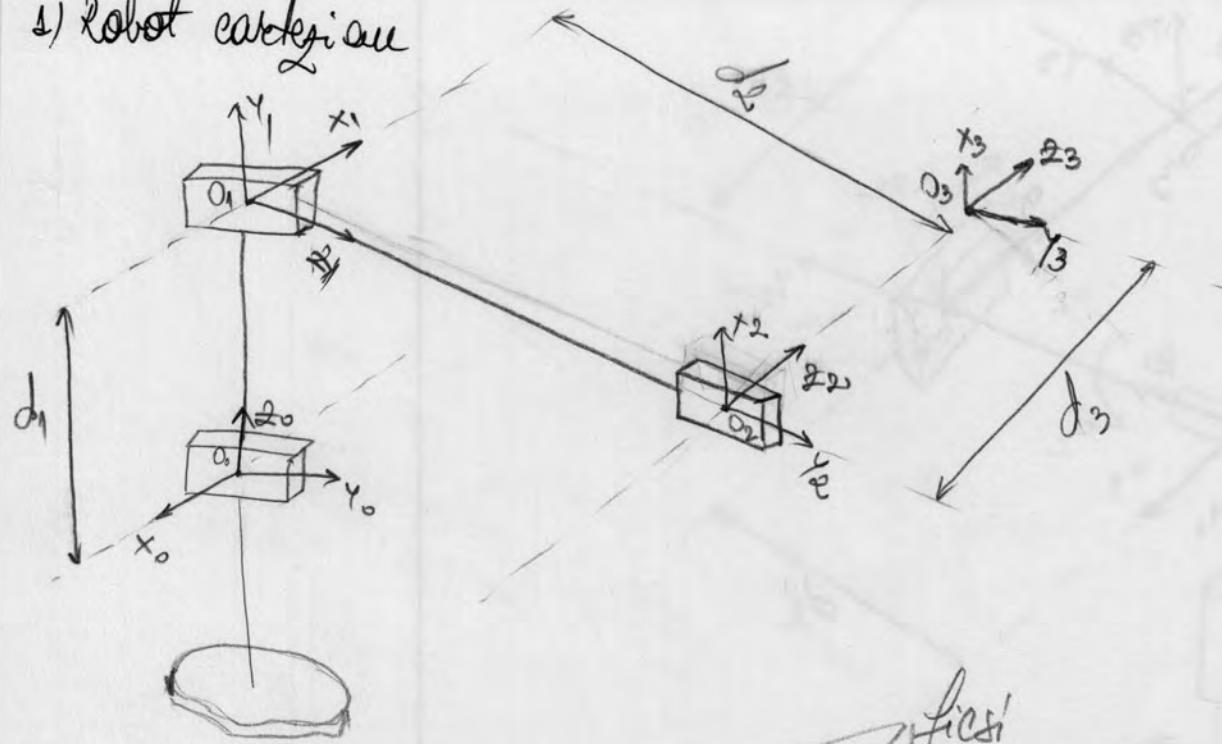
$$T_i^o(Q) = A_1^o(Q_1) \cdot A_2^o(Q_2) \cdots A_i^{i-1}(Q_i)$$

$[x_i \ y_i \ z_i]$  = matrice de orientare a scăzut seg  $S_b$ .  
 $p_i$  - rect. de poz.

- Când treb. calc. parcur. D-H treb. să facem tabelul

Joint / tip	link	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$

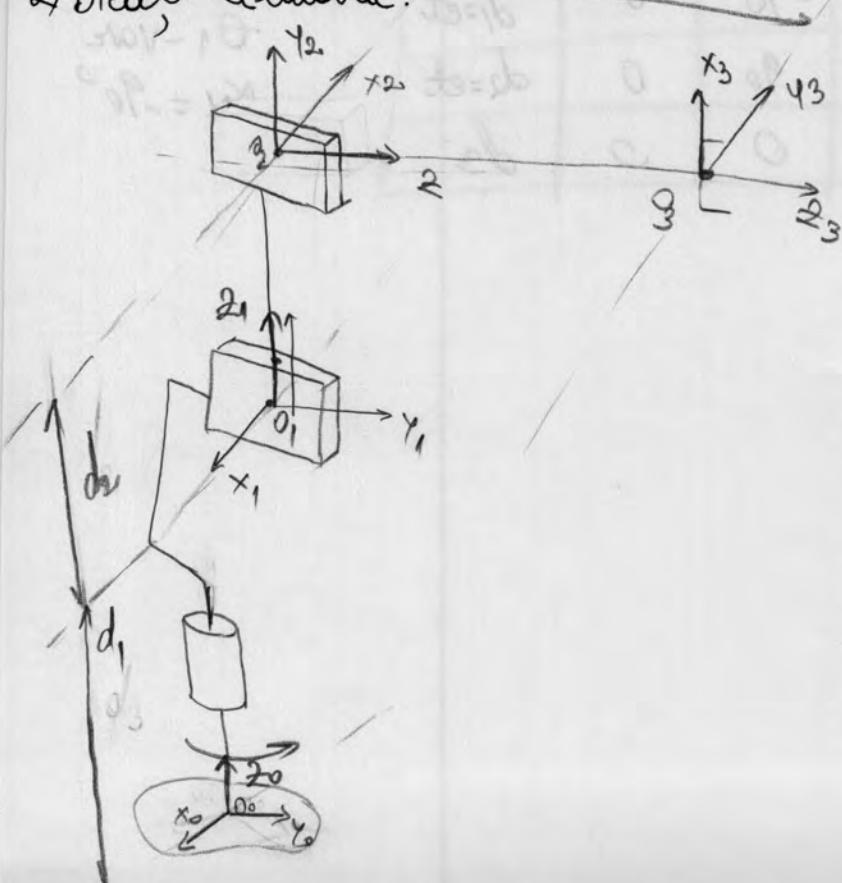
## 1) Robot cartesian



Joint Type	link	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$
1/prismatic	1	$180^\circ$	$90^\circ$	0	$d_1$
2/prismatic	2	$90^\circ$	$90^\circ$	0	$d_2$
3/prismatic	3	0	0	0	$d_3$

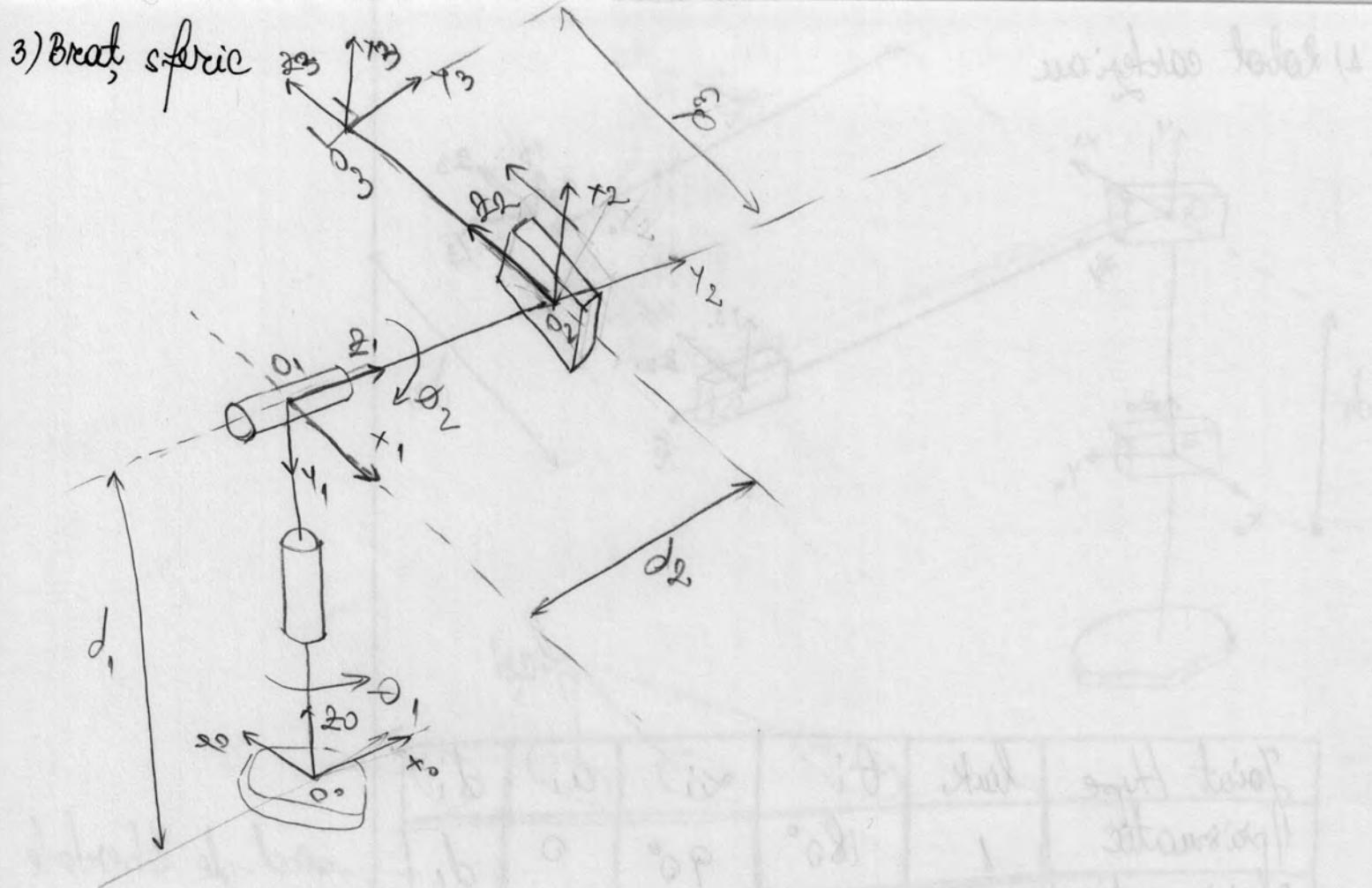
grad. de libertate

## 2) Braț cilindric.



Joint Type	link	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$
1/rotatie	1	$\theta_1$	0	0	$d_{fix}$
2/prismatic	2	$180^\circ$	$90^\circ$	0	$d_2$
3/prismatic	3	0	0	0	$d_3$

f. că se translațoază



Joint / Type	link	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$
1		$\theta_1$	$-90^\circ$	0	$d_1 = \text{ct}$
2		$\theta_2$	$90^\circ$	0	$d_2 = \text{ct}$
3		$-90^\circ$	0	0	$d_3$

$$\begin{aligned}
 d_1 &= \text{ct} \\
 q_1 &= 0 \\
 \theta_1 &- \text{var} \\
 \alpha_1 &= -90^\circ
 \end{aligned}$$

# PROGRAMAREA ROBOTILOR INDUSTRIALI

## CURS 4

- Definitie : Scopul Cinematicii Directe (DK) este de a determina pozitia si orientarea efectelor terminali ca o functie de variabilele articulatiilor.
- Pozitia si orientarea unui corp rigid (efectorul terminal) relativ la sistemul de coordonate de referinta  $O_0x_0y_0z_0$  sunt descrise ca:
  - pozitia vectorului de origine, si
  - vectori unitari ai cadrului (sistemul de coordonate) atasat corpului, relativ la cadrul de referinta.
- Functia DK relativa la cadrul de referinta  $O_0x_0y_0z_0$  este exprimata prin HTM:
 
$$T^0(q) = \begin{bmatrix} n^0(q) & s^0(q) & a^0(q) & p^0(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 cu:
  - $n$ ,  $s$ ,  $a$  – versori cadrului atasat gripperului
  - $p$  – vectorul de pozitie al originii  $O_G$  al cadrului atasat gripperului relativ la originea  $O_0x_0y_0z_0$ .

- $d_i$  : pozitia relativa a 2 segmente conectate (segmentele  $i-1$  si  $i$ ), adica distanta dintre normale masurata de-a lungul axei articulatiei  $i$ ;
- $\theta_i$  : unghiul articulatiei intre normale, masurat intr-un plan normal la axa articulatiei  $i$ .  

$$\theta_i = \text{normala}_{i-1}, \text{normala}_i$$
- $a_i$  : distanta minima intre axele articulatiilor  $i$  si  $i+1$ , masurata de-a lungul normalei comune intre axele  $z_i$  si  $z_{i+1}$ .
- $\alpha_i$  : unghiul intre axele articulatiilor  $i$  si  $i+1$ , masurat intr-un plan perpendicular pe  $a_i$   

$$\alpha_i = z_{i-1}, z_i$$

## 4. Cinematica Directa

### 4.1. Sistemul de coordonate al segmentului si parametrii sai

Fie un manipulator avand  $(n+1)$  segmente interconectate prin  $n$  articulatii (vezi Fig. 1) :

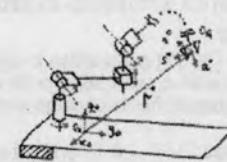


Fig. 1 Descrierea pozitiei si orientarii sistemului de coordonate al efectuatorului terminal

- Axa articulatiei (pentru articulatia  $i$ ) este stabilita la conexiunea a 2 segmente (vezi Fig. 2). Axa articulatiei va avea 2 normale atasate, cate una pentru fiecare segment.

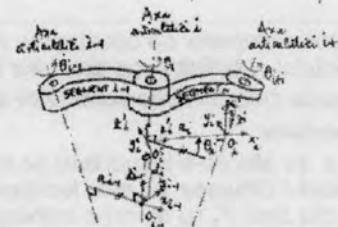


Fig. 2 Sistem de coordonate atasat segmentului si parametrii sai

### Interpretare:

- $d_i$  si  $\theta_i$  : parametrii articulatiei, sunt distanta si unghiul intre segmente adiacente (determina pozitia relativa a 2 segmente consecutive).
- $a_i$  si  $\alpha_i$  : parametrii segmentului, sunt lungimea si unghiul de rasucire ai segmentului  $i$  (determina structura segmentului  $i$ ).

### Observatie:

- 2 axe de articulatie sunt stabilite la ambele capete ale unui segment.
- Semnificatia cinematica a segmentelor rigide este aceea ca ele mentin o configuratie fixa intre articulatiile lor.

## 4.2. Reprezentarea Denavit-Hartenberg

### A) Principii de baza:

- **P1.** Metoda D-H (1955) reprezinta o metoda matriciala de stabilire sistemica a unui sistem de coordonate (cadru atasat corpului) atasat fiecarui segment al unui lant articulat.
- **P2.** Reprezentarea D-H → o HTM<sub>4x4</sub> descriind fiecare sistem de coordonate/segment in articulatie in raport cu sistemul de coordonate atasat segmentului anterior (mai aproape de baza).
- **P3.** Prin compunere (multiplicare matriceala), cadrul efectuatorului exprimat in "coordonate gripper" poate fi transformat si exprimat in coordonate baza.
- **P4.** Un sistem de coordonate Cartezian ortonormal ( $x_i, y_i, z_i$ ) se poate stabili pentru fiecare segment la axa articulatiei sale, unde  $i = 1, \dots, n, n = nr. g.d.l.$ , plus sistemul sistemul de coordonate al bazei ( $x_0, y_0, z_0$ ).

### B) Stabilirea sistemelor de coordonate ale segmentelor si definirea parametrilor lor

Reguli pentru determinarea sistemelor de coordonate ale segmentelor:

- **R1.** Axa  $x_i$  se afla de-a lungul axei de miscare a articulatiei  $i$ . Originea  $O_i$  este localizata la intersectia axei  $z_{i-1}$  cu normala comună la axele  $z_{i-1}$  și  $z_i$ .
- **R2.** Axa  $x_i$  este normală la axa  $z_i$ , și cu sensul de la ea în afara ( $x_i$  se alege de-a lungul normalei comune la axele  $z_{i-1}, z_i$ , cu sensul de la articulatia  $i$  la articulatia  $i+1$ ).
- **R3.** Axa completeaza sistemul ortonormal de mana dreapta.

In toate aceste cazuri, nedeterminarea poate fi exploitata, pentru a simplifica procedura de alocare a axelor; de exemplu, axele unor sisteme de coordonate pot fi facute paralele.

- $\theta, d, \alpha, a$ : parametri geometrici asociati fiecarei legaturi (segment); descriu complet orice articulatie de rotatie sau prismatica.
- Definitie  $\theta_i$ : unghiul articulatiei de la axa  $x_{i-1}$  la  $x_i$  masurata in jurul lui  $z_{i-1}$  (utilizand regula mainii drepte – pozitia cand rotatia este CCW).
  - Definitie  $d_i$ : distanta de la  $O_{i-1}$  la intersectia axei  $z_{i-1}$  cu axa  $x_i$ , masurata de-a lungul axei  $z_{i-1}$ .
  - Definitie  $a_i$ : distanta de offset de la intersectia axei  $z_{i-1}$  cu  $x_i$  la originea  $O_i$  a celui de al  $i$ -lea sistem de coordonate, masurata de-a lungul axei  $x_i$  (sau distanta cea mai mica dintre axele  $z_{i-1}$  cu  $z_i$ , sau distanta  $(O_i, O_i')$ )
  - Definitie  $\alpha_i$ : unghiul de offset de la axa  $z_{i-1}$  la  $z_i$ , masurat in jurul axei  $x_i$  (utilizand regula mainii drepte).

- **P5.** Deoarece o articulatie de rotatie are un singur g.d.l., fiecare sistem de coordonate ( $x_i, y_i, z_i$ ) al bratului robotului corespunde articulatiei  $(i+1)$ , si este fixat in segmentul  $i$ .
- **P6.** Sistemul de coordonate nr.  $i$  ( $x_i, y_i, z_i$ ) este fixat in segmentul  $i$ , si se misca odata cu segmentul  $i \Rightarrow$  Sistemul de coordonate  $n$  se misca odata cu mana (segmentul  $n$ ).
- **P7.** Sistemul de coodonate al bazei este definit ca sistemul de coordonate nr. 0 ( $x_0, y_0, z_0$ ).
- **P8.** Pentru un robot cu  $n$  axe, sunt  $(n+1)$  sisteme de coordonate :  $(x_0, y_0, z_0), \dots, (x_i, y_i, z_i), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ .

### Observatii:

- **O1.** Aplicand regulile R1-R3, exista libertatea de a alege locatia sistemului de coordonate  $O_0 - x_0, y_0, z_0$  oriunde in baza suport, singura conditie fiind ca axa  $z_0$  sa fie aliniata cu axa de miscare a primei articulatii.
- **O2.** Ultimul sistem de coordonate  $O_n - x_n, y_n, z_n$ , poate fi plasat oriunde in mana, singura conditie fiind ca axa  $x_n$  sa fie normala la axa  $z_{n-1}$ .
- **O3.** Daca 2 axe de articulatii consecutive sunt paralele ( $z_{i-1} \parallel z_i$ ), normala comună a lor nu este unic definita.
- **O4.** Daca 2 axe  $z_{i-1}, z_i$  sunt concurente, sensul lui  $x_i$  este arbitrar.

## 4.3. Algoritm pentru asignarea sistemelor de coordonate/segmente si calcul de parametri

- Pas 1: Se stabileste sistemul ortonormal de coordonate, de mana dreapta ( $x_0, y_0, z_0$ ) la baza suport, cu  $z_0$  de-a lungul axei de miscare a articulatiei 1 si indicand catre umarul robotului. Axele  $x_0$  si  $y_0$  pot fi stabilite convenabil, si sunt normale la  $z_0$ :  $(x_0 \perp z_0, y_0 \perp z_0)$
- Pas 2: Initializare bucla.  
Pentru fiecare  $i, i = 1, 2, \dots, n$ , execută pașii 3-6.
- Pas 3: Stabilirea axei articulatiei cu axa de miscare (de rotatie sau de translatie) a articulatiei  $(i+1)$ .
- Pas 4: Stabilirea originii  $SC_i(O_i)$ :  
Localizarea  $O_i$  la intersectia  $z_{i-1}$  cu  $z_i$ , sau la intersectia (normala comună a  $z_i, z_{i-1}$  si axa  $z_i$ ).
- Pas 5: Stabilirea axei  $x_i$ .  
Stabilirea  $x_i = \pm \frac{(z_{i-1} \times z_i)}{\|z_{i-1} \times z_i\|}$ , sau de-a lungul normalei comune la  $z_{i-1}$ , atunci cand  $z_{i-1} \parallel z_i$ .

- Pas 6: Stabilirea axei  $y_i$ . Asignati  $y_i = +\frac{(z_i \times x_i)}{\|z_{i-1} \times x_i\|}$ , pentru a completa SC de mana dreapta.
- Pas 7: Stabilirea SC al mainii. De obicei, articulatia  $n$  este una de rotatie. Se considera  $z_n$  de-a lungul directiei axei  $z_{n-1}$ , si indicand din spate (catre exteriorul) robot in afara. Stabiliti  $x_n$  a.i.  $x_n \perp z_{n-1}$ ,  $x_n \perp z_n$ . Asignati  $y_n$  pentru a completa SC de mana dreapta.
- Pas 8: Stabilirea parametrilor articulatiilor si segmentelor. Pentru fiecare  $i, i=1, \dots, n$ , execută pașii 9-12.
- Pas 9: Calculul  $d_i$ :  

$$d_i = \text{dist}(O_{i-1}, z_{i-1} \cap x_i) |_{\text{de-a lungul axei } z_{i-1}}$$
- Pas 10: Calculati  $a_i$ :  

$$a_i = \text{dist}(z_{i-1} \cap x_i, O_i) |_{\text{de-a lungul axei } x_i}$$
- Pas 11: Calculati  $\theta_i$ :  

$$\theta_i = \hat{x}_{i-1}, x_i |_{\text{in jurul axei } z_{i-1}}$$
- Pas 12: Calcul  $\alpha_i$ :  

$$\alpha_i = \hat{z}_{i-1}, \hat{z}_i |_{\text{in jurul axei } x_i}$$

- A) Segmentele  $(i-1)$  si  $i$  conectate printr-o articulatie de rotatie
  - SC de referinta:  $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ ;
  - SC mobil:  $O_i x_i y_i z_i$
  - Secvența de transformari:
    - Rotatie in jurul axei  $z_{i-1}$  cu  $\theta_i$  pentru a alinia axa  $x_{i-1}$  cu axa  $x_i$  ( $x_{i-1} \parallel x_i$  si indica acelasi sens);
    - Translatie de-a lungul axei  $z_{i-1}$  cu distanta  $d_i$  pentru a face sa coincida  $x_{i-1}$  cu  $x_i$ ;
    - Translatia de-a lungul axei  $x_i$  cu distanta  $a_i$  pentru a face sa coincida cele 2 origini  $O_{i-1}, O_i$ ; cat si axa  $x$ ;

Observatii:

- 1) Inversa acestei transformari este:

$$[A_i^{i-1}] = A_{i-1}' = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 & -a_i \\ -s\theta_i c\alpha_i & c\alpha_i c\theta_i & s\alpha_i & -d_i s\alpha_i \\ s\alpha_i s\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & c\alpha_i & -d_i c\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- 2) In  $A_i^{i-1}$  si  $A_{i-1}'$ ,  $\alpha_i, a_i, d_i$  sunt constante, in timp ce  $\theta_i$  este variabila articulatiei de rotatie  $i$ .

#### 4.4. Procedura de operare pentru DK cu HTM

- Odata stabilite SC pentru fiecare segment, se poate dezvolta o HTM pentru a raporta  $SC_i$  la  $SC_{i-1}$ .
- In functie de reprezentarea a 2 segmente succesive, in relatie determinata de  $\theta, d, a, \alpha$  (Fig. 2), rezulta ca un punct  $p_i$  exprimat in  $SC_i$  poate fi raportat la  $SC_{i-1}$  cu  $p_{i-1}$ , prin executia urmatoarelor transformari succesive:

4. Rotatia cu  $\alpha_i$  in jurul  $x_i$  pentru a face sa coincida cele 2 sisteme de coordinate  $SC_{i-1}, SC_i$ .

Fiecare dintre operatiile 1, 2, 3, 4 poate fi exprimata printr-o HTM de baza si produsul acestor 4 transformari furnizeaza o HTM compusa:  $A_i^{i-1}$ , cunoscuta ca matricea de transformare D-H pentru sistemele de coordonate:  $i$  si  $(i-1)$ .

$$A_i^{i-1} = T_{z_{i-1}, \theta_i} \cdot T_{x_{i-1}, \alpha_i} \cdot T_{x_i, a_i} \cdot T_{z_i, d_i} = T_{z, \theta} \cdot T_{x, \alpha} \cdot T_{x, a} \cdot T_{z, d} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

- B) Segmentul  $(i-1), i$  conectate printr-o articulatie de translatie (prismatică). Variabila articulatiei este  $d_i$ , in timp ce  $\alpha_i, a_i, \theta_i$  sunt constante.

Rezulta:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & 0 \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_{z, \theta} \cdot T_{x, \alpha} \cdot T_{x, a} \quad (2)$$

- $a_i = 0$ , pentru segmente consecutive conectate printr-o articulatie prismatica.

Concluzie: Utilizand HTM  $A_i^{i-1}$ , un punct  $p_i$  in repaus in segmentul  $i$  si exprimat in coordonate omogene:

$$p_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T \text{ fata de } SC_p \text{ poate fi raportat } SC_{i-1} \text{ ca } p_{i-1} = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)^T \text{ prin:}$$

$$p_{i-1} = A_i^{i-1} p_i \quad (3)$$

## Ecuatia cinematica pentru roboti

- $T_i^0$  - matricea omogena ce specifica locatia  $SC_i$  fata de  $SC_{baza}$ ; este produsul transformarilor de coordinate successive de tip  $A_i^{i-1}$ , fiind:

$$T_i^0(q) = A_1^0(q_1) \cdot A_2^1(q_2) \cdots A_{i-1}^{i-1}(q_{i-1}) \cdot A_i^{i-1}(q_i) = \prod_{j=1}^i A_j^{j-1} = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_i^0 & P_i^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

pentru  $i=1,2,\dots,n$ , unde:

- $[x_i \ y_i \ z_i]$  = matricea de orientare a  $SC_i$  atasat segmentului  $i$ , relativ la  $SC_{baza}$ .

- $p_i$  = vectorul de pozitie de la originea  $SC_{baza}$  ( $SC_0$ ) la originea  $SC_i$ .

Pentru  $i=n=6$  se obtine matricea T (matricea bratului),  $T = A_{6nn}^0$ , care specifica pozitia si orientarea punctului terminal al manipulatorului relativ la  $SC_{baza}$ :

$$T = A_6^0 = \begin{bmatrix} x_6 & y_6 & z_6 & p_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_6^0 & P_6^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

cu:

$n$  – vectorul normal;

$s$  – vectorul de alunecare (sliding);

$a$  – vectorul de apropiere a gripperului.

## Aspecte de calcul a DK

Odata obtinute toate matricile de transformari de coordinate  $A_i^{i-1}$  pentru bratul robotului, metoda de calcul a lui T poate fi de tipul:

- a) Multiplicare manuala a celor 6,  $A_i^{i-1}$  si evaluarea elementelor matricei T explicit prin program/calculator.

Dezavantaj:

- 1) multiplicarea manuala laborioasa si
- 2) programul de calcul nu e flexibil – T este aplicabila doar unui robot particular, pentru un set specific de SC.

- b) Se introduce  $A_i^{i-1}$ ,  $i=1, \dots, 6$  in calculator care executa multiplicarea.

Dezavantajul: timp de calcul mult crescut.

Avantaj: metoda este foarte flexibila, general aplicabila.

- c) Compromis intre a) si b):

Inmultirea manuala:

- primele 3 matrici:  $T_1 = A_1^0 A_1^1 A_1^2$

- ultimele 3 matrici:  $T_2 = A_2^1 A_2^2 A_2^3$

Apoi se exprima de elementele lui  $T_1$  si  $T_2$  explicit intr-un program de calculator; programul inmulteste  $T_1 \cdot T_2 = T$  (calcul rapid, flexibilitate).

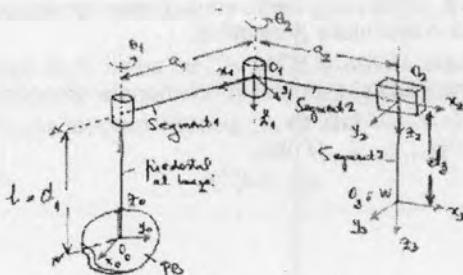


Fig. 3. Bratul SCARA

## 4.5. Studiu de caz: Brat SCARA

- Cele 2 segmente de lungimi  $a_1$  si  $a_2$  opereaza in plan orizontal  $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$  cu  $l = d_1$  este inaltimea piedestalului bazei.

- Un robot tip SCARA are bratul intotdeauna cu 2 articulatii de rotatie ce misca bratele 1 si 2 in plan orizontal, translatat cu 1 fata de planul bazei PB, o a 3-a articulatie prismatica misca segmentul 3 de-a lungul axei Carteziene z (Fig. 3)

### ■ Parametrii D-H:

Segment	Tip articulatie	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	1/Rot	$a_1$	$\pi$	$d_1$	$\theta_1$
2	2/Rot	$a_2$	0	0	$\theta_2$
3	3/Prism	0	0	$d_3$	0

- Din tabel rezulta:

$$A_i^0(\theta_i) = \begin{bmatrix} c_i & s_i & 0 & a_i c_i \\ s_i & -c_i & 0 & a_i s_i \\ 0 & 0 & -1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_1^1(\theta_1) = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_2^2(\theta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Rezulta:

$$T_1^0(q) = A_1^0 A_2^1 A_3^2 = \begin{bmatrix} c_{1-2} & s_{1-2} & 0 & a_1 c_1 - a_2 c_{1-2} \\ s_{1-2} & -c_{1-2} & 0 & a_1 s_1 + a_2 s_{1-2} \\ 0 & 0 & 1 & d_1 - d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, c_{1-2} = \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

## 4.6. Studiu de caz: Incheietura Sferica

- Fie structura incheieturii din Fig. 4. Variabilele articulatiilor au fost numerotate incepand cu 4 ( $\theta_4$  – yaw,  $\theta_5$  – pitch si  $\theta_6$  – roll):

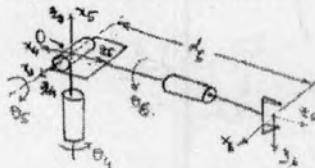


Fig. 4. Geometria bratului SCARA

### ■ Parametrii D-H:

Segment	Tip articulatie	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
4	4Rev	$\theta_1$	$\frac{\pi}{2}$	$d_1$	$\theta_4$
5	5Rev	0	0	$d_2$	$\theta_5$
6	6Rev	0	0	$d_3$	$\theta_6$

- Incheietura este sferică – toate axele de rotație  $z_i$  se intersecțează în același punct O:  $O = \cap z_4, z_5, z_6$
- Odată stabilite  $z_4, z_5, z_6$  și  $x_3$  aleși, există o nedeterminare în direcția lui  $x_4$  și  $x_5$ .

### ■ Rezulta:

$$A_4^t(\theta_4) = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_5^t(\theta_5) = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_6^t(\theta_6) = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^t(q) = \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6 & c_4 s_5 & c_4 s_5 d_4 \\ c_4 c_5 s_6 + c_6 s_4 & -s_4 c_5 s_6 + c_4 s_6 & s_4 c_5 & s_4 c_5 d_4 \\ -s_4 c_6 & s_4 s_6 & c_4 & c_4 d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 4.7. Studiu de caz. DK pentru Robotul IRB 1400 ABB

- IRB 1400 ABB este un robot articulat vertical, cu 6 g.d.l. Mobilitatea de orientare a efectoanelui terminal este completă - componenta yaw fiind data de combinația  $\theta_4 - \theta_5$ .
- In Fig. 5 este prezentata structura și modul de dispunere a motoarelor pentru robotul IRB 1400 ABB.
- Fig. 6 da reprezentarea geometrică, SC asociate și tabelul cu parametrii D-H.

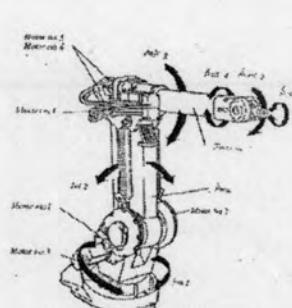


Fig. 5 Structura robotului IRB 1400 ABB

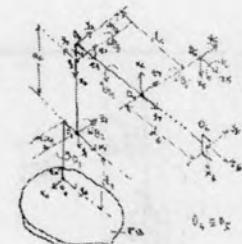


Fig. 6 Geometria robotului IRB 1400 ABB, alocarea SC

### ■ Parametrii D-H:

Tip articulatie	$a_i$	$\alpha_i$	$J_i$	$\theta_i$	Lanțe articulații
1/Rew	$\theta_1$	$\frac{\pi}{2}$	$d_1$	$\theta_1$	$-170^\circ \text{ si } 170^\circ$
2/Rew	$\theta_2$	0	0	$\theta_2$	$-70^\circ \text{ si } 70^\circ$
3/Rew	$\theta_3$	$\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_3$	$-25^\circ \text{ si } 25^\circ$
4/Rew	0	$\frac{\pi}{2}$	$d_4$	$\theta_4$	$-150^\circ \text{ si } 150^\circ$
5/Rew	0	$\frac{\pi}{2}$	0	$\theta_5$	$-115^\circ \text{ si } 115^\circ$
6/Rew	0	0	$d_6$	$\theta_6$	$-300^\circ \text{ si } 300^\circ$

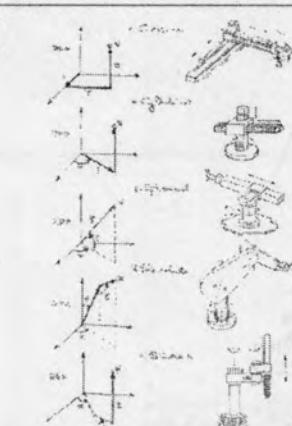


Fig. 7. Brate robot, g.d.l. si coordonatele interne

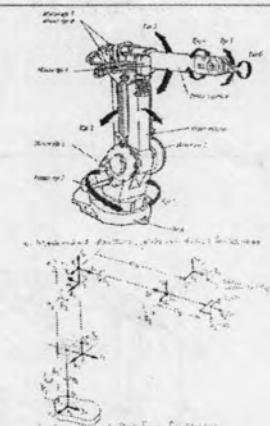


Fig. 9. Robotul IRB 1400 ABB

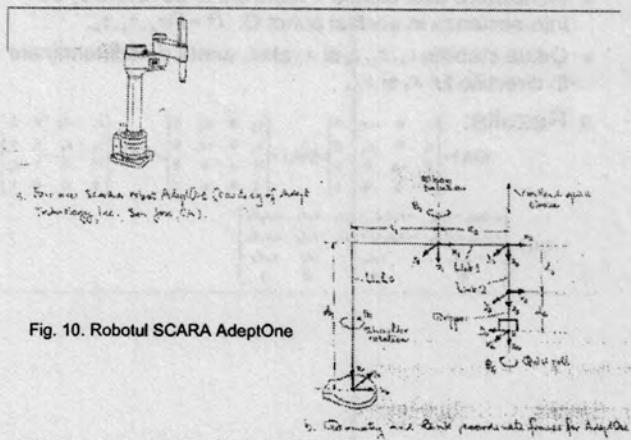


Fig. 10. Robotul SCARA AdeptOne

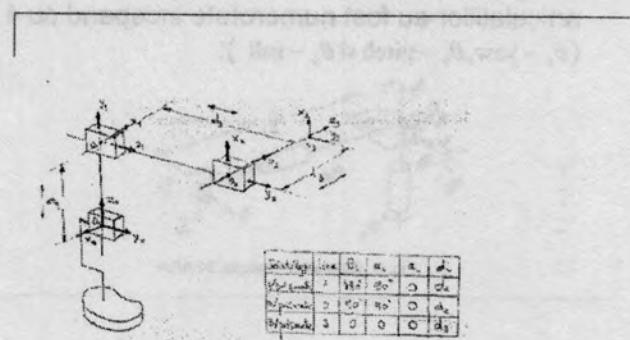


Fig. 11. Brat Cartezian

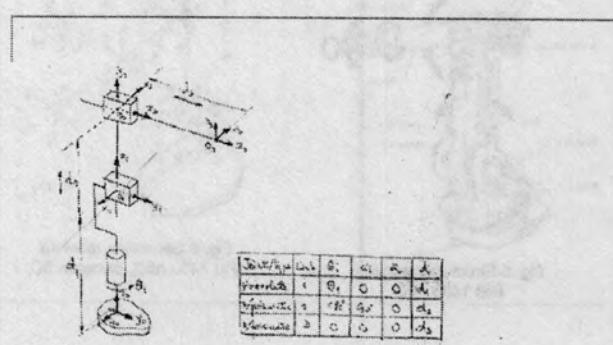


Fig. 12. Brat Cilindric

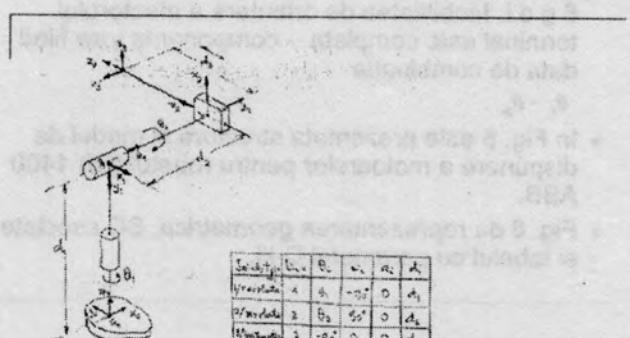


Fig. 13. Brat Sferic

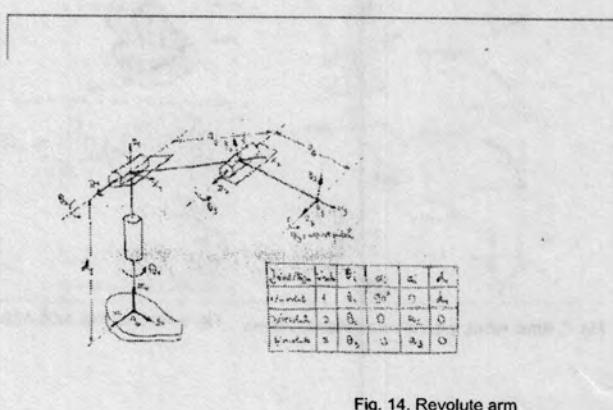


Fig. 14. Revolute arm

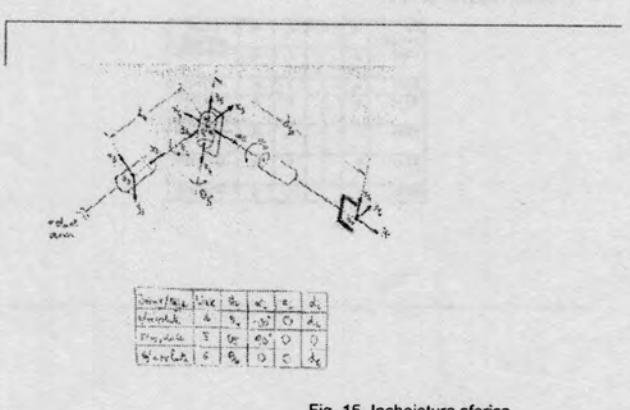


Fig. 15. Incheietura sferica

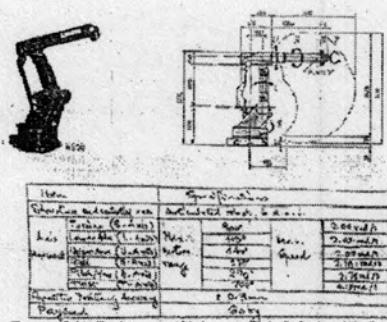


Fig.16. Robot Motoman K 605

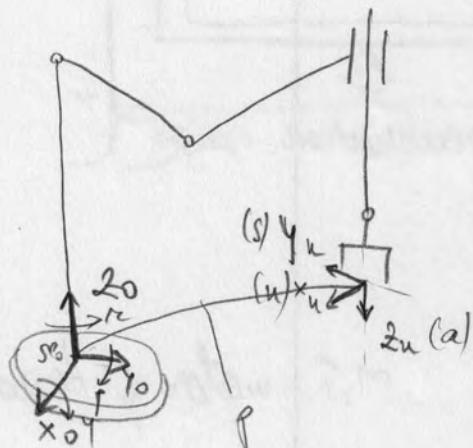
$T_u^o$  - HTM

$$T_u^o = \begin{bmatrix} R_u^o & | & P_u^o \\ 0^T & | & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{u}^* & \bar{s}^* & \bar{a}^* & \bar{p}^* \\ 0^T & | & 1 \end{bmatrix}$$

$*$  = det

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} \bar{u}_x \\ \bar{u}_y \\ \bar{u}_z \end{bmatrix}; \bar{s} = \begin{bmatrix} \bar{s}_x \\ \bar{s}_y \\ \bar{s}_z \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = p \begin{vmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix}$$



$Q \rightarrow T_u^o$  (CS implicite)

ALSPA (Luck-Paul-Walker)

(4) Asigurare SCi structurii robot

STRIFT (poz BY x, y, z)

(2)  $\theta_i, \underline{\alpha_i}, \underline{\alpha_i}, d_i$

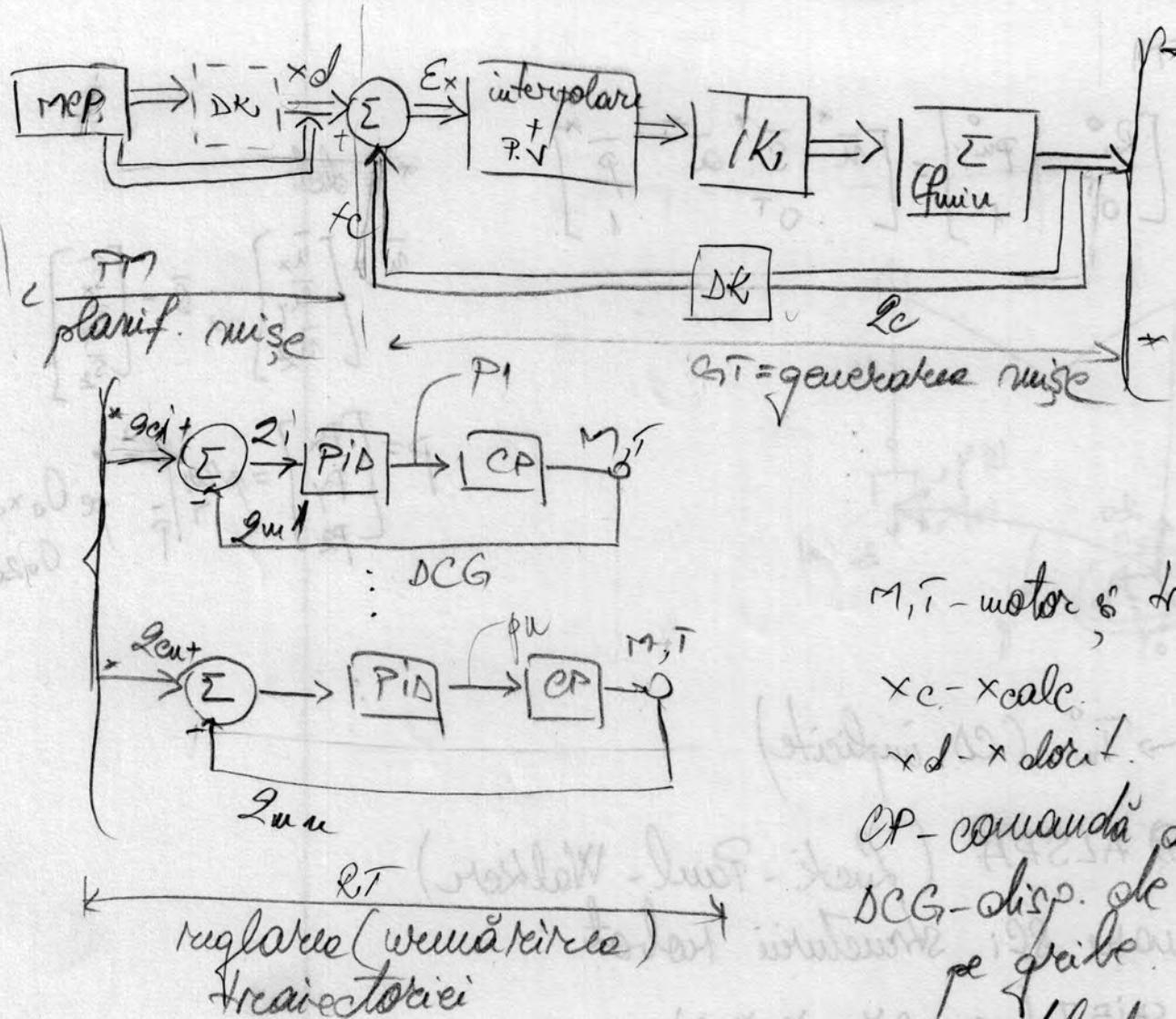
(3)  $A_i(z_i), 1 \leq i \leq n$ ,  $A_i$  - matricei de frânare  
rezultă  $CS_i$  - putem exprima o actie în fel. de cea  
anterioară

$$T_u^o = \prod_{i=1}^n A_i^{i=1}(z_i)$$

$x = dk(Q)$ ,  $Q$ -dat

$v^+$  → transformări relative

TRANS( $x, y, z; R_x, x, R_y, R_z$ )  
yaw pitch roll



$M, T$  - motor și treapta

$x_c$  -  $x_{calc}$

$x_d$  -  $x_{dorit}$

CP - comanda de putere

DCG - disp. de comandă

pe grile

P.V - profil de vîță

## Curelul 6

• Date tehnice: Cinematica directă (CD)

$g_1 \rightarrow$  peram A-H

$$g_m \rightarrow \mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$$

$$\# g \in \mathbb{R}^m$$

ap. Cartesian  $\Rightarrow$

$$\Rightarrow m=6$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix} \leftarrow$$

matrice  
dat de traducere

peram D-H:  $\theta_i, x_i, a_i, d_i \rightarrow$  număr de variabilă  
 $i \in \overline{1, n} \quad n = \# \text{grăd. l.}$

$x_m, y_m, z_m \rightarrow$  ne interesează peram

$\rightarrow$  pt către de rotație:  $g_i = \theta_i$

$\rightarrow$  pt către de translație (prismatică):  $g_i = d_i$

CD:  $\rightarrow$  două ~~trei~~ tipuri de implementare:

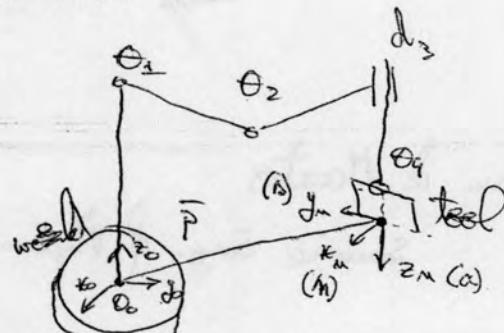
$$\textcircled{1} \quad \# T_m^0 = \begin{bmatrix} R_m^0 & P_m^0 \\ OT & 1 \end{bmatrix} \rightarrow$$

HTM

$$= \begin{bmatrix} \pi \bar{\alpha} \bar{\alpha} & \bar{P} \\ OT & 1 \end{bmatrix} \quad \text{sunt date}$$

$$\bar{m} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}$$

$$\bar{\alpha} \dots \bar{\alpha} \dots \bar{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \text{proj lui } \bar{P} \text{ pe } O_x x_0 y_0 z_0$$



CD implicata

ALSAA (Fehl - Paul - Khatib)

1. originea scării structurii robotului

2.  $\theta_i \rightarrow x_i \rightarrow a_i \rightarrow d_i$

3.  $A_i^{i-1}(g_i) \quad i \in \overline{1, n}$   
const merita

$\hookrightarrow$  matrice de trans.

$$\Rightarrow \boxed{T_m^0 = \prod_{i=1}^n A_i^{i-1}(g_i)}$$

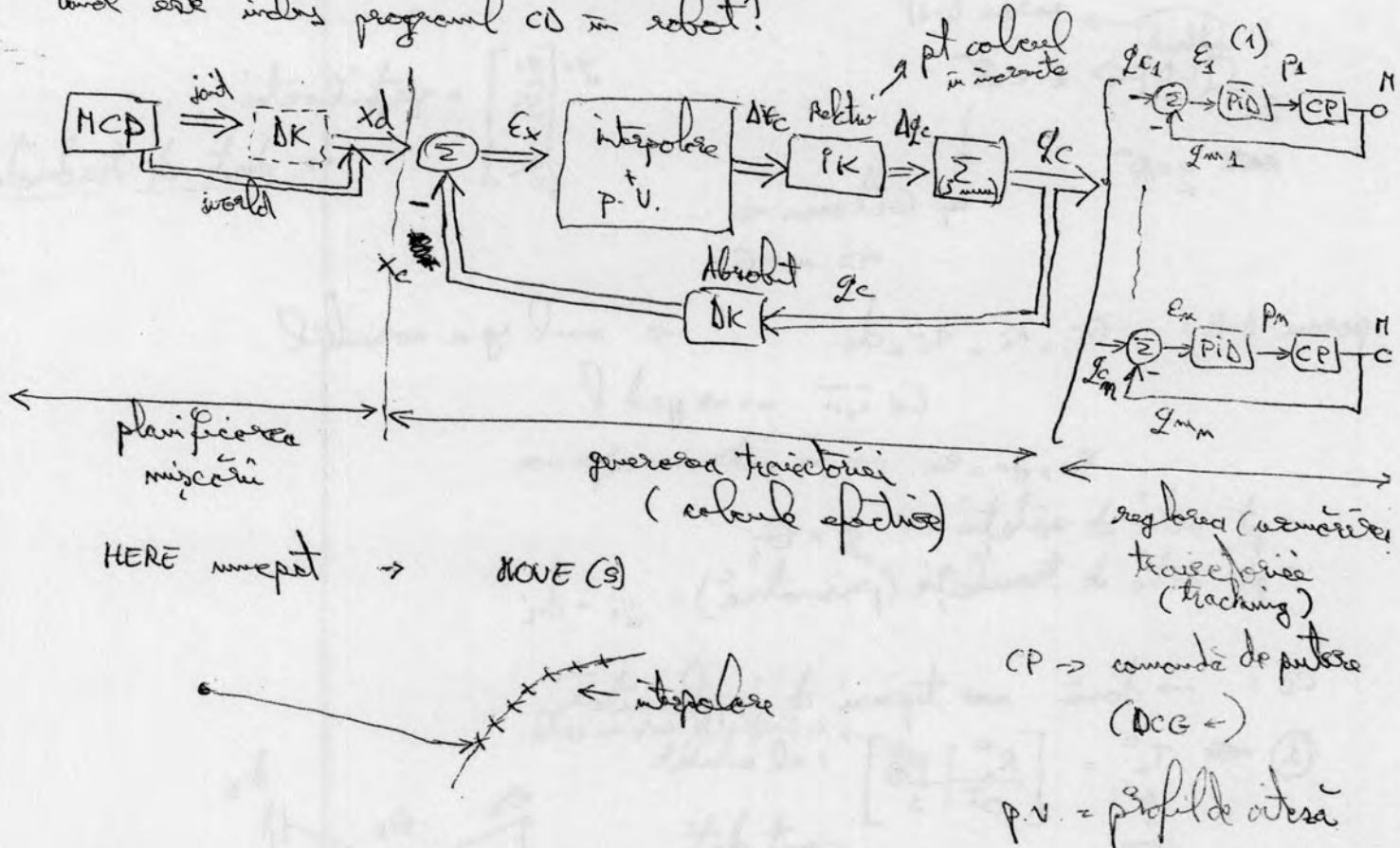
② CD explicită.

$\epsilon = \partial k(g)$  → în V<sup>+</sup> teorema relative.

TRANS (x, y, z, Rx, Ry, Rz)

(yaw) (pitch) (roll)

Unde este inclus programul CD în robot?

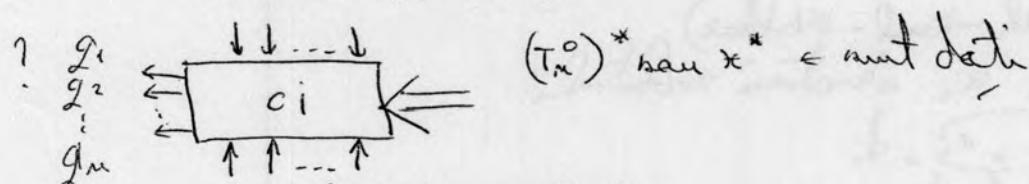


Program de Mărturie

Serviciu Eng. & Mgmt

### Cinematică inversă

Percheu B-H (diacantă)



Configuration (flags)

R/L U/D F/NF

Deci:  $\tilde{x}_n \neq (pozitia)$ , există variații?

1.  $\exists$ ? soluție
2. e unică?
3. metoda de căutare

Def 1:  $\exists$  soluție la prob de căi dacă  $x^*$  e punctul de destinație

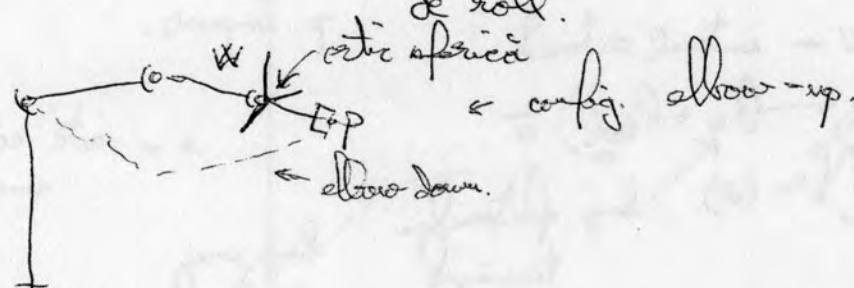
Def 2: sp de destinație = locul geom. al pct. din spațiu care pot fi atinse de robot cu  $\neq$  orientare.

ex: la rob. antropomorfic

se ref. la pctul conchus.

punctele de pe frontieră spațului de lucru (envelopa unei sfere) nu pot fi atinse decât ~~într-o~~ ~~sfere~~ într-o orientare

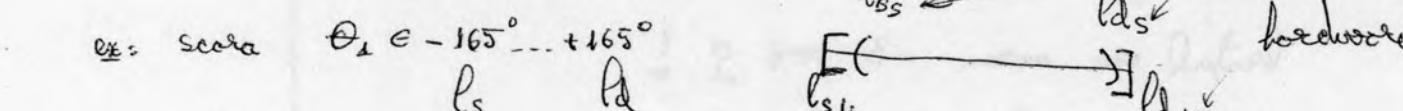
orientarea acă e date de 3 mobilități, orientarea la scară e date dezv. de roll.



1.  $\rightarrow$  date - de config. flags

limitează de curăț.

ex: scară  $\theta_1 \in -165^\circ \dots +165^\circ$



Dacă

~~rezultatul~~: abdul are 3 axe consecutive

care se intersectează în acel punct.

sună  $\hookrightarrow$  orice debot cu artic. sférica  $\rightarrow$  pctul de 1  $\neq$  pctul de 2

\* 3 axe consecutive II (arcă, antropomorfic etc)

$\Rightarrow$   $\exists$  și singură soluție!

↑ număr limitător de curăț.

## Metoda de colaj

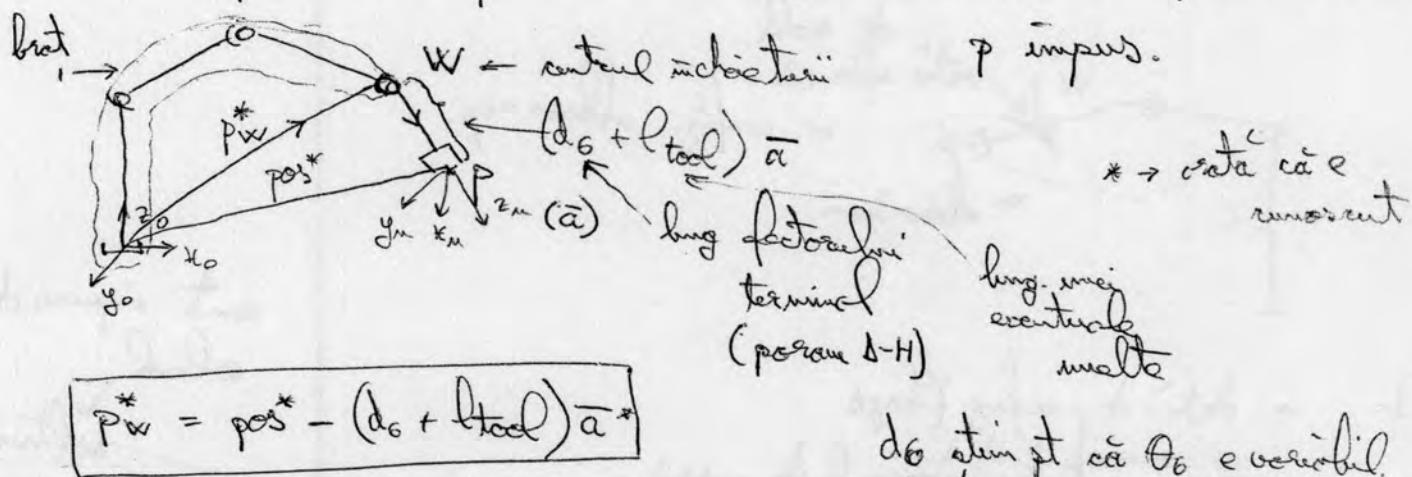
### (I) (G) Metoda geometrică

- presupune definirea unui patrulini semnificativ pe structura mecanică a robotului care permite:
- exprimarea locației colajului pe înțeles de amplasare.
  - doar al robotului ( $x^* \text{ sau } T^*_m$ )
  - exprimarea locației de un ar zedus de variabila  $z_i$ .
- ⇒ la colaj nu este specific patrulini ~~pentru~~ este  $W$   
 $W$  este în patrulini care separă bratul de factorul de terminal.

### Etope de colaj

1. Alegerea patrulini semnificativ  $\rightarrow W$

2. Expressarea amplasamentului lui  $W$  în fel de amplasamentul



bratul are mereu 3 val. g.!

$$T_3^0 = T_{wW}^0 = \prod_{i=1}^3 A_i^{i-1}(q_i)$$

↓

$$\begin{bmatrix} R_{wW}^0 & | & P_w^0 \\ 0^T & , & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_w = col_4 \text{ în } T_3^0$$

$$\Rightarrow col_4 \mid \prod_{i=1}^3 A_i^{i-1}(q_i) = pos^* - (d_6 + l_{tool}) \bar{\alpha}^*$$

$$\hookrightarrow q_1 > q_2 > q_3$$

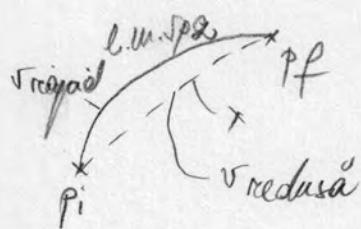
$$R_6^0 = R_3^0 \cdot R_6^3 \Rightarrow R_{6(m)}^0 = R_3^0 (q_1 > q_2 > q_3) \cdot R_6^3 (q_4, q_5 > q_6)$$

$$\Rightarrow R_6^3 (q_4, q_5 > q_6) = (R_3^0)^T \cdot R_6^{0*} \quad \text{d. i. stim}$$

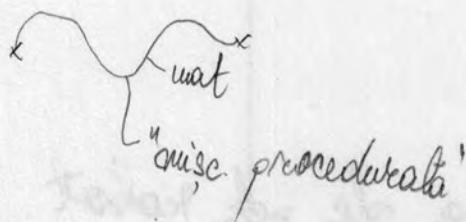
$\hookrightarrow$  am obținut.

Acum urmărește exemplu de colaj pe robot ~~sfărâz~~.

# I) Planificare traiectorii (drum, cale)



- p. g - sp. uferen.



- mîsc. procedurală - et: calcul mat. de desfere curbă approximare curbă mat. prin pet. suport  
- între 2 pet. suport se face o inter-  
polare liniară în 2

- interpolare liniară în 2 - cea mai puțin consumatoare de  
efort de calcul

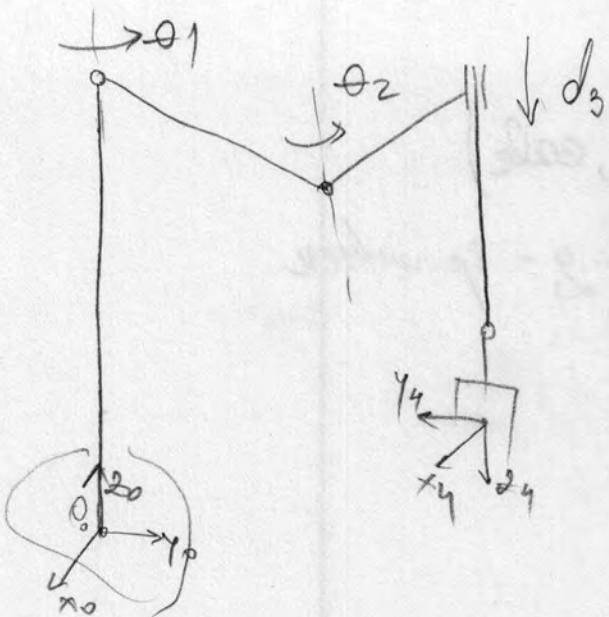
- repetată între pet. suport (i-1), și (i)

→ alg. JMRc - Joint Motion Rate Control

- prim. "axa conducătoare" - "electronic gear"

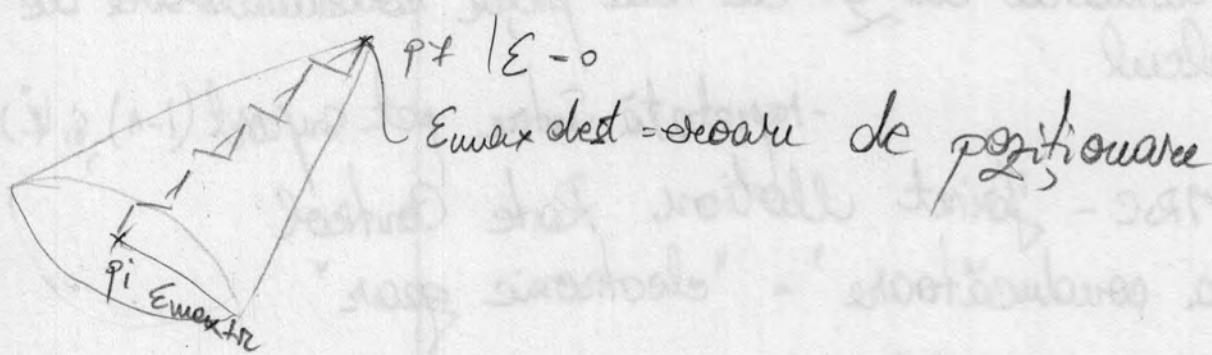
$$\begin{aligned} *p_f & \quad l_1 = \Delta\theta_1 \\ *p_i & \quad l_2 = \Delta\theta_2 \\ & \quad l_3 = \Delta\theta_3 \\ & \quad l_4 = \Delta\theta_4 \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{unde } l_2 \leftarrow \text{def axa conducătoare} - \\ \text{- drumul cel mai lung} \end{array} \right.$$

Ac. I este axa conduc.  $\forall j \in \{1, n\}, i \neq j, v_j = r_p \cdot \frac{\Delta\theta_j}{l_2}$



- pl. traiec. - se face și învățarea ale pct. robot.  
HERE nume. pct.

## II) Generare traiectorie- GT $\rightarrow$ MRC Cinematică (Cs, ci)



Dinamica - payload = 5 kg (sarc. max. transportabile)

GT - permite să nu mă neutur între-vee sau de deoare pt. a ajunge la pf.

- deoare de repetabilitate

HERE - îmi dă inf despre unde sunt în sp.z.

III) Vizualizarea traiectoriei (V.T)  
- reglare comandă motoare (PID)

fără competiție.

Vizorul artificial este comanda  
mișcării robotului → GVR

GVR - Guiding Visually Robot

Vizor de tip 2D - 90% → în robotică

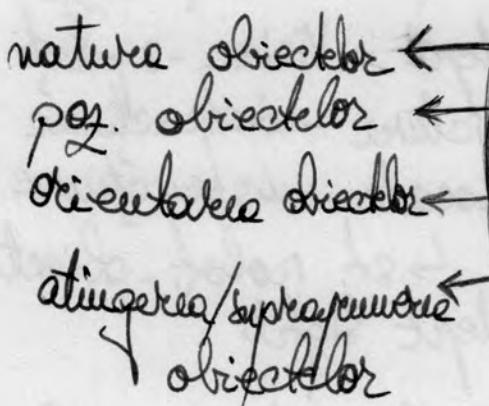
! Mediul de lucru nu este complet cunoscut (structural)

- masă de lucru (montaj, prelucrare)

- magazii (storage) : ASRS - sistem de stocare și

Automatic Storage & Retrieval System

- coridor



AVI - inspectie vizuală automată → set apel ușor de realizat,  
cu timpul mai mic.

1) Shape recognition → recunoaștere ob.

2) location recognition → localizare ob.

- vizorul se realizează în răsuflare et. de pl. tr. < look-and-Move

Pt. SVA → R

- ne trebuie un sis. de iluminare (lighting) → pt. scena și zone vizualizate  
Zone de acces al robotului

| sau mai multe camere + sis. de prelucrare a  
| imag -> prelucrare nivel redus  
| (low level IP) mult a imag  
| (high level IP)

- segr. imagine → se separă ob. de background  
- ob. (conținut imagine) - foreground background

extenzie de la robot [extenție V<sup>+</sup>] care să deservescă  
misiunea robot, și design (ex: HALT)

→ Adopt Vision - 3 părți : CM, IP, F - fct. cu un modul procesor de tip master  
VPicture - instrucțiune  
VLocate - instrucțiune (IP) prg  
↳ st. robot - obiect  
→ Adopt Sight

SVC - seignal video complex

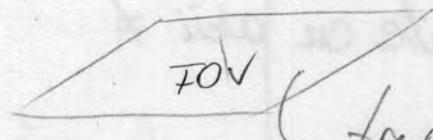
SVC = SU + SS , SU - seignal util  
SS - seignal de sincronizare  
→ CT/N → imagine digitală

Anumai camere :

- camerele sunt fixe (down looking)

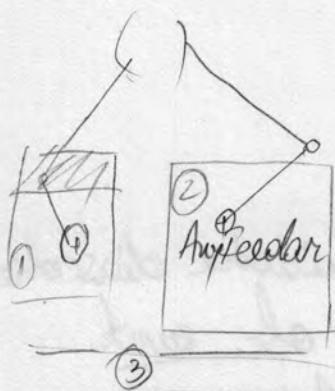
, area camera 1/2/3

FOV - field of vision

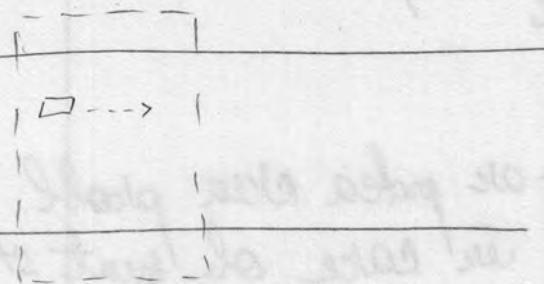


transf. de proiecție  
f. de perspectivă

Cobra S&SO - are 3 camere  
- nu are cam mobilă (e sq. sare cu are)



Montaj coveior  
- cam. mobile (area-mounted, hand-held)



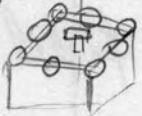
{ montaj coveior

- op de a lua cu ob. de pe coveior: pick on-the-fly.
- ~~sist. de iluminare~~ op. fol. fiz. bine dat. (fără) cal. sis. de iluminare (calorii)
- eliminarea variațiilor de iluminare

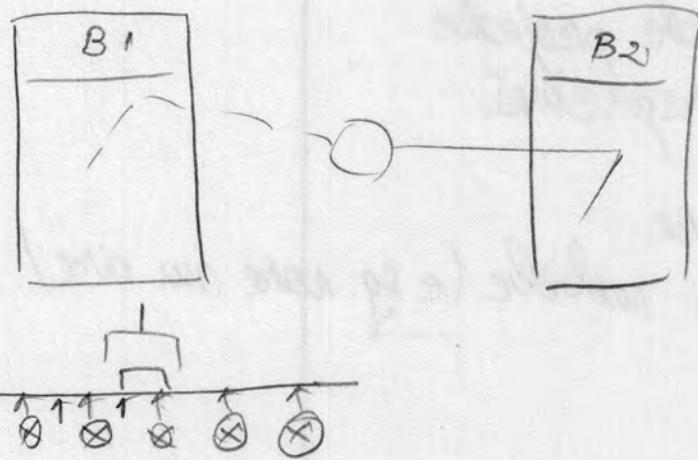
→ se dat. iluminatului natural → fol. eliminat  
→ se fol. iluminat artificial asigură intensitate difuză

→ cu succă multiple

- în multe apl. se fol. LED-uri pt. ca lumina să sp. constre  
industrial.



! pl. treb. iluminat complet și uniform. - în caz contrar se poate ca 2 ob. cu același număr de LED-uri să fie văzute cu același număr de LED-uri, dar să nu fie uniform iluminat.

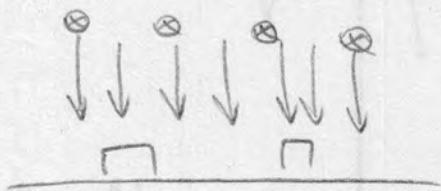


B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> - lumina 1, 2

1)

- sursele de lumină sunt amplasate jos - iluminare obiecte  
- indiferent de măsoare de la ei sau de cel ob. sunt.  
negre pe un fond alb ← analiza de contur  
    ↳ direcția binarizare)

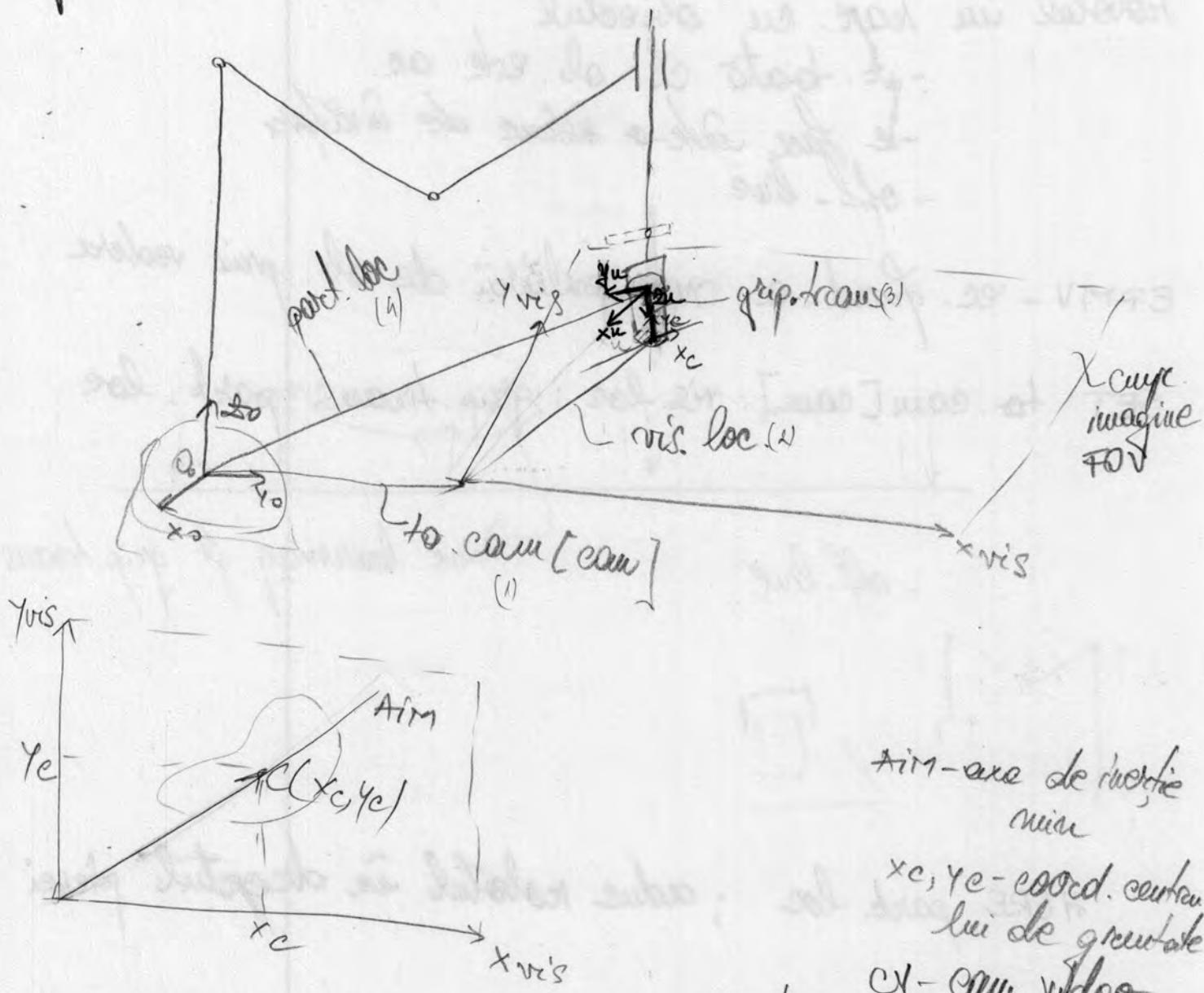
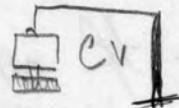
2) iluminare frontală



- ar putea crea probl. în monogramul  
în care ob. sunt strălucitoare și  
poate să își cumpăra.

Formatul imaginii

# Legătura vedere - mișcare



aim - axa de mișcare  
mine

$x_c, y_c$  - coord. centru-  
lui de gravitate  
CV - cam. video

SET part.loc = to.cam [cam] : vis.loc : grip.trans (EFM)  
in timp real.

(1) to.cam [cam] - ff. camera - robot off-line  
- se calc. o sg. dată, în diferentie de apel cu

virtualitate utilizator  
id. cam  
coud ca să nu se scrie <sup>relativă</sup> poziție <sub>pozitie</sub> cu  
robot.

- se obt. puncte - o sesiune de calibrare a CV.

(2) vis.loc - indică poz. și orientarea ob. în pl. imagine  
locatie

- se obt. pt. fiecare ob. ce trebuie accesat de robot  
- VLOCATE