

# Robotică

Anul IV

# Evaluare disciplină

- Colocviu final: 19 Mai 2020 (seria F), 21 Mai 2020 (seria B)
- Evaluare: 20 puncte colocviu final, 80 puncte evaluare pe parcurs.
- Tip examinare: test tip grilă; 19 puncte din chestionar + 1 punct din oficiu
- $80 \text{ puncte} = 10 \text{ puncte prezență curs} + 70 \text{ puncte laborator}$
- $70 \text{ puncte laborator} = 10 \text{ puncte prezență laborator} + 60 \text{ puncte laborator}$

# Definiții. Istorico

- Un robot este un operator mecanic sau virtual, artificial.
- Robotul este un sistem compus din mai multe elemente: mecanică, senzori și actori precum și un mecanism de direcționare.
- Mecanica stabilește înfățișarea robotului și mișcările posibile pe timp de funcționare.
- Senzorii și actorii sunt întrebuițați la interacția cu mediul sistemului. Termenul robot (din cehă robot) a fost utilizat de Josef Čapek și Karel Čapek în lucrările lor de science fiction la începutul secolului 20.

# Definiții. Istorico

- Cuvântul robot este de origine slavă și se poate traduce prin: muncă, clacă sau muncă silnică. Karel Čapek a descris în piesa sa R.U.R. din anul 1921 muncitori de asemănare umană, care sunt crescuți în rezervoare.
- Čapek folosește în lucrarea sa motivele clasice de golem. Denumirea de astăzi a creaturilor lui Čapek este de android.
- Înaintea apariției termenului de robot s-au utilizat de exemplu în uzinele lui Stanisław Lem termenii automat și semiautomat.

# Definiții. Istorico

- Primele modele de mașini pot fi mai degrabă numite automate (provenind din grecescul automatos, care se mișcă singur). Acestea nu puteau executa decât câte un singur obiectiv, fiind constrânse de construcție.
- Printre primii roboți mobili se numără sistemul Elmer și Elsie construit de William Grey Walter în anul 1948. Aceste triciclete se puteau îndrepta spre o sursă de lumină și puteau să recunoască coliziuni în împrejurimi.
- Anul 1956 este considerat ca anul nașterii a robotului industrial. George Devol a depus candidatura în acest an în SUA pentru un patent pentru "transferul programat de articole".
- Câțiva ani după aceea a construit împreună cu Joseph Engelberger UNIMATE. Acest robot de cca. două tone a fost mai întâi introdus în montarea de iconoscoape pentru televizoare, găsindu-și apoi drumul în industria automotive.

# Definiții. Istorico

- Domeniul științific, care se ocupă de construcția roboților se numește robotică. Termenul a fost folosit pentru prima dată în 1942 de Isaac Asimov în cartea sa, Runaround.
- Un domeniu general teoretic științific, care se ocupă de roboți, nu există dar cel mai adesea sunt subdomenii ale informaticii.
- Roboții sunt realizați mai ales prin combinația disciplinelor: mecanică, electrotehnică și informatică. Între timp s-a creat din legătura acestora mecatronica.

# Definiții. Istorico

- Pentru realizarea de sisteme autonome (care să găsească singure soluții) este necesară legătura a cât mai multor discipline de robotică.
- Aici se pune accent pe legătura conceptelor de inteligență artificială sau neuroinformatică (parte a informaticii) precum și idealul lor biologic biocibernetică (parte a biologiei).
- Din legătura între biologie și tehnică s-a dezvoltat bionica.

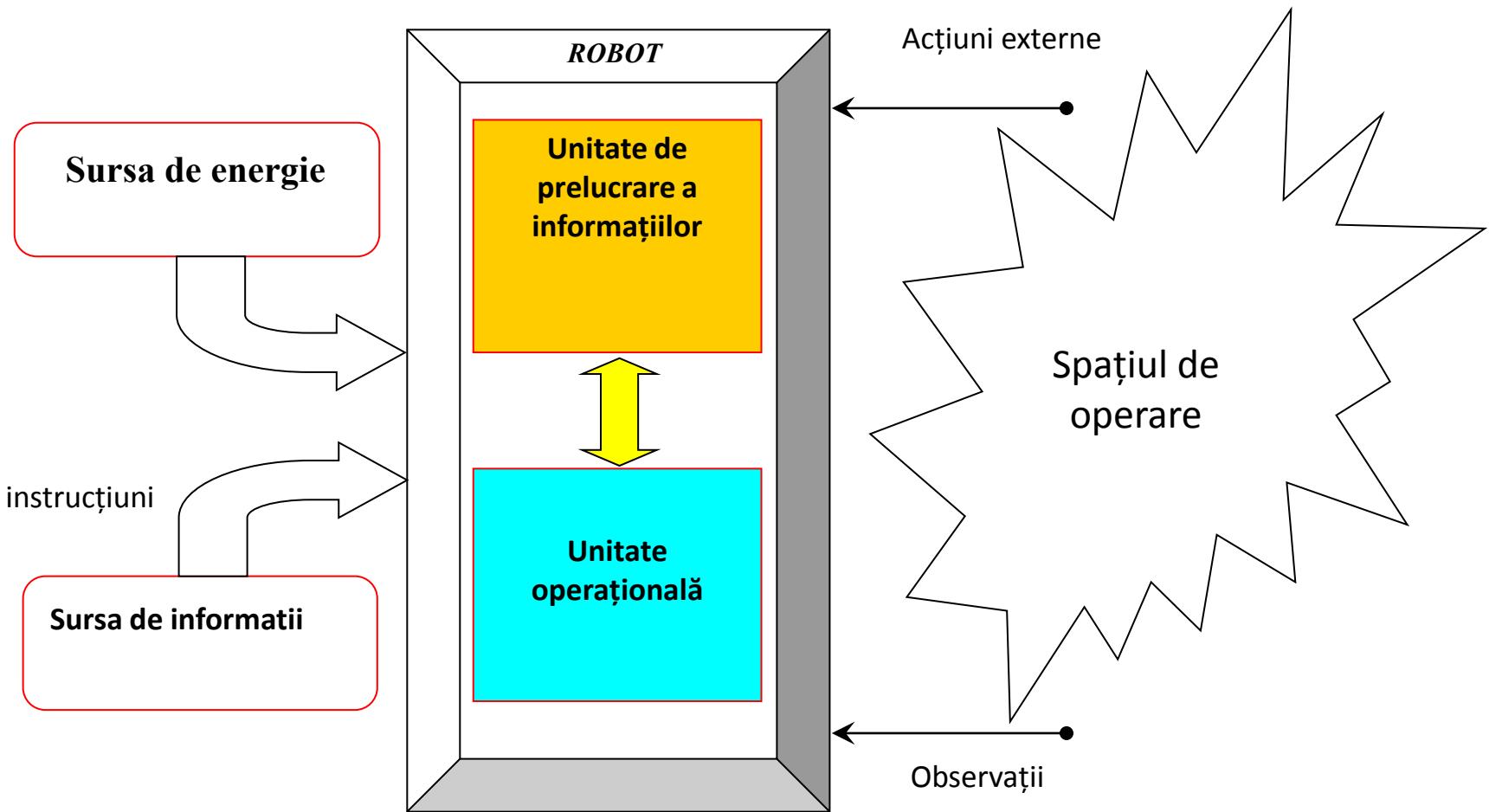
# Definiții. Istorico

- George Devol a înregistrat în anul 1954 primul patent pentru un robot industrial. Roboții industriali din prezent nu sunt de obicei mobili. După forma și funcția lor, domeniul lor operațional este restrâns.
- Ei au fost introduși pentru prima oară pe linia de producția a General Motors în 1961.
- Roboții industriali au fost folosiți prima dată în Germania la lucrări de sudură începând din 1970.

# Definiții. Istorico

- Robotul casnic lucrează autonom în gospodărie. Aplicațiile cunoscute sunt: robot aspirator (produs de exemplu de: Electrolux, Siemens sau iRobot), robot de tuns gazonul, robot de spălat ferestrele, robot jucărie, robot explorator
- Roboții exploratori sunt roboți care operează în locații greu accesibile și periculoase teleghidați sau parțial autonom. Aceștia pot lucra de exemplu într-o regiune aflată în conflict militar, pe Lună sau Marte. În astfel de situații roboții trebuie să fie programați cu mai multe tipuri de comportare, din care ei să aleagă pe cel mai adecvat și să-l execute.
- Tot roboți sunt numite și unitățile mobile, care depistează și dezarmosează sau distrug bombe sau mine (de exemplu robotul TALON).

La un nivel redus, orice sistem robotic este alcătuit din: a) spatiu de operare; b) sursa de energie; c) sursa de informatie; d) robotul;



Cele mai importante componente ale robotilor sunt senzorii, care permit mobilitatea acestora în mediu și o dirijare cât mai precisă. Un robot nu trebuie neapărat să poată să acționeze autonom, fapt pentru care se distinge între un robot autonom și unul teleghidat.

# Senzorii robotilor

- Robotii folosesc senzorii pentru a lua informatii despre ceea ce ii inconjoara. Multi dintre senzorii robotilor imita simturile noastre, insarobotii pot detecta lucruri pe care noi nu le putem simti, cum ar fi campul magnetic sau ultrasunete.
- Senzorii de lumina ai robotilor sunt diferiti - foterezistori, fotodiode, fototranzistori - dar ei au in general aceleasi rezultate. Un filtru a senzorilor de lumina poate fi folosit pentru a selecta raspunsurile ca robotul sa nu poata "vedea" decat o singura culoare.
- Senzorii de lumina pot fi folositi si doar pentru o simpla navigare. De exemplu, un robot poate sa-i foloseasca pentru a urmari o linie alba. Alti roboti navigheaza folosind lumina infrarosie(aceeasi lumina invizibila folosita la telecomanda). Robotul trimite un semnal de lumina infrarosie, care atunci cand intalneste un obstacol se reflecta si este receptionat de un sensor de lumina robotului. Pentru un sistem de vedere mai complex, senzorii de lumina nu sunt suficienti. Robotii pot gasi si elimina produsele imperfecte de pe o banda rulanta si trebuie sa fie capabili sa perceapa toate imaginile ce se schimba foarte rapid. In aceste situatii, imaginea din camera "ochi" trebuie analizata de un program pe computer.
- Vederea robotilor este una dintre cele mai mari provocari pentru ingineri. Este dificil sa programezi un robot sa vada ceea ce este important si sa ignore ceea ce nu este. Robotii au probleme in interpretarea lucrurilor cum ar fi schimbarile de lumina sau umbrele. Deasemenea, ca un robot sa aiba perceptie maxima, ii trebuie viziune stereoscopica ca a noastră.
- Unii roboti "vad" folosind ultrasunetele. Acesti roboti de obicei emit unde sonore cu frecventa de 40kHz(prea mare ca oamenii sa le auda), apoi detecteaza echourile. Masurand timpul de defazare dintre momentul din care impulsul pleaca si se intoarce, in asa fel putand aprecia distanta pana la obiect. Aceasta tehnica de navigare poate fi folosita si pe intuneric.
- Senzorii tactili permit robotilor "orbi" sa navigheze. Antenele, comutatoarele de contact si senzorii la ciocniri permit robotului sa stie cand a avut contact cu pereti sau obiecte. Materialul piezoelectric este adesea folosit in senzorii tactili. Cristalele piezoelectrice raspund la presiune cu un voltaj electric mic. Ei pot detecta vibratiile, impactul si chiar caldura.
- Senzorii de pozitie fac posibila invatarea unui robot sa execute o sarcina(cum ar fi vopsirea unei masini). Senzorii de pe articulatiile robotilor salveaza informatiile despre schimbarea seriilor de pozitii. Robotii isi "amintesc" aceste informatii si repeta miscarile in aceeasi ordine. Senzorii pentru semnalele radio, electrice si ale campurilor magnetice sunt in special folosite in robotica. Semnalele radio permit robotilor sa comunice la distanta.
- Miroslul, gustul la roboti nu este chiar atat de fin precum la oameni, insa nici nu trebuie sa fie. Senzorii robotilor pot detecta gaze diferite, inclusand gaze pe care noi nu le putem mirosi. Unul dintre cele mai importante intrebuintari ale miroslului robotilor se afla in aeroporturi, cand pot detecta vaporii de la explozivii ascunsi in bagaje.

# “Conștiință” roboților

- Mintea umana este un model dificil de redat.
- Performanta de a imita mintea umana s-a realizat cu ajutorul regulilor logicii, pe care computerule o folosesc. Informatia sub forma binara este stocata si manipulata cu ajutorul unor reguli preprogramate.
- Majoritatea robotilor cu "creier" se folosesc de regulile logicii, care functioneaza ca un microcomputer.
- Sistemul bazat pe reguli poate fi folosit pentru a crea intelectuala artificiala prin programarea unor cantitati vaste de informatii intr-un computer.
- Bazuindu-se pe acest enorm set de date , un computer este capabil sa mimeze intelectuala. De exemplu, un computer poate sa identifice o boala prin compararea simptomelor cu cele din baza de date. Asemenea "sisteme expert" pot stii mai multe decat o fiinta uman, desi au actiunile mai restante decat noi. Deasemenea ei pot “invata”.

# “Conștiință” roboților

- Retelele "neurale" reprezinta inca o apropiere de inteligenta artificiala. Ele sunt modelate dupa creierul uman, cu avantajul ca sunt mai performante in a face fata ambiguitatilor decat sistemele bazate pe reguli.
- O retea "neurala" "invata" prin expunere la o multime de intrari si iesiri corespunzatoare. O data antrenat, reteaua "neurala" raspunde la o intrare cu un raspuns satisfacator. Diferit de un sistem bazat pe reguli, o retea "neurala" nu da raspunsuri exacte, doar probabile(unii numesc aceasta "logica vaga").

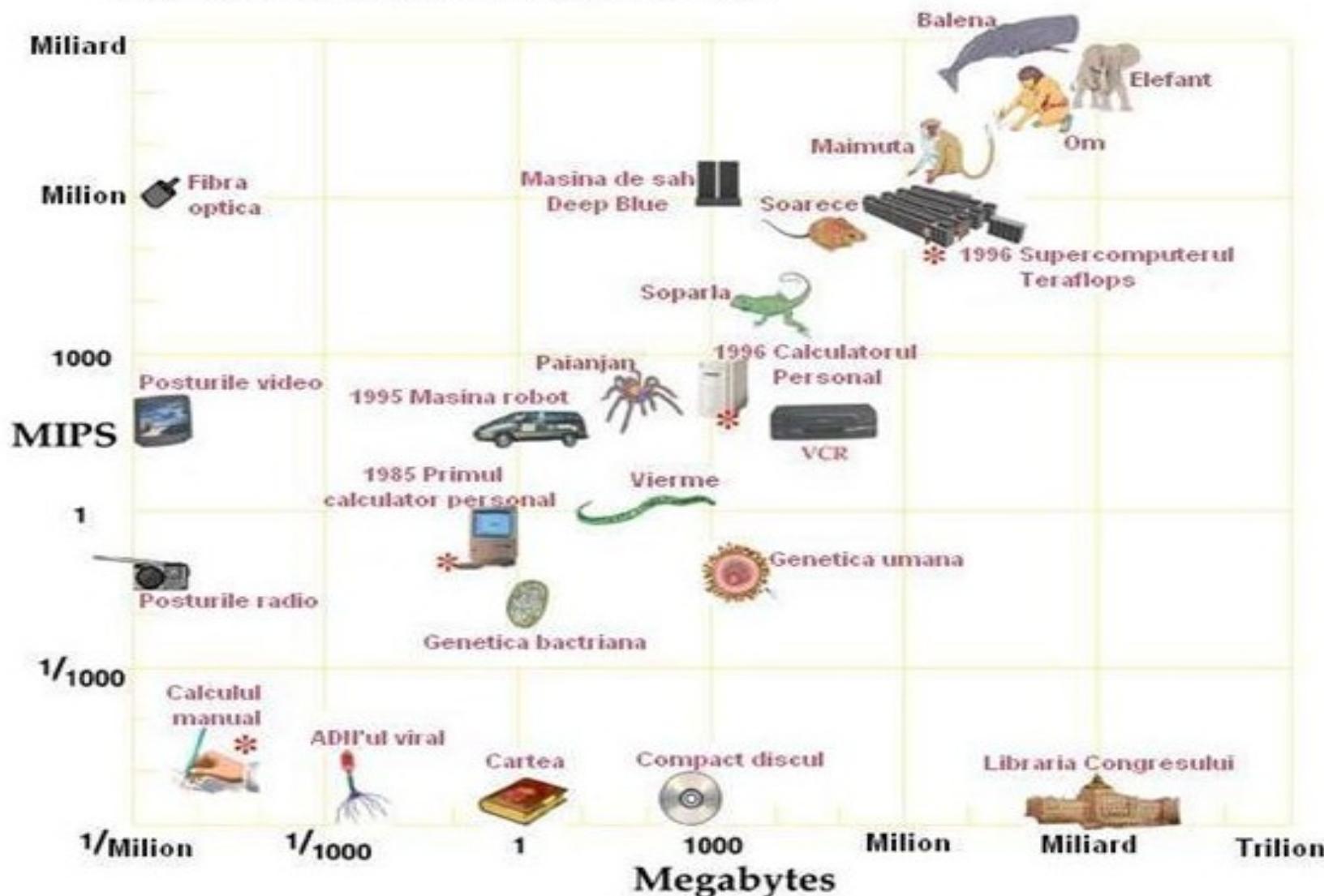
# “Conștiința” roboților

- În 1997 calculatorul Deep Blue construit de IBM l-a invins într-un meci de sah pe campionul mondial Garry Kasparov, sistem capabil de a efectua 400 de milioane de posibile mutări pe secundă.
- Multi experti se asteapta ca inteligența robotilor să se ridice în urmatoarele decenii. Sursa de optimism o reprezinta un principiu numit Legea lui Moore care sustine că noile microcipuri, care pot procesa o cantitate dubla de date decât chipurile existente, vor deveni accesibile în viitorul foarte apropiat. Din acest lucru rezulta că robotii vor deveni mult mai “deștepti” în urmatorii ani.
- Omul de știință Hans Moravec identifica 4 stadii de evoluție ale robotilor universalii. Secretul aceastei evoluții se regăsește în puterea computerelor, definită de milioanele de instrucțiuni pe secundă sau MIPS.

# “Conștiință” roboților

- Moravec descrie inteligența computerelor în corelație cu inteligența animală. De exemplu, un computer care are 1000 de MIPS este echivalent cu puterea creierului unei insecte. După prezicerile lui Moravec roboții vor ajunge la inteligență umană (100.000.000 MIPS) apropierea lui 2040.
- Roboții vor fi capabili să vorbească și să înțeleagă limbajul, să gandească creativ, și să anticipateze rezultatul acțiunilor sale înainte să le execute. Roboții, în final, vor fi la fel de competenți ca și oamenii.

# “Conștiința” roboților

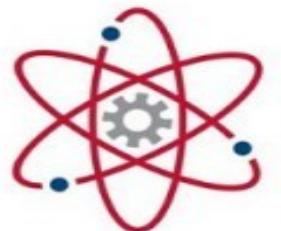


# “Conștiință” roboților

- Pot fi robotii constienti? Pot fi nu doar intelectuali dar si constienti ca noi? Pana acum, nici un robot nu a aratat asemenea semne.
- Daca robotii gandesc eventual ca noi, detecteaza si exprima emotii ca si noi, urmaresc propriile interese, ar fi cam dificil de facut diferența dintre roboti si fiintele vii.
- Exista previziuni ca forme de viata bazate pe silicon, un nou pas in evolutie, pot inlocui formele de viata bazate pe carbon cum suntem noi.
- Ideea robotilor care vor castiga mult teren si vor avea un rol dominant in viitor nu este veche.

# Exemple de roboti didactici

# AL5D PLTW Robotic Arm Kit



PROJECT LEAD THE WAY

**PLTW**



<https://youtu.be/DuNWYh9inwl>

# AL5D PLTW Robotic Arm Kit



## [AL5D PLTW Robotic Arm Kit](#)

- Design specifically for use with Project Lead The Way (PLTW)
- Control: USB based version (SSC-32U) of the AL5D arm (USB cable included)
- S/W: FlowArm PLTW graphical environment (download)
- H/W: Complete AL5D frame and hardware (Medium duty wrist rotate included)
- Motors: Hitec servos included
- Power: Power supply and all wires included
- Complete AL5D arm + powerful FlowArm PLTW software
- [Lynxmotion PLTW AL5D Assembly & User Guide \(NEW\)](#)

# A4WD1 Combo Kit for RC



## **A4WD1 Combo Kit for RC**

- This is the combo kit for RC stick radio control
- Classic 4WD differential drive system
- Heavy duty aluminum structural components
- Precision laser-cut PVC panels

<https://youtu.be/lmNEj4KAloQ>

<https://youtu.be/9cyumzzZ1ml>

# A4WD1 Gripper Kit



## [A4WD1 Gripper Kit](#)

Two DOF mini arm with Gripper for vertical surface mount. Made using Lynxmotion servo brackets. Perfect for your small remote piloted robot! Includes brackets, hardware and servos.

# Lynxmotion Smart Servo (LSS) - Articulated Robotic Arm (Kit)



4+1 Degree of freedom (DoF) articulated robotic arm

Designed for STEM education and hobby robotics  
Modular design with aluminum, carbon fiber and G10 parts

Uses Lynxmotion Smart Servo (LSS) motors  
Graphical UI: LSS FlowArm software  
Kit form for more fun & learning

4x LSS ST1 actuators

1x LSS HT1 actuator

LSS Adapter (electronics interface)

12V Wall adapter with on/off switch

USB cable (mini B connector)

All necessary brackets, frame components and hardware

Screwdriver (Phillips PH1, PH2)

Aesthetic plastic shells with vinyl stickers

[https://youtu.be/\\_ZmqH72b4RU](https://youtu.be/_ZmqH72b4RU)

### 3. Elemente de mecanica robotilor (geometria, cinematica si dinamica)

#### 3.1. Studiul geometric al mișcării. Sisteme de coordonate

Modelarea naturii se face prin operatori matematici, aspect folosit nu numai pentru mecanică ci și pentru știință în general. Mecanica operează cu unele mărimi fundamentale (spațiul, timpul, masa) și cu alte mărimi derive (din care cea mai importantă este forța). Mecanica studiază mișcarea, realizând corelații între mărimile ce o descriu. Mișcarea mecanică este o succesiune continuă de schimbări de poziție. Pentru realizarea unei ordonații a fenomenelor, este considerat conceptul de spațiu tridimensional. Pozițiile exprimate față de un reper se numesc coordonate. Coordonatele pot fi segmente de dreaptă sau curbă, unghiuri, toate acestea orientate. Coordonatele au proprietatea că sunt reciproc independente. Numărul de coordonate reciproc independente necesare pentru exprimarea poziției reprezintă numărul gradelor de libertate ale sistemului studiat.

Mecanica clasică consideră că spațiul este tridimensional, omogen, izotrop, continuu, reversibil.

Următoarele tipuri de coordonate sunt utilizate pentru a preciza poziția unei particule (punct).

##### 3.1.1. Trei segmente de dreaptă, orientate, care formează sistemul de referință cartezian.

Cele trei axe sunt reciproc ortogonale și sunt orientate cu ajutorul versorilor  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ . Vectorul determinat de originea sistemului de referință, O, și de punctul P se numește vector de poziție. Expresia analitică este dată de relația 3.1.

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k} \quad (3.1)$$

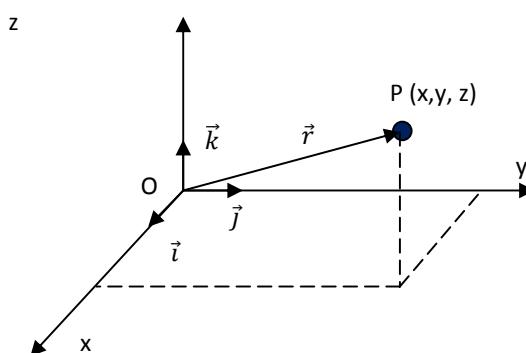


Fig. 3.1. Sistemul de coordonate carteziene

##### 3.1.2. Două segmente de dreaptă și un unghi, orientate, care formează sistemul de referință cilindric.

Cele trei coordonate sunt:

- Unghiul  $\theta$ , măsurat între o dreaptă fixă,  $\Delta$ , din planul fix,  $\Pi$ , și direcția  $OP'$ .
- Lungimea segmentului  $OP'$ , notată cu  $\rho$ , și care reprezintă distanța de la originea O la proiecția în planul ( $\Pi$ ) a punctului P.
- Lungimea segmentului  $P'P$  notată cu  $z$ , reprezentând distanța de la punctul P la planul ( $\Pi$ ).

Vectorul de poziție va fi dat de relația 3.2.

$$\vec{r} = \rho \cdot \vec{i}_\rho + z \cdot \vec{k} \quad (3.2)$$

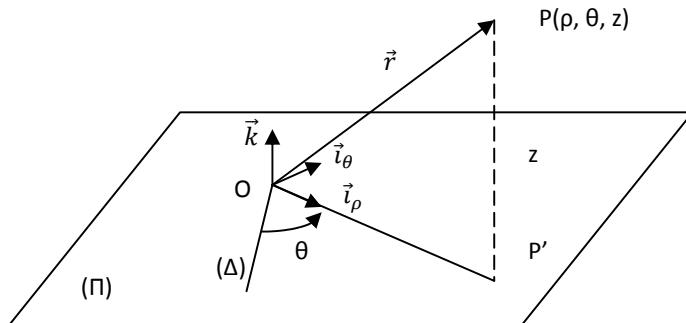


Fig. 3.2. Sistemul de coordonate cilindrice

### 3.1.3. Un segment de dreaptă și două unghiuri, orientate, care formează un sistem de coordonate sferice.

Cele trei coordonate sunt următoarele:

- Unghiul  $\theta$  dintre dreapta fixă  $\Delta$ , din planul fix ( $\Pi$ ) și direcția  $OP'$  ( $P'$  este proiecția punctului P în planul  $\Pi$ ). Se mai numește longitudine.
- Unghiul  $\varphi$  dintre direcția  $OP$  și  $OP'$ . Acest unghi se numește latitudine.
- Distanța  $\rho=OP$ .

Orientarea axelor se face cu ajutorul versorilor  $\vec{i}_\rho, \vec{i}_\theta, \vec{i}_\varphi$ .  $\vec{i}_\rho$  este dirijat după  $OP$ , de la O la P.  $\vec{i}_\theta$  este perpendicular pe meridianul ce trece prin P, în sensul crescător al unghiului  $\theta$ .  $\vec{i}_\varphi$  este perpendicular pe cercul paralel ce trece prin P. Cei trei versori formează un sistem triortogonal drept.

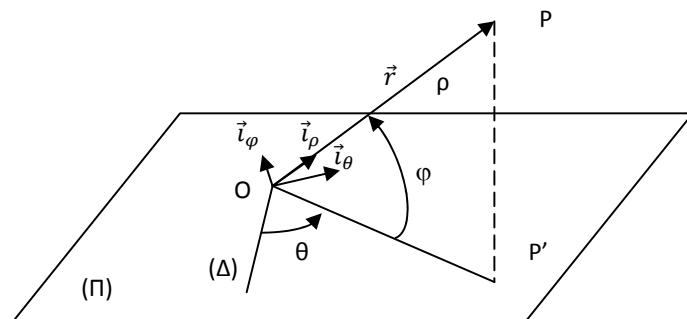


Fig. 3.3. Sistemul de coordonate sferic

### **3.1.4. Sistemul Frenet**

Este reprezentat de un arc de curbă, în cazul sistemului Frenet. Cele trei direcții prioritare sunt determinate de versorii  $\vec{\gamma}$ - normala principală la curbă;  $\vec{\tau}$ - tangenta la curbă;  $\vec{\beta}$ - binormală.

### **3.1.5. Mărimi mecanice**

Un element important în stabilirea succesiunii unor evenimente este timpul. Practic timpul este legat de mișcare. Se poate spune că în absența mișcării, timpul nu are semnificație. Pentru aprecieri cantitative asupra timpului, acesta trebuie comparat cu un alt fenomen etalon, rotația Pământului, propagarea luminii, etc. Mecanica acceptă timpul ca fiind omogen, izotrop, continuu, unidimensional, cu un singur sens de evoluție și independent de observator.

În mecanica se utilizează urmatoarele noțiuni cu caracter general numite noțiuni fundamentale: spațiu, timp, masa și forța.

Spațiu este o reprezentare generalizată a dimensiunilor corpurilor, a distanțelor dintre ele. În Mecanica clasică este adoptat spațiu Euclidian (Euclid din Alexandria, cca. 450-380 î.H.) cu trei dimensiuni, omogen, izotrop și infinit. Ca sisteme de referință, considerate fixe, pentru mișările curente din tehnica, se pot folosi repere solidare cu Pamântul.

Timpul reprezintă o generalizare a duratei evenimentelor și intervalelor dintre ele. Timpul este considerat unidimensional și infinit.

Noțiunea de masa reflectă proprietatea de inertie a corpurilor și de a produce câmp gravific. În cadrul aproximatiilor Mecanicii clasice masa este o marime scalară constantă, pozitivă, deci independentă de viteza.

Forța este o marime care măsoară interacțiunea mecanică dintre corpurile materiale. Forța are un caracter vectorial deoarece efectul forței depinde de punctul de aplicatie, de intensitate, de directia și sensul ei.

În ce privește masa, aceasta este cantitatea de substanță pe care o deține punctul. Există două mase:

- Masa inertă, care este o măsură a inerției, adică a capacitatii corpului de a se opune schimbării stării de mișcare.
- Masa gravifică, care reprezintă proprietatea materiei de a genera câmp gravitațional.

În general, în mecanică se consideră că cele două mase sunt egale. Există o serie de principii fundamentale pe care se bazează mecanica. Astfel avem:

A. **Principiul inerției.** Un punct material asupra căruia nu acționează forțe va fi în repaus sau în mișcare rectilinie uniformă în raport cu sistemul de referință inerțial.

B. **Principiul proporționalității.** Accelerarea imprimată unui punct material este un vector proporțional cu forța ce acționează, factorul de proporționalitate fiind masa punctului.

C. **Principiul acțiunii și reacțiunii.** Interacțiunile dintre două corperi sunt reprezentate de vectori egali și direct opuși.

D. **Principiul paralelogramului.** Efectul a două forțe concurente ce acționează asupra unui punct material este același cu efectul unei singure forțe reprezentând diagonală paralelogramului ce se formează cu vectorii dați.

Mecanica se poate studia din două puncte de vedere:

a. Din punct de vedere **geometric**; mișcarea este privită prin prisma corelațiilor ce se stabilesc între elementele caracteristice (traiectorii, viteze accelerării).

b. Din punct de vedere **cauzal**; mișcarea este privită ca efect al unei cauze și cătare se studiază corelațiile dintre elementele mișcării și cauzele care produc mișcarea.

Mecanica se compune din trei părți: statica, cinematica și dinamica.

Studiul geometric al mișcării (spațio-temporal) se numește cinematică, iar studiul care ține cont de legăturile cauză-efect se numește dinamică. Dacă lipsește mișcarea atunci se poate face un studio de detaliu asupra sistemelor de forțe ce acționează în acest caz particular, cunoscut sub numele de statică.

Statica studiază condițiile de echilibru și de echivalentă a sistemelor de forțe care acționează asupra corpurilor materiale.

Cinematica se ocupă cu studiul geometric al mișcării corpurilor fără să ia în considerare forțele aplicate corpurilor și masele lor.

Dinamica tratează mișcarea corpurilor sub acțiunea forțelor, ținând seama și de masele lor.

Pentru a putea utiliza calculul matematic corpurile materiale se schematizează sub formă unor modele teoretice cum ar fi: punctul material, sistemul de puncte materiale, linia materială, suprafața materială, corpul material, mediul continuu, solidul rigid.

Punctul material reprezintă modelul unui corp de dimensiuni neglijabile în raport cu alte corperi sau cu distantele dintre ele și are ca elemente: punctul geometric pentru reprezentarea poziției corpului și masa ca măsură a inerției corpului.

O mulțime finita de puncte materiale aflate în interacțiune mecanica formează un sistem de puncte materiale.

Linia materială este modelul unui corp la care două dimensiuni, care determină secțiunea transversală, pot fi neglijate (sunt relativ mici) în raport cu a treia, numita lungime. Are ca elemente o linie geometrică, dreapta sau curba, reprezentând axa geometrică a corpului și o masa distribuită de-a lungul ei, ca mărime ce măsoară inerția corpului. Liniile materiale se numesc bare, dacă prezintă rigiditate la schimbarea formei, sau fire, dacă aceasta rigiditate este neglijabilă, respectiv dacă sunt foarte flexibile dar inextensibile.

Suprafața materială reprezintă modelul unui corp la care o dimensiune (grosimea) este neglijabilă (relativ mică) în raport cu celelalte două (lungimea și lățimea), fiind caracterizată de o suprafață geometrică, plană sau curba, reprezentând suprafața mediana a corpului și o masa distribuită pe suprafața mediana, ca mărime ce măsoară inerția corpului. Suprafetele materiale se numesc placi dacă prezintă rigiditate la schimbarea formei sau membrane în caz contrar, adică atunci când sunt foarte flexibile dar inextensibile.

Corpul material modelează un corp la care cele trei dimensiuni sunt aproximativ de același ordin de mărime și are ca elemente corpul geometric căruia î se atașează o masa distribuită în volumul corpului.

Mediul continuu reprezintă modelul unui corp al cărui volum este ocupat integral de substanță deși în realitate structura atomica este discontinua.

Solidul rigid (rigidul) este un mediu continuu indeformabil. Rigidul poate fi considerat ca un sistem alcătuit dintr-un număr infinit de puncte materiale având distantele dintre ele invariabile (indiferent de forțele care acționează asupra corpului) și ocupând același domeniu ca și corpul.

### 3.2. Cinematica punctului

Cinematica se ocupă de studiul mișcării fără să țină cont de forțele care o produc și de masă. Aceasta rezolvă problemele de traекторie, viteză și acceleratie, precum și legăturile dintre acestea.

Cinematica este partea mecanicii care studiază mișcarea sistemelor materiale (punct material, sistem de puncte materiale, solid rigid, sisteme de corpuri rigide) fără a tine seama de mase și forțe. Studiul mișcării implica alegerea unui sistem de referință. Mișcarea unui corp în raport cu un sistem de referință (reper, referențial) fix se numește mișcare absolută iar în raport cu un reper mobil se numește mișcare relativă. Pentru mișcările curente din tehnica un reper legat de pământ se consideră fix. În cinematica, trei probleme sunt esențiale: problema traectoriilor, problema vitezelor, problema accelerărilor.

#### 3.2.1. Traекторie. Viteză. Acceleratie

- a. **Traectoria** este locul geometric al pozițiilor succesive ocupate de punct în timpul mișcării. Poate fi o dreaptă sau o curbă (plană sau în spațiu).

Există două tipuri de traectorii:

- Poziția punctului este dată în fiecare moment (se știu legile  $x(t)$ ,  $y(t)$  și  $z(t)$ ) și se determină curba. Aceasta se rezolvă prin eliminarea timpului între cele trei legi, relația 3.3.

$$\begin{cases} f(x, y, z) = 0 \\ g(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Poziția punctului este dată de vectorul de poziție, relația 3.4.

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad (3.4)$$

- Cazul când traectoria este o curbă cunoscută și se pune problema determinării, în fiecare moment, a poziției punctului. În acest caz, cel mai utilizat mod de rezolvare a problemelor, este folosind legea de mișcare, (3.5). S este lungimea arcului de curbă.

$$s = s(t) \quad (3.6)$$

Vectorul de poziție  $\vec{r}$  devine prin intermediul (3.6) o funcție de  $s$ , (3.7).

$$\vec{r} = \vec{r}(s) \quad (3.8)$$

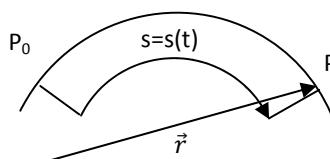


Fig. 3.4. Vectorul de poziție și spațiul

- b. **Viteza** oferă informații asupra modului în care variază vectorul de poziție. Pentru definirea ei, se consideră două puncte de pe traectorie,  $P$  și  $P'$ , la momentele  $t$  și  $t+\Delta t$ .

În intervalul de timp  $\Delta t$ , vectorul de poziție are variația  $\Delta \vec{r}$ , dată de relația 3.9.

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t) \quad (3.9)$$

Prin definiție, se numește viteza medie a punctului  $P$  în intervalul  $\Delta t$  raportul din relația 3.10.

$$\vec{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (3.10)$$

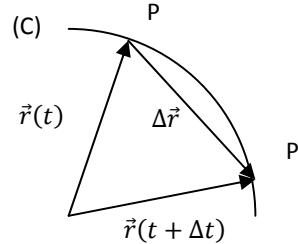


Fig. 3.5. Definirea vitezei (ca variație a poziției)

Trecând la limită în relația 3.10, se obține viteze instantanee a punctului, relația 3.11.

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{v}_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d \vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}} \quad (3.11)$$

Viteza unui punct este prima derivată în raport cu timpul a vectorului de poziție,  $\vec{r}$ . Se măsoară în m/s.

c. **Accelerația** este o mărime care arată modul în care variază viteza punctului, figura 3.6.

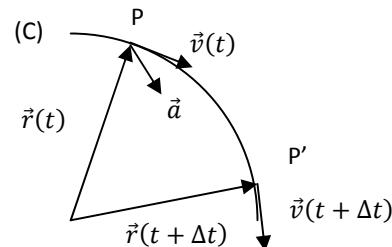


Fig. 3.6. Acceleratia unui punct

Elementele grafice prezente în figura 3.6 sunt:

- Curba (C) reprezintă traiectoria punctului P.
- Cele două poziții P și P' ale punctului în momentul t, respectiv t+Δt.
- Vectorii de poziție corespunzători celor două momente
- Vitezele corespunzătoare celor două momente de timp

Prin definiție, accelerația medie a punctului în intervalul Δt este dată de relația 3.7.

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}(t+\Delta t) - \vec{v}(t)}{\Delta t} \quad (3.7)$$

Trecând la limită, se obține accelerația instantanee sub forma relației 3.8.

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{a}_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d \vec{v}}{dt} = \dot{\vec{v}} = \ddot{\vec{r}} \quad (3.8)$$

Accelerarea unui punct este definită ca derivata a două în raport cu timpul a vectorului de poziție, sau prima derivată în raport cu timpul a vitezei. Unitatea de măsură este  $m/s^2$ .

Se mai poate vorbi de supraaccelerație, ca o accelerare de ordinal doi ca o măsură de apreciere a confortului. Se folosește în automotive.

Există și noțiunea de viteza areolară, conform definiției, relația 3.9.

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \vec{r} \times \vec{v} \quad (3.9)$$

Este o mărime vectorială atașată ariei „măturate” de vectorul de poziție  $\vec{r}$  în unitatea de timp.

### 3.2.2. Proiecțiile vitezei și accelerării în diverse sisteme de coordinate

#### A. Sistemul de axe cartezian

Vectorul de poziție  $\vec{r} = \vec{r}(t)$  are expresia 3.10, în care  $x=x(t)$ ,  $y=y(t)$  și  $z=z(t)$  sunt legile de mișcare ale punctului sau ecuațiile parametrice ale mișcării.

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k} \quad (3.10)$$

Prin eliminarea parametrului  $t$  între legile de mișcare, rezultă ecuațiile traectoriei în coordinate carteziene. Folosind definirea vitezei instantanee se obține relația 3.11

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}} = \dot{x} \cdot \vec{i} + \dot{y} \cdot \vec{j} + \dot{z} \cdot \vec{k} \quad (3.11)$$

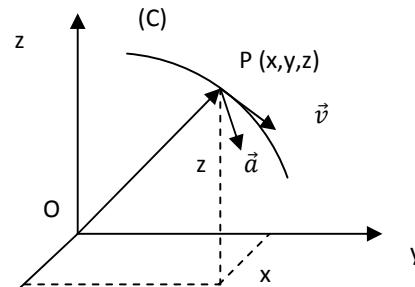


Fig. 3.7. Sistemul de coordonate cartezian

Proiecțiile vitezei pe cele trei axe sunt date de relația 3.12.

$$\begin{cases} v_x = \dot{x} \\ v_y = \dot{y} \\ v_z = \dot{z} \end{cases} \quad (3.12)$$

Și modulul de relația 3.13.

$$|\vec{v}| = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \quad (3.13)$$

Din definirea accelerării instantanee, relația 3.8, avem relația 3.14.

$$\vec{a} = \ddot{\vec{r}} = \ddot{\vec{v}} = \ddot{x} \cdot \vec{i} + \ddot{y} \cdot \vec{j} + \ddot{z} \cdot \vec{k} \quad (3.14)$$

Împreună cu proiecțiile acestora, relația 3.15.

$$\begin{cases} a_x = \ddot{x} \\ a_y = \ddot{y} \\ a_z = \ddot{z} \end{cases} \quad (3.15)$$

Si respectiv modulul accelerării, relația 3.16.

$$|\vec{a}| = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2} \quad (3.16)$$

B. Sistemul de axe cilindric (se reprezintă împreună cu cel cartezian)

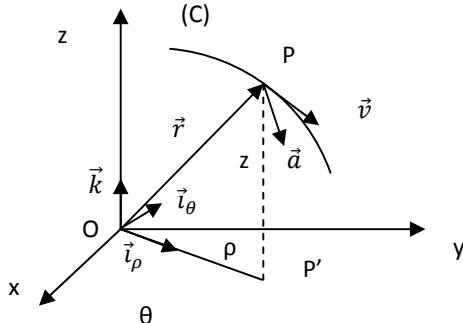


Fig. 3.8. Sistemul de axe cilindric

Luând drept plan fix ( $\Pi$ ) chiar planul (Oxy) și dreapta fixă  $\Delta$  chiar axa (Ox) se obține sistemul de ecuații 3.17.

$$\begin{cases} \vec{i}_\rho = \vec{i} \cdot \cos\theta + \vec{j} \cdot \sin\theta \\ \vec{i}_\theta = -\vec{i} \cdot \sin\theta + \vec{j} \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (3.17)$$

Vectorul de poziție  $\vec{r}$  are expresia 3.18.

$$\vec{r} = \rho \cdot \vec{i}_\rho + z \cdot \vec{k} \quad (3.18)$$

Ecuațiile de mișcare ale punctului în coordonate cilindrice sunt date de relația 3.19.

$$\begin{cases} \rho = \rho(t) \\ \theta = \theta(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (3.19)$$

Eliminând timpul se găsesc ecuațiile 3.20 care reprezintă ecuațiile traiectoriei în coordonate cilindrice.

$$\begin{cases} f(\rho, \theta, z) = 0 \\ g(\rho, \theta, z) = 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Viteza instantanee în coordonate cilindrice devine (derivând vectorul de poziție), 3.21.

$$\vec{v} = \dot{\rho} \cdot \vec{i}_\rho + \rho \cdot \vec{i}_\rho + \dot{z} \cdot \vec{k} \quad (3.21)$$

Din derivarea sistemului de ecuații rezultă relația 3.22.

$$\begin{cases} \dot{\vec{i}}_\rho = \dot{\theta} \cdot \vec{i}_\theta \\ \dot{\vec{i}}_\theta = -\dot{\theta} \cdot \vec{i}_\rho \end{cases} \quad (3.22)$$

În relația vitezei instantanee, 3.11, avem relația 3.23.

$$\vec{v} = \dot{\rho} \cdot \vec{i}_\rho + \rho \cdot \dot{\theta} \cdot \vec{i}_\theta + \dot{z} \cdot \vec{k} \quad (3.23)$$

Se stabilesc proiecțiile vitezei și expresia modulului vitezei, relația 3.24.

$$\begin{cases} v_\rho = \dot{\rho} \\ v_\theta = \rho \cdot \dot{\theta} \\ v_z = \dot{z} \end{cases} \quad (3.24)$$

$$|\vec{v}| = \sqrt{\dot{\rho}^2 + \rho \cdot \dot{\theta}^2 + \dot{z}^2} \quad (3.25)$$

Derivând expresia vitezei în raport cu timpul, avem expresia accelerării, 3.26.

$$\vec{a} = \ddot{\rho} \cdot \vec{i}_\rho + \dot{\rho} \cdot \dot{\vec{i}}_\rho + \dot{\rho} \cdot \dot{\theta} \cdot \vec{i}_\theta + \rho \cdot \ddot{\theta} \cdot \vec{i}_\theta + \rho \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\vec{i}}_\theta + \ddot{z} \cdot \vec{k} \quad (3.26)$$

Pentru eliminarea derivatelor, se înlocuiesc  $\dot{\vec{i}}_\rho$  și  $\dot{\vec{i}}_\theta$ , din 3.22.

$$\vec{a} = (\ddot{\rho} - \rho \cdot \dot{\theta}^2) \cdot \vec{i}_\rho + (2 \cdot \dot{\rho} \cdot \dot{\theta} + \rho \cdot \ddot{\theta}) \cdot \vec{i}_\theta + \ddot{z} \cdot \vec{k} \quad (3.27)$$

Avem proiecțiile accelerării pe cele trei axe:

$$\begin{cases} a_\rho = \ddot{\rho} - \rho \cdot \dot{\theta}^2 \\ a_\theta = 2 \cdot \dot{\rho} \cdot \dot{\theta} + \rho \cdot \ddot{\theta} \\ a_z = \ddot{z} \end{cases} \quad (3.28)$$

Cu modulul calculate de relația 3.29.

$$|\vec{a}| = \sqrt{(\ddot{\rho} - \rho \cdot \dot{\theta}^2)^2 + (2 \cdot \dot{\rho} \cdot \dot{\theta} + \rho \cdot \ddot{\theta})^2 + \ddot{z}^2} \quad (3.29)$$

Se mai poate utiliza o formă particulară a coordonatelor polare, 3.30.

$$\begin{cases} \rho = \rho(t) \\ \theta = \theta(t) \\ z = 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

Expresiile pentru traiectorie, viteză și acceleratie sunt date de 3.31.

$$\begin{cases} f(\rho, \theta) = 0 \\ \vec{v} = \dot{\rho} \cdot \vec{i}_\rho + \rho \cdot \dot{\theta} \cdot \vec{i}_\theta \\ \vec{a} = (\ddot{\rho} - \rho \cdot \dot{\theta}^2) \cdot \vec{i}_\rho + (2 \cdot \dot{\rho} \cdot \dot{\theta} + \rho \cdot \ddot{\theta}) \cdot \vec{i}_\theta \end{cases} \quad (3.31)$$

### C. Sistemul de axe Frenet (intrinsec)

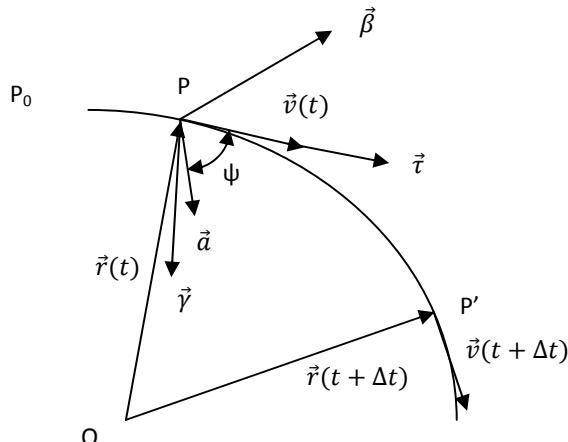


Fig. 3.9. Sistemul de axe Frenet

Se cunoaște legea orară de mișcare a punctului, relația 3.32.

$$\widehat{P_0P} = s = s(t) \quad (3.32)$$

Viteză instantanee a punctului, 3.11, devine 3.33.

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \dot{s} \cdot \frac{d\vec{r}}{ds} \quad (3.33)$$

Se știe că, 3.34.

$$\frac{d\vec{r}}{ds} = \vec{\tau} \quad (3.34)$$

Unde  $\vec{\tau}$  este versorul tangentei la traiectorie. Viteză devine, 3.35.

$$\vec{v} = \dot{s} \cdot \vec{\tau} \quad (3.35)$$

Aceasta relație demonstrează că viteza este tangentă la traекторie, indiferent de mișcare. Pentru obținerea accelerării se derivează în raport cu timpul, viteza, și se obține, 3.36.

$$\vec{a} = \ddot{s} \cdot \vec{\tau} + \dot{s} \cdot \frac{d\vec{\tau}}{dt} \quad (3.36)$$

$$\text{Se ține cont de relațiile 3.37. } \frac{d\vec{\tau}}{dt} = \frac{d\vec{\tau}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \dot{s} \cdot \frac{d\vec{\tau}}{ds} \text{ și } \frac{d\vec{\tau}}{ds} = \frac{\vec{\gamma}}{\rho_c} \quad (3.37)$$

Cu vesorul normalei principale,  $\vec{\gamma}$ , și cu  $\rho_c$ , raza de curbură a traectoriei (C) în punctul P, se obține pentru accelerare expresia 3.38.

$$\vec{a} = \ddot{s} \cdot \vec{\tau} + \frac{\dot{s}^2}{\rho_c} \cdot \vec{\gamma} \quad (3.38)$$

Sau se poate scrie, 3.39.

$$\vec{a} = \dot{v} \cdot \vec{\tau} + \frac{v^2}{\rho_c} \cdot \vec{\gamma} \quad (3.39)$$

Aceasta demonstrează că accelerarea este cuprinsă în planul osculator al traectoriei, ( $a \cdot \beta = 0$ ). În geometria diferențială, planul osculator al unei curbe strâmbă este limita planului care trece prin trei puncte vecine ( $M, M', M''$ ), ( $M, M', M''$ ) pe curbă, când punctele  $\{M', M''\}$  tind către M. Planul osculator al unei curbe plane este chiar planul curbei. Dreapta normală pe planul osculator se numește binormală.

Proiecțiile accelerării sunt 3.40 și 3.41.

$$a_\tau = \ddot{s} = \dot{v} \text{ (accelerația tangențială)} \quad (3.40)$$

$$a_\gamma = \frac{\dot{s}^2}{\rho_c} = \frac{v^2}{\rho_c} \text{ (accelerația normală)} \quad (3.41)$$

Componenta tangențială a accelerării exprimă variația mărimei vitezei  $\vec{v}$ , iar componentă normală exprimă variația direcției vitezei.

### Observații

- $a_\gamma > 0$ , deci accelerarea este îndreptată în totdeauna către interiorul traectoriei.
- Singura mișcare ce se poate executa fără accelerare este mișcarea rectilinie și uniformă a punctului. Din condiția  $\vec{a} = 0$ , avem

$a_\tau = \dot{v} = 0$  care conduce la  $v = \text{const.}$  deci mișcarea se face astfel încât viteza este constantă.

$a_\gamma = \frac{v^2}{\rho_c}$ , care conduce la  $\rho_c \rightarrow \infty$ , deci traectoria punctului respectiv este o dreaptă.

- Conform figurii 3.9, unghiul dintre vectorul accelerării  $\vec{a}$  și vectorul vitezei,  $\vec{v}$  este  $\psi$ . Avem 3.42.

$$a_\gamma = |\vec{a}| \cdot \sin\psi = \frac{|\vec{v}| \cdot |\vec{a}| \cdot \sin\psi}{|\vec{v}|} = \frac{|\vec{v}| \times |\vec{a}|}{|\vec{v}|} \quad (3.42)$$

Din expresia accelerării normale,  $a_\gamma$ , rezultă o formulă cinematică pentru determinarea razei de curbură a traectoriei, relația 3.43.

$$\rho_c = \frac{|\vec{v}|^3}{|\vec{a} \times \vec{v}|} \quad (3.43)$$

## 3.3. Mișcările particulare ale punctului

### 3.3.1. Mișcarea rectilinie

Un punct execută o mișcare rectilinie atunci când traectoria lui este o dreaptă. Este suficient să se aleagă un sistem de referință cu o singură axă, suprapusă peste direcția mișcării.



Fig. 3.10. Mișcarea rectilinie

Se consideră cunoscute valorile mărimile:

$x_0$  – distanța de la originea O a axei ( $Ox$ ) la poziția inițială a punctului;

$v_0$  - viteza inițială a punctului.

Termenul inițial definește momentul începerii studiului mișcării și este marcat de valoarea  $t=0$ . Pentru acest caz, avem relațiile 3.44.

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i}; \quad \vec{v} = \dot{x} \cdot \vec{i}; \quad \vec{a} = \ddot{x} \cdot \vec{i}; \quad y = z = \dot{y} = \dot{z} = \ddot{y} = \ddot{z} = 0 \quad (3.44)$$

Avem următoarele situații:

$\ddot{x} = 0$ . Cazul mișcării rectilinii uniforme. Prin integrarea ecuației  $\ddot{x} = 0$  se obține 3.45.

$$\dot{x} = C_1; \quad x = C_1 \cdot t + C_2 \quad (3.45)$$

În care constantele de integrare se determină din condițiile inițiale; se determină astfel, legile mișcării rectilinii și uniforme.

$$\dot{x}(0) = v_0 = C_1; \quad x(0) = x_0 = C_2 \quad (3.46)$$

$$\begin{cases} x = x_0 + v_0 \cdot t \\ v = v_0 = \text{const.} \end{cases} \quad (3.47)$$

Cazul mișcării rectilinii uniform variate. Dacă  $\ddot{x} \cdot \dot{x} > 0$  mișcarea este accelerată, iar dacă  $\ddot{x} \cdot \dot{x} < 0$  mișcarea este încetinită.

Prin integrarea în raport cu timpul, a ecuației diferențiale  $\ddot{x} = a$ , se obține 3.48.

$$\dot{x} = a \cdot t + C_1; \quad x = \frac{a \cdot t^2}{2} + C_1 \cdot t + C_2 \quad (3.48)$$

Constantele se determină din condițiile inițiale, 3.49.

$$x(0) = x_0 = C_2; \quad \dot{x}(0) = v_0 = C_1 \quad (3.49)$$

Legile mișcării rectilinii uniforme variate devin 3.50.

$$\begin{cases} x = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \\ v = v_0 + a \cdot t \end{cases} \quad (3.50)$$

Dacă se folosește sistemul de coordinate Frenet, avem, 3.51 și 3.52.

$$\vec{v} = \dot{s} \cdot \vec{\tau} \quad \vec{a} = \ddot{s} \cdot \vec{\tau} + \frac{\dot{s}^2}{\rho_c} \cdot \vec{\gamma} \quad \rho_c \rightarrow \infty \quad (3.51)$$

$$\begin{cases} \vec{v} = \dot{s} \cdot \vec{\tau} \\ \vec{a} = \ddot{s} \cdot \vec{\tau} = \dot{v} \cdot \vec{\tau} \end{cases} \quad \vec{\tau} \equiv \vec{i} \quad (3.52)$$

### 3.3.2. Mișcarea circulară

Mișcarea este circulară atunci când punctul se mișcă pe o traекторie sub forma unui cerc. Sistemul de coordinate cel mai convenabil să fie studiat în sistemul de coordinate polare sau Frenet. Ecuația cercului cu centrul în originea sistemului de referință este  $\rho=R=\text{const.}$

Utilizând expresiile pentru traекторie, viteză și accelerație, în cazul mișcărilor plane, și ținând cont că  $\dot{\rho} = \ddot{\rho} = 0$  se obține pentru viteză expresia 3.53, unde  $\omega$  este viteza unghiulară (viteză de variație a unghiului  $\theta$ ), în rad/s.

$$\vec{v} = R \cdot \dot{\theta} \cdot \vec{i}_\theta \quad \text{cu} \quad |\vec{v}| = R \cdot \dot{\theta} = R \cdot \omega \quad \dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3.53)$$

Accelerația are expresia 3.54.

$$\vec{a} = -R \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \vec{i} + R \cdot \ddot{\theta} \cdot \vec{i}_\theta \quad (3.54)$$

Cu proiecțiile 3.55 și 3.56.

$$a_\rho = a_n = -R \cdot \dot{\theta}^2 = -R \cdot \omega^2 \quad \text{componenta normală} \quad (3.55)$$

$$a_\theta = a_t = R \cdot \ddot{\theta} = R \cdot \varepsilon \quad \text{componenta tangențială} \quad (3.56)$$

Cu  $\varepsilon$  s-a notat accelerația unghiulară a punctului, măsurată în  $[\text{rad/s}^2]$ , 3.57.

$$\varepsilon = \ddot{\theta} = \frac{d\omega}{dt} \quad (3.57)$$

Modulul accelerării, 3.58.

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} = R \cdot \sqrt{\varepsilon^2 + \omega^2} \quad (3.58)$$

Dacă se folosesc coordonatele Frenet, relațiile de bază vor fi 3.59.

$$\begin{cases} \vec{v} = \dot{s} \cdot \vec{\tau} \\ \vec{a} = \ddot{s} \cdot \vec{\tau} + \frac{\dot{s}^2}{R} \cdot \vec{\gamma} \\ s = R \cdot \theta \end{cases} \quad (3.59)$$

### Cazuri particulare

I. Accelerația unghiulară este 0. Cazul mișcării circulare uniforme.

$$\varepsilon = \ddot{\theta} = 0 \quad (3.60)$$

Integrând în raport cu timpul ecuația 3.60, se obține 3.61.

$$\dot{\theta} = C_1; \quad \theta = C_1 \cdot t + C_2 \quad (3.61)$$

Constantele  $C_1$  și  $C_2$  se determină din condițiile initiale:

$$\dot{\theta} = \omega_0 = \frac{v_0}{R}; \quad \theta(0) = \theta_0 \quad (3.62)$$

Se găsește legea de mișcare sub formă 3.63.

$$\theta = \frac{v_0}{R} \cdot t + \theta_0 = \omega_0 \cdot t + \theta_0 \quad (3.63)$$

II. Cazul mișcării circulare uniform variate.

$$\varepsilon = \ddot{\theta} = \text{const.} \neq 0 \quad (3.64)$$

Dacă  $\dot{\theta} \cdot \ddot{\theta} > 0$ , mișcarea este uniform accelerată, iar atunci când  $\dot{\theta} \cdot \ddot{\theta} < 0$ , mișcarea este uniform încetinită. Integrarea ecuației diferențiale  $\varepsilon = \ddot{\theta}$ , conduce la 3.65.

$$\dot{\theta} = \varepsilon \cdot t + C_1; \quad \theta = \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2} + C_1 \cdot t + C_2 \quad (3.65)$$

Constantele de integrare se determină cu ajutorul condițiilor initiale; legea de mișcare și legea vitezei unghiulare se găsește sub formă 3.66 și 3.67.

$$\theta = \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2} + \omega_0 \cdot t + \theta_0 \quad (3.66)$$

$$\omega = \varepsilon \cdot t + \omega_0 \quad (3.67)$$

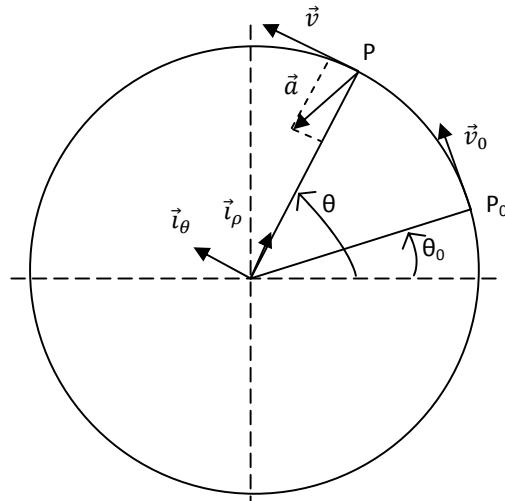


Fig. 3.11. Mișcarea circulară

### 3.4. Exemple de probleme

Un disc de rază  $R$  se rostogolește fără alunecare pe un plan orizontal, astfel încât centrul discului se deplasează cu viteza constantă  $v_0$ . Să se studieze mișcarea unui punct de pe circumferința discului.

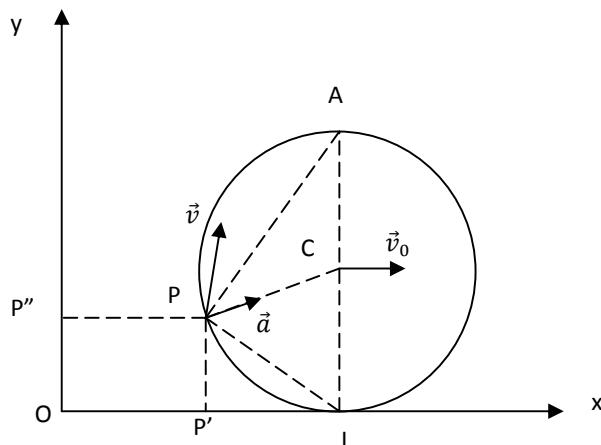


Fig. 3. 12. Problema deplasării discului

Dacă inițial centrul discului se află pe axa  $Oy$ , coordonatele pentru punctul  $P$  sunt sub forma 3.68; se ține cont de faptul că pentru o rostogolire fără alunecare, avem valabilă relația,  $OI = v_0 \cdot t = R \cdot \theta = \widehat{PI}$ :

$$\begin{cases} x_p = x = v_0 \cdot t - R \cdot \sin\theta = R \cdot (\theta - \sin\theta) \\ y_p = y = R - R \cdot \cos\theta = R(1 - \cos\theta) \end{cases} \quad (3.68)$$

Ecuatiile descriu o curbă numită cicloidă.

Determinarea vitezei este descrisă de relația 3.69.

$$\vec{v} = \dot{x} \cdot \vec{i} + \dot{y} \cdot \vec{j} = R \cdot (\dot{\theta} - \dot{\theta} \cdot \cos\theta) \cdot \vec{i} + R \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta \cdot \vec{j} \quad (3.69)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v_0}{R} \quad (3.70)$$

$$\vec{v} = v_0 \cdot (1 - \cos\theta) \cdot \vec{i} + v_0 \cdot \sin\theta \cdot \vec{j} = 2 \cdot v_0 \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \left( \sin \frac{\theta}{2} \cdot \vec{i} + \cos \frac{\theta}{2} \cdot \vec{j} \right) \quad (3.71)$$

$$|\vec{v}| = 2 \cdot v_0 \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.72)$$

Se demonstrează ușor că  $\vec{v} \perp \overrightarrow{PI}$  (prin unghiul arcului de cerc descris de laturile unghiului), adică direcția vitezei punctului P trece prin A, punctul situat la partea superioară a diametrului vertical al cercului.

Determinarea accelerării se face prin relația 3.73, cu modulul 3.74.

$$\vec{a} = \dot{\vec{v}} = v_0 \cdot \dot{\theta} \cdot \sin\theta \cdot \vec{i} + v_0 \cdot \dot{\theta} \cdot \cos\theta \cdot \vec{j} = \frac{v_0^2}{R} \cdot (\sin\theta \cdot \vec{i} + \cos\theta \cdot \vec{j}) \quad (3.73)$$

$$|\vec{a}| = \frac{v_0^2}{R} \quad (3.74)$$

Se constată că vectorul accelerării  $\vec{a}$  este dirijat pe direcția vectorului  $\overrightarrow{PC}$ . Se poate determina expresia razei de curbură a traiectoriei, 3.75.

$$\begin{cases} |\vec{v}|^3 = 8 \cdot v_0^3 \cdot \sin^3 \frac{\theta}{2} \\ |\vec{a} \times \vec{v}| = 2 \cdot \frac{v_0^3}{R} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} \end{cases} \rightarrow \rho_c = \frac{|\vec{v}|^3}{|\vec{a} \times \vec{v}|} = 4 \cdot R \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.75)$$

### 3.5. Cinematica rigidului

Se ocupă cu determinarea traiectoriilor, vitezelor și accelerărilor tuturor punctelor aparținând solidului rigid. Cum solidul rigid este alcătuit dintr-o infinitate de puncte. Astfel, trebuie stabilite legi general valabile pentru rigidul studiat, pentru orice punct al acestuia. Acestea sunt în funcție nu numai de timp, dar și de poziția punctului față de solidul analizat. Astfel trebuie raportat la două sisteme de referință.

Un sistem fix ( $O_0x_0y_0z_0$ ), față de care urmează să fie stabilite caracteristicile mișcării. Altul mobil, solidar cu rigidul studiat ( $Oxyz$ ). Este utilizat pentru a poziționa punctul în raport cu solidul căruia îi aparține. Se consideră un punct arbitrar, P, al rigidului cu coordonatele  $x, z, y$ , față de reperul mobil și coordonatele  $x_0, y_0, z_0$ , față de sistemul de referință fix.

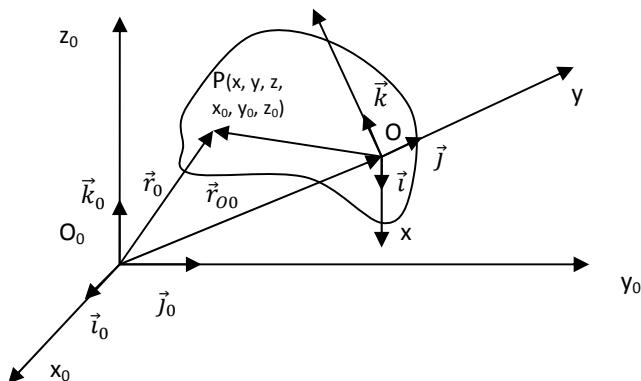


Fig. 3.13. Coordonatele unui punct față de un sistem fix și unul mobil de coordonate

Vectorul de poziție al punctului P față de reperul fix, de versorii,  $\vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0$ , care sunt constanți este notat cu  $\vec{r}_0$ .

$$\vec{r}_0 = x_0 \cdot \vec{i}_0 + y_0 \cdot \vec{j}_0 + z_0 \cdot \vec{k}_0 \quad (3.76)$$

Vectorul de poziție al punctului P față de reperul mobil,  $\vec{r}$ ; versorii,  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ , sunt variabili ca direcție, iar x, y, z, sunt constante (P este solidar legat de rigid, la fel ca și reperul mobil).

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k} \quad (3.77)$$

Pentru cele două sisteme de referință mobil și fix, există o corelație;  $\vec{r}_{00}$  este vectorul de poziție al originii sistemului de referință mobil față de sistemul de referință fix.

$$\vec{r}_{00} = x_{00} \cdot \vec{i}_0 + y_{00} \cdot \vec{j}_0 + z_{00} \cdot \vec{k}_0 \quad (3.78)$$

Pentru a cunoaște complet poziția solidului rigid trebuie cunoscută poziția punctului O și orientarea celor trei axe (Ox), (Oy), (Oz), prin funcțiile:

$$\begin{cases} \vec{i} = \vec{i}(t) \\ \vec{j} = \vec{j}(t) \\ \vec{k} = \vec{k}(t) \end{cases} \quad (3.79)$$

Aparent trebuie cunoscute 12 parametrii scalari ( $x_{00}, y_{00}, z_{00}$ ) și câte trei proiecții pe axele reperului fix ale versorilor. Există relații specifice între versorii ortogonali  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ .

$$\begin{cases} \vec{i} \cdot \vec{j} = \vec{j} \cdot \vec{i} = 0; \vec{k} \cdot \vec{j} = \vec{j} \cdot \vec{k} = 0; \vec{i} \cdot \vec{k} = \vec{k} \cdot \vec{i} = 0 \\ i^2 = 1; j^2 = 1; k^2 = 1 \end{cases} \quad (3.80)$$

Din relațiile anterioare rezultă că de fapt doar șase parametrii independenți definesc poziția unui solid rigid, ceea ce conduce la concluzia că un solid rigid dispune de șase grade de libertate. Cel mai adesea cei șase parametrii cu ajutorul căror se stabilește poziția unui solid rigid sunt:

- Trei segmente de dreaptă,  $(x_{00}, y_{00}, z_{00})$  reprezentând coordonatele punctului O (originea sistemului de referință mobil) față de sistemul fix.
- Trei unghiuri (unghiurile lui Euler) prin intermediul căror se precizează funcțiile care se definesc:
  - $\Psi$  – unghiul de precesie. Se măsoară în planul fix  $(Ox_0y_0)$ , între axa fixă  $(Ox_0)$  și dreapta (ON);
  - $\varphi$  – unghiul de rotație propriu. Se măsoară în planul mobil  $(Oxy)$ , între dreapta (ON) și axa mobilă  $(Ox)$ ;
  - $\Theta$  – unghiul de nutație. Se măsoară între axa fixă  $(Oz_0)$  și axa mobilă  $(Oz)$ .

Dreapta (ON) care se numește linia nodurilor, este intersecția planului mobil  $(Oxy)$  cu planul fix  $(Ox_0y_0)$ . Ca rezultat, dreapta (ON) este perpendiculară pe planul determinat de axele  $(Oz_0)$  și  $(Oz)$ .

Față de sistemul de referință fix, un punct arbitrar P al solidului rigid are vectorul de poziție,  $\vec{r}_0$ , pentru care se poate scrie.

$$\vec{r}_0 = \vec{r}_{00} + \vec{r} \quad (3.81)$$

Înmulțind scalar relația de mai sus cu versorii  $\vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0$ , se obțin legile de mișcare ale punctului, care rezolvă problema traiectoriilor.

$$\begin{cases}x_0 = x_{O0} + \vec{r} \cdot \vec{l}_0 \\ y_0 = y_{O0} + \vec{r} \cdot \vec{j}_0 \\ z_0 = z_{O0} + \vec{r} \cdot \vec{k}_0\end{cases}\quad (3.82)$$

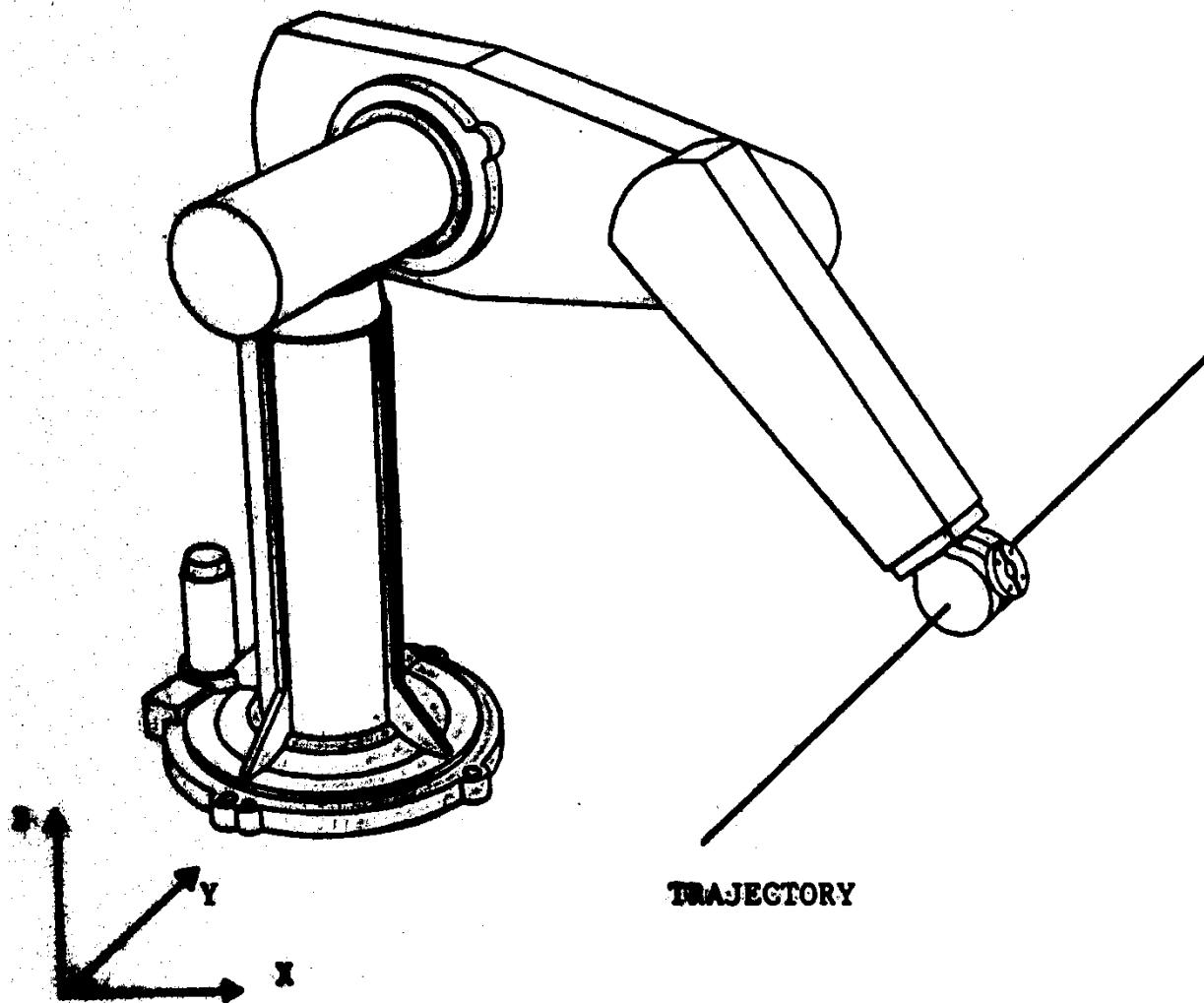
# Curs 3

Cinematica robotului

# Obiective

- Pentru o structura de robot sa se realizeze modelarea acestuia
  - Conceptul de cadre
  - Ecuatiile referitoare la pozitia si orientarea acestuia (ecuatiile problemei directe si inverse)
    - Se cunosc pozitiile si orientarea legaturilor in corelatie cu a celoralte

# Modelul analizat



# Caracteristici de baza

- Grade de libertate (numarul de miscari complementare)
- Capabilitati de miscare (volum de munca, accesibilitate si manevrabilitate)
- Precizia miscarii (rezolutie, repetabilitate, precizie si conformitate)
- Caracteristici dinamice (Sarcină utilă, viteză și stabilitate)

# Precizia miscarii

## Acuratetea (precizia)

Capacitate de a plasa efectoarele final într-o poziție și orientare (poziție) dată în volumul de lucru al robotului, dintr-o poziție inițială aleatoare.

ε Creste cu distanța față de axa robotului.

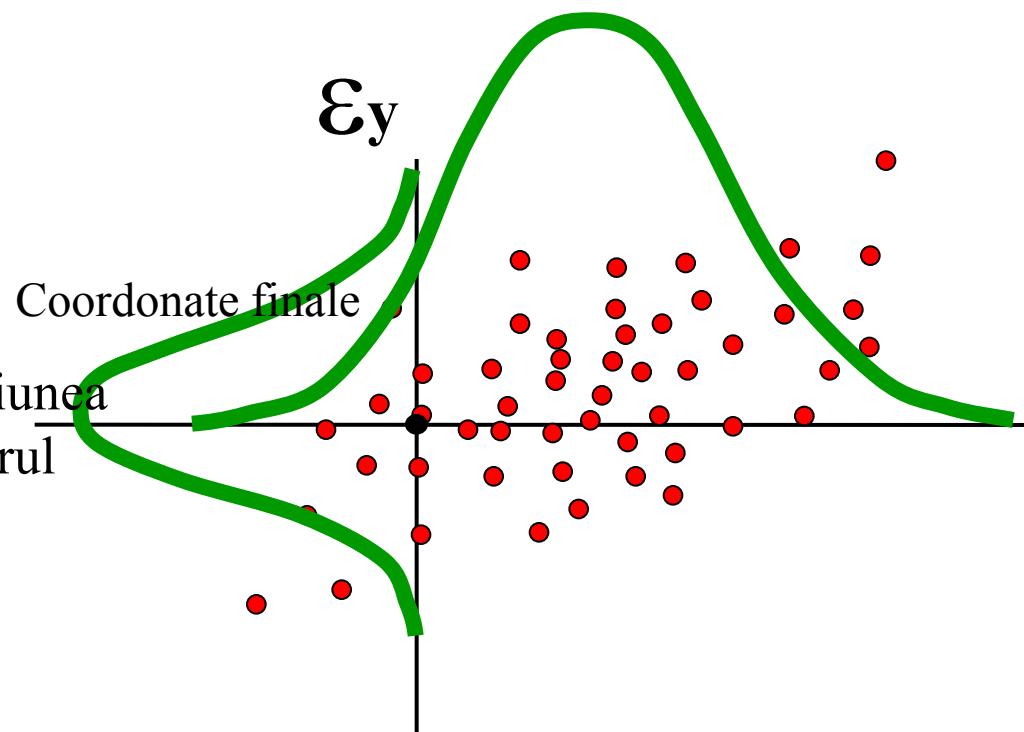
Precizia depinde de:

Jocul mecanic

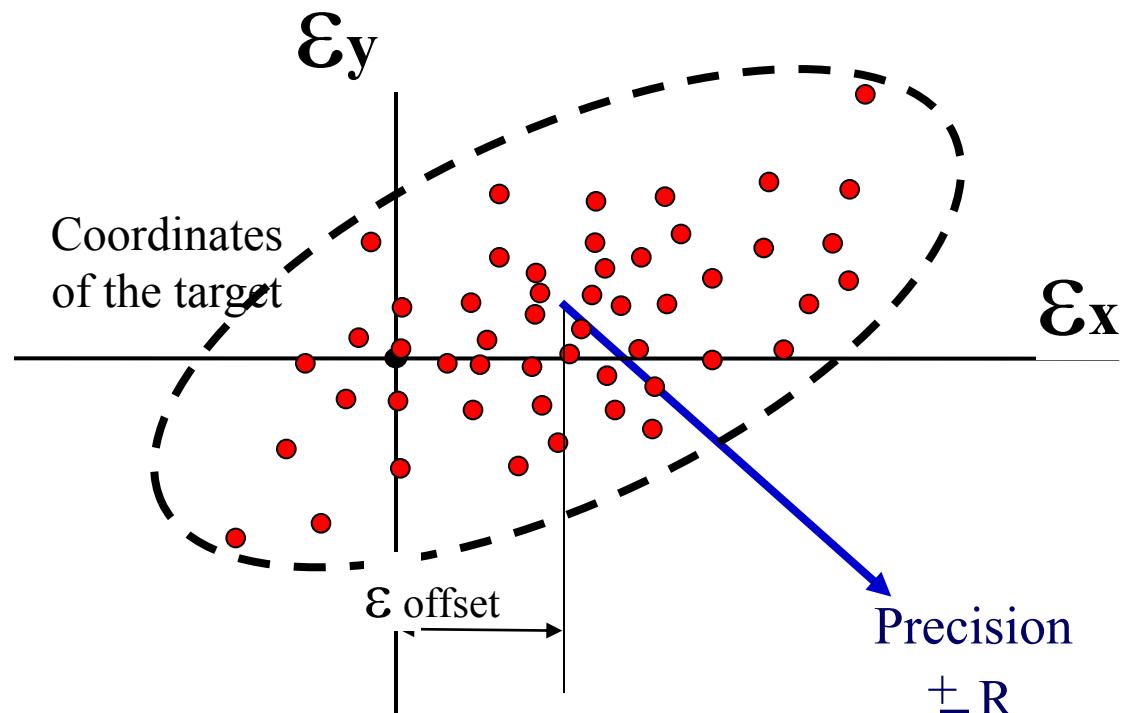
Compensarea senzorilor

Rezoluția senzorilor

Alinieri greșite în poziția și dimensiunea elementelor rigide, în special efectoarelor finale E.E.



# Precizia miscarii



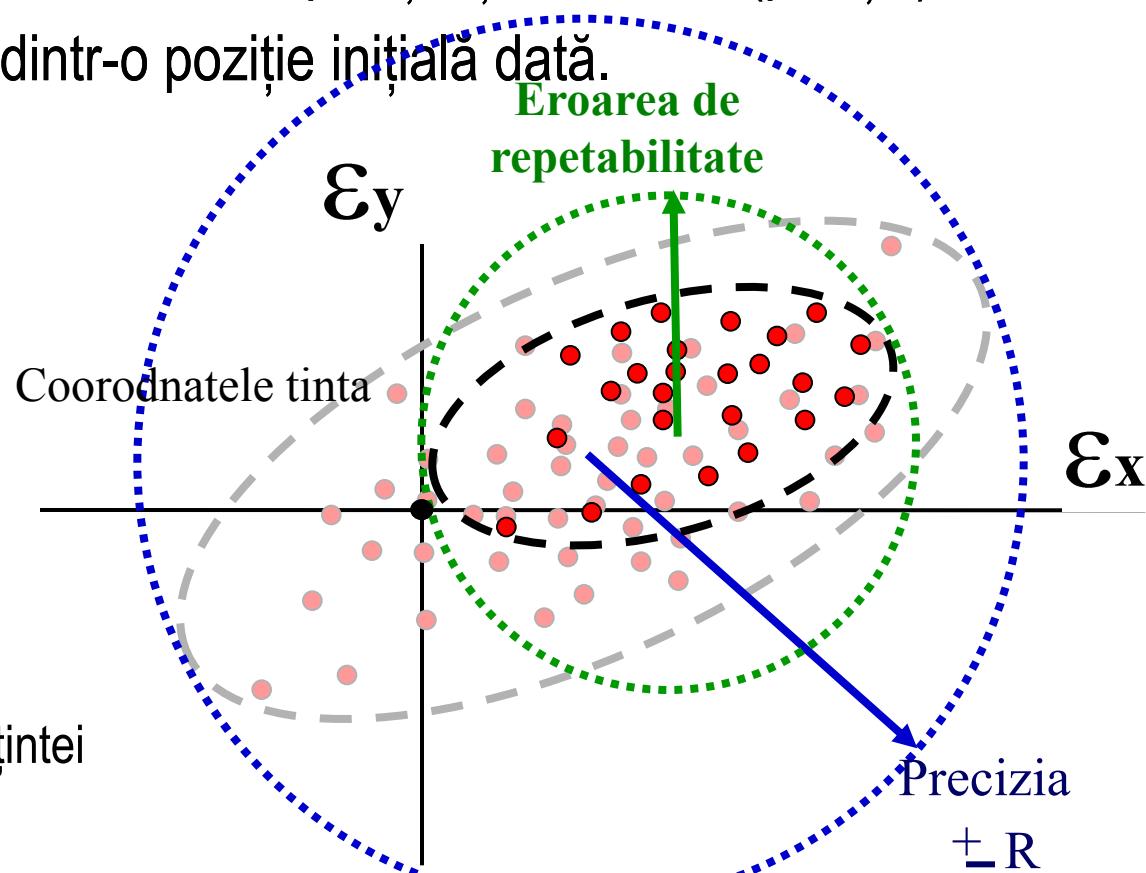
# Precizia miscarii

Repetabilitatea

Capacitate de a plasa efectoarele final într-o poziție și orientare (poziție) dată în volumul de lucru al robotului, dintr-o poziție inițială dată.

Repetabilitatea depinde de:

- Joc mecanic
- Poziția țintă
- Viteza și direcția la atingerea țintei



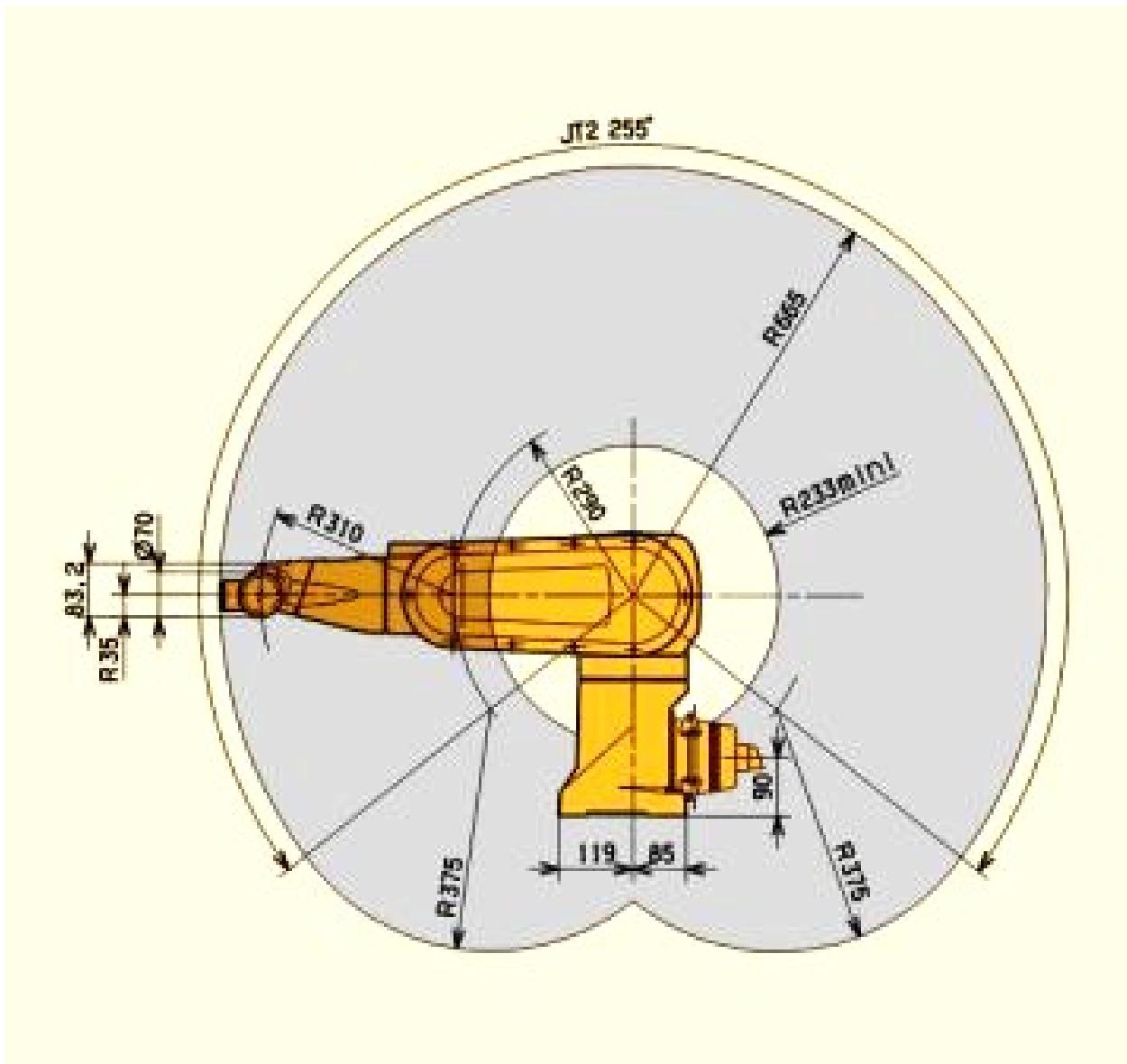
# Precizia miscarii

Rezoluție:

- Deplasare minimă pe care efectorul final o poate realiza și / sau unitatea de control o poate măsura.
- Determinat de îmbinări mecanice și numărul de biți ai senzorilor legați la îmbinările robotului.

Rezolutia senzorului = intervalul de referinta /  $2^n$

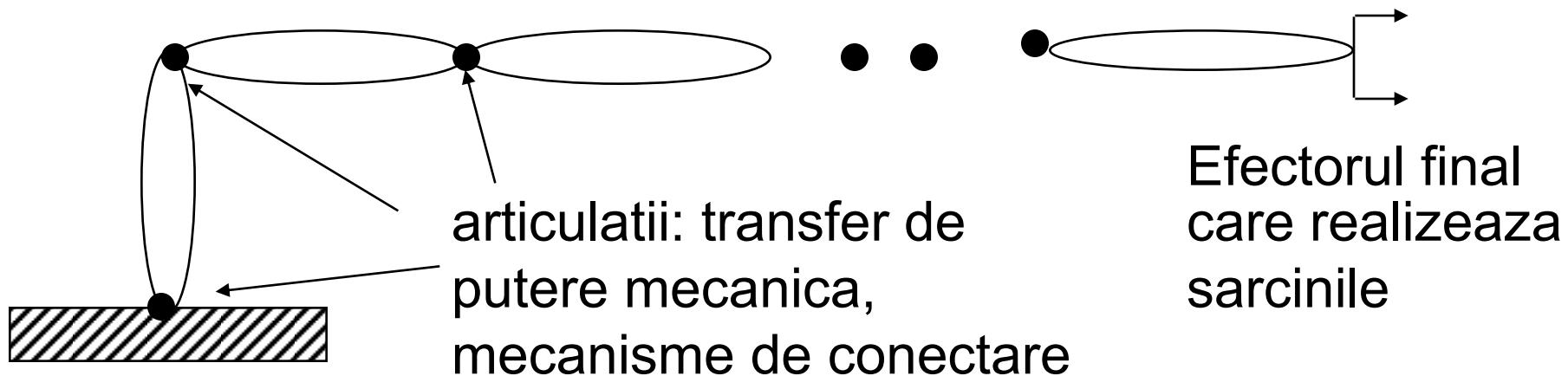
# Exemplu de volum de lucru



Sarcinile robotului

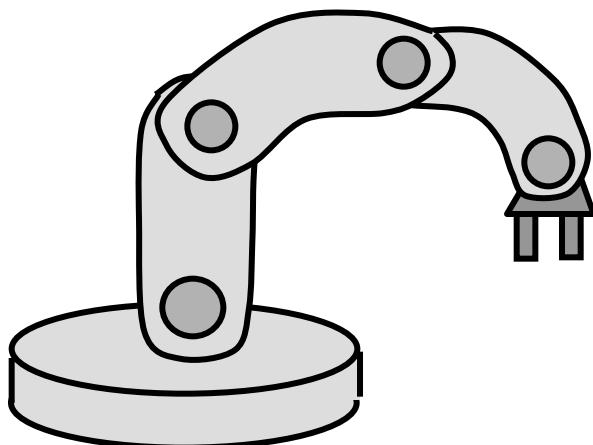
- pozitionare/orientare
- Forta/momentul exercitata asupra mediului

Lant de repere fixe conectate prin articulatii

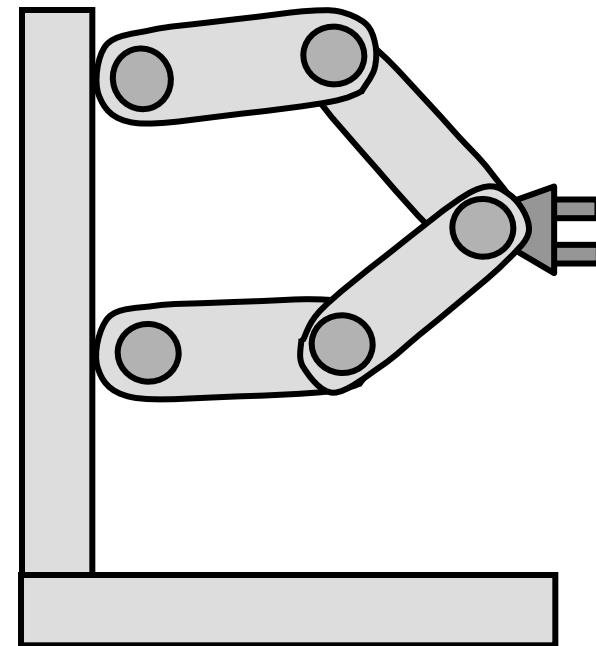


Lanț cinematic: secvență de elemente rigide legate prin articulații active pentru a îndeplini o sarcină eficient

Deschis:

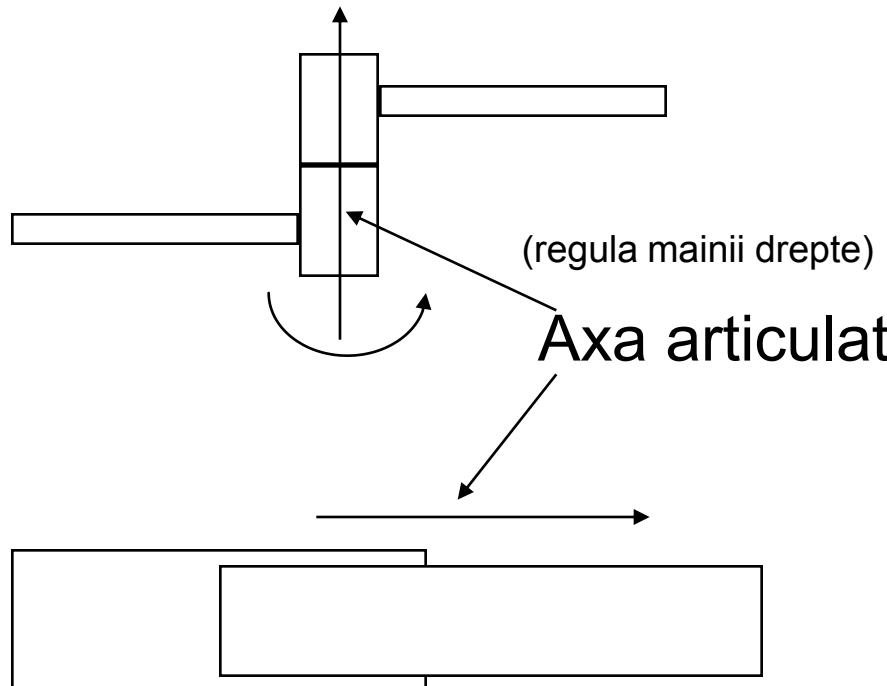


Inchis (Paralel):



# Articulatii

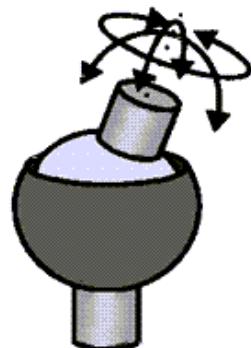
Sunt doua tipuri de baza:



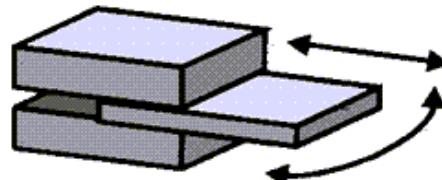
Rotational

Translational  
(prismatic)

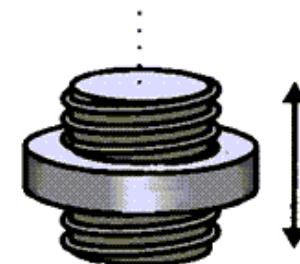
# Tipuri de posibile articulatii



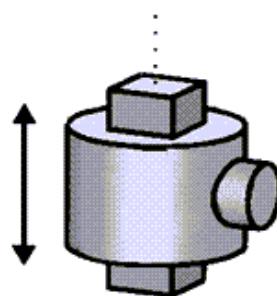
Sferica (3 grade  
de libertate)



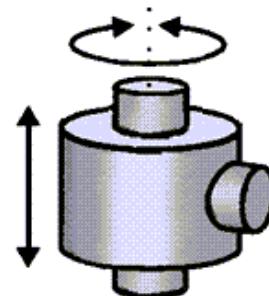
Plana (2 grade de  
libertate)



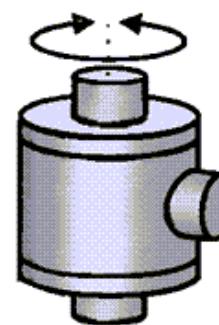
Surub (1 grad de  
libertate)



Liniar (1 grad de  
libertate)



Liniar-rotational  
(2 grad de  
libertate)



Cilindric (1 grad  
de libertate)

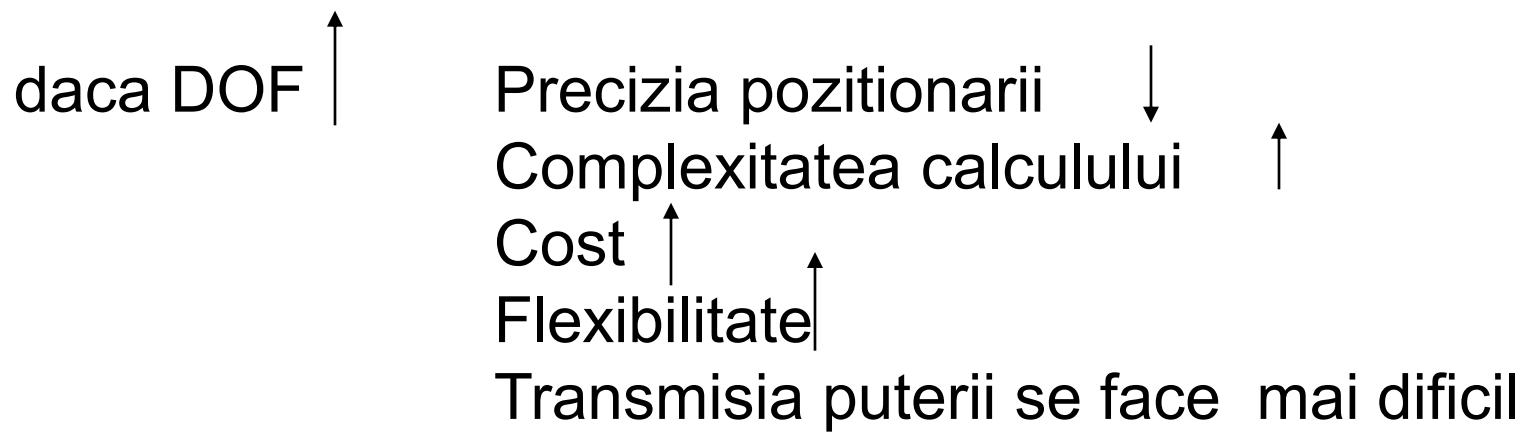
# Grade de libertate (DOF)

Spatiul 3D = 6 DOF

The diagram illustrates the decomposition of 6 degrees of freedom (DOF) into spatial components. A central text box contains "Spatiul 3D = 6 DOF". Two arrows point from this text to the right, each labeled with a component: "3 pozitii" at the top and "3 orientari" at the bottom.

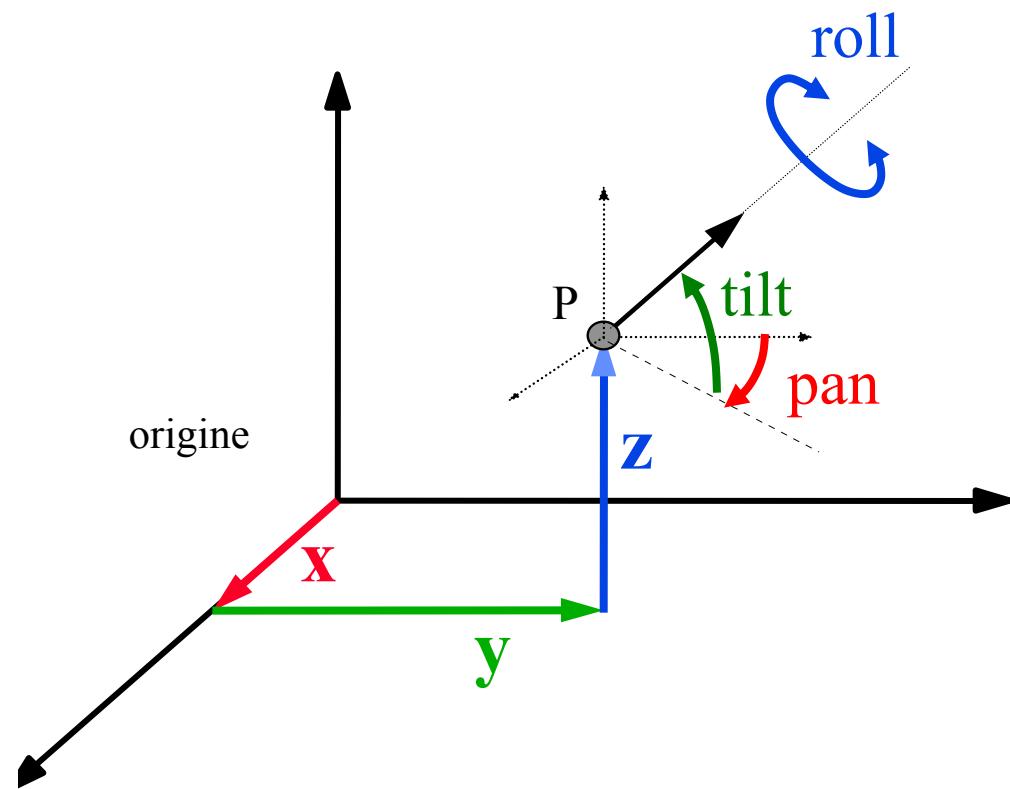
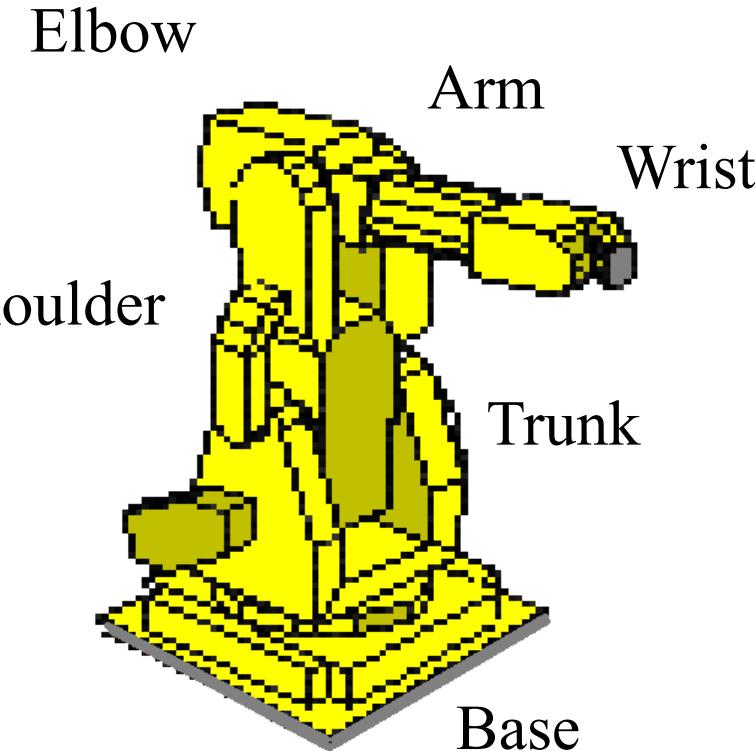
## In robotica,

**DOF = numarul de articulatii independente**



# Grade de libertate (DOF)

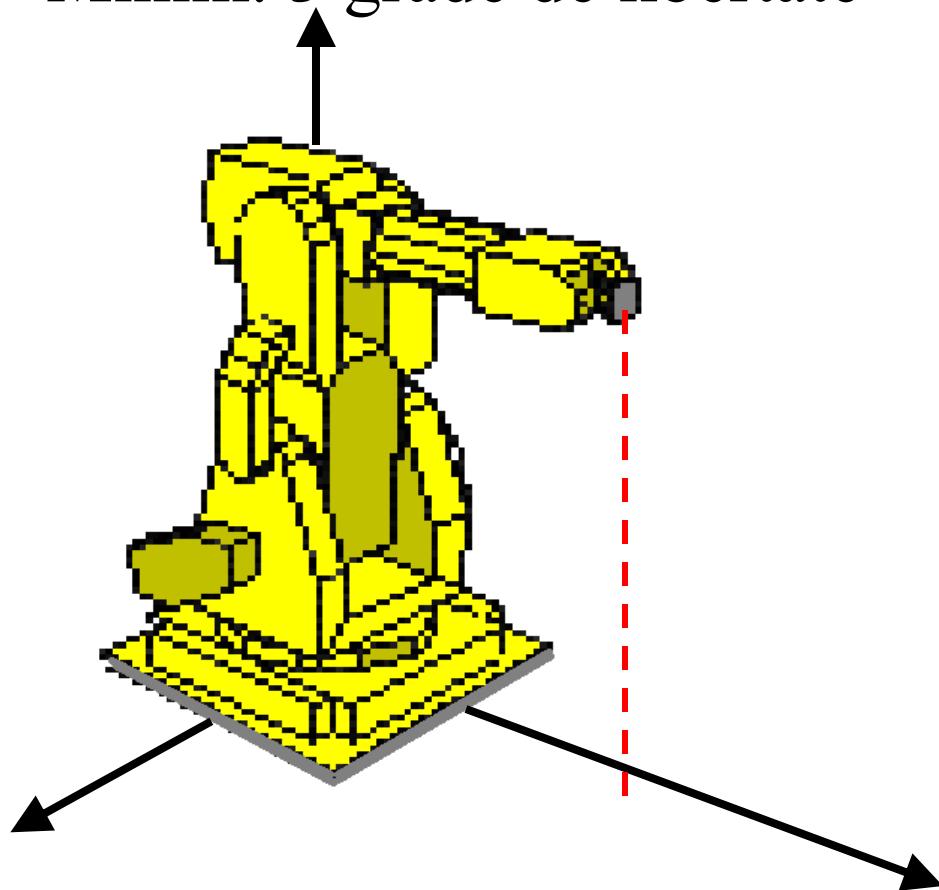
Orientarea efectorului final în spațiul 3D, necesită trei DoF suplimentare pentru a produce cele trei rotații.



# Grade de libertate (DOF)

Pozitionarea tridimensională: (x, y, z)

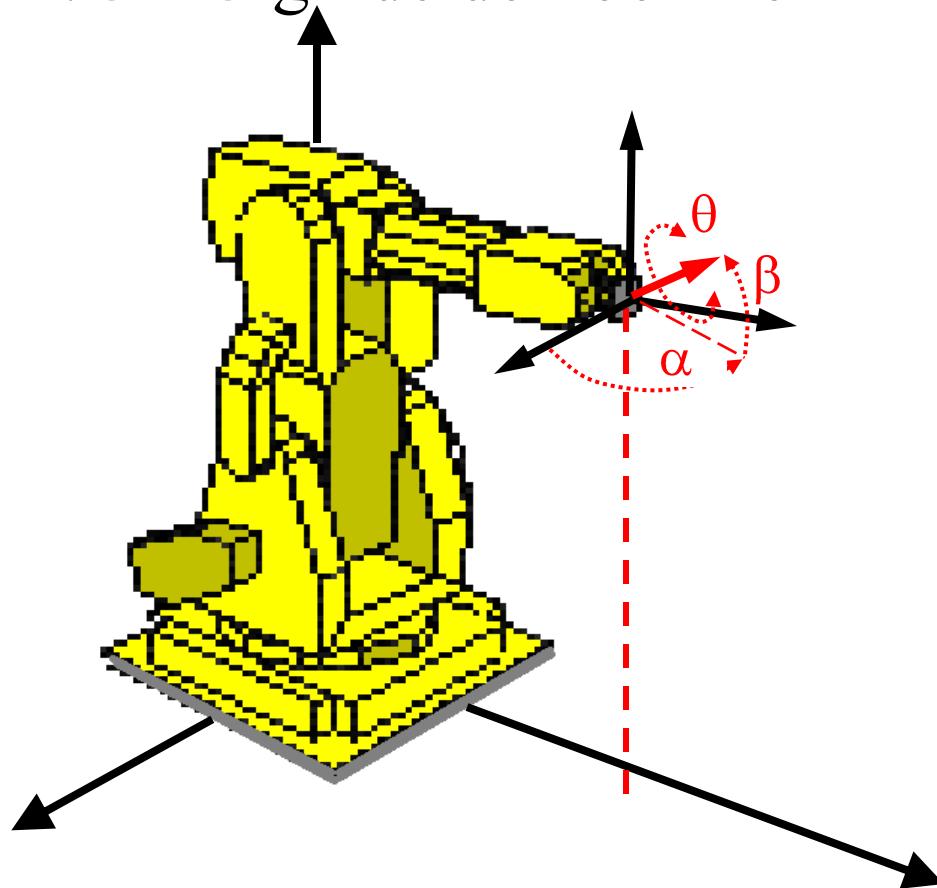
Minim: 3 grade de libertate



# Grade de libertate (DOF)

Pozitionare + orientare:  $(x, y, z, \alpha, \beta, \theta)$

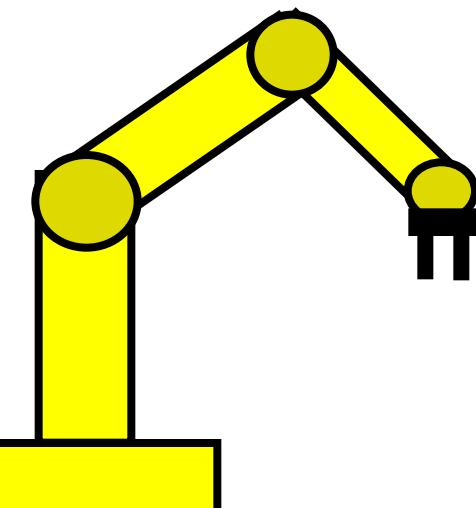
Minim: 3 + 3 grade de libertate



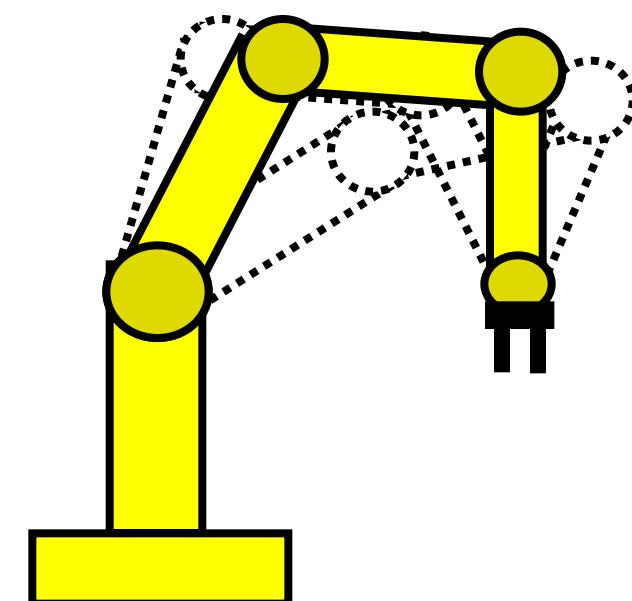
# Grade de libertate (DOF)

Gradul de manevrabilitate este numărul de actuatoare care, deși produc noi mișcări, nu contribuie la noi grade de libertate.

Arhitectură: configurație și fel de articulații ale lanțului cinematic care determină volumul de lucru și accesibilitatea.



Acces forțat (fără redundanță)

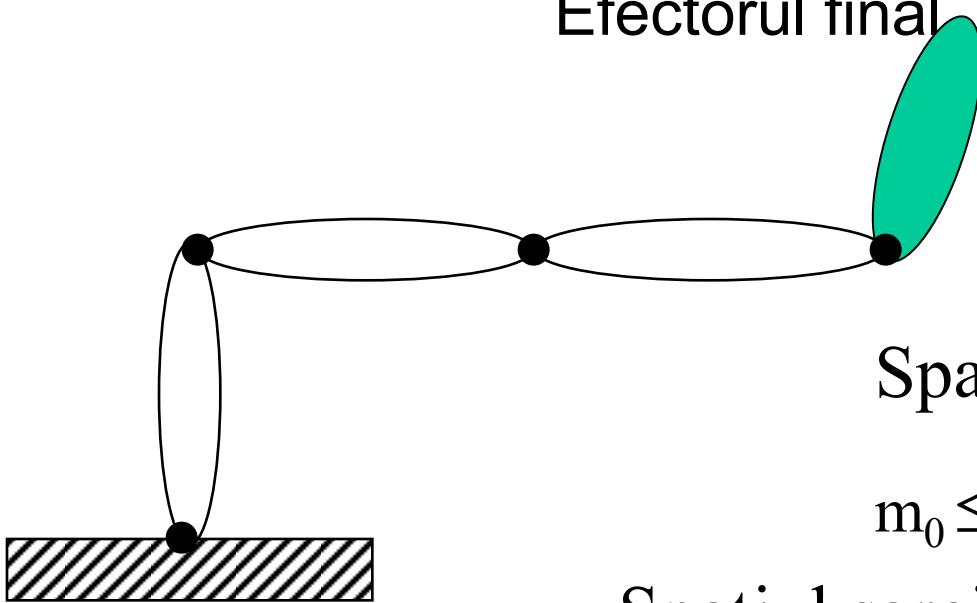


Acces multiplu (cu DoF redundant)

Cartesian Space:

$m$  parametrii

6 parameterii independenti



Spatiul operational:

$m_0 \leq 6$  parametrii independenti

Spatiul sarcinii:

$m_k < m$  : subset al parametrilor  
efectorului final pentru realizarea sarcinii

Spatiul  
articulatiilor:  
 $n$  DOF

$m_{k(0)}$ : pentru parametrii independenti

# Modelarea cinematicii robotului

## Reprezentarea DENAVIT-HARTENBERG

- Denavit-Hartenberg (D-H) Reprezentarea a fost folosită, aproape universal, pentru a obține descrierea cinematică a manipulatorilor robotici.
- Atractia reprezentării D-H se află în abordarea sa algoritmică.
- În continuare, se prezinta un algoritm pentru alocarea cadrelor de coordonate robotizate, evidențiem convențiile asociate abordării D-H și exemplificăm dezvoltarea prin manipulatorii Puma și Stanford.

# **Modelarea cinematicii robotului**

## Pasul 1 : Numarul de articulatii si legaturi (segmente)

Manipulatorii robotici sunt lanțuri cinematice deschise articulate de N corpuri rigide (legături) care sunt conectate serial de articulații. Legăturile sunt numerotate consecutiv de la bază (legătura 0) până la capătul final (legătura N). Articulațiile sunt punctele de articulare între legături și sunt numerotate de la 1 la N, astfel încât articulația i conectează legăturile (i-1) și i. Fiecare articulație oferă un grad de libertate care poate fi o rotație sau o traducere. Nu există nici o îmbinare la sfârșitul legăturii finale.

# Modelarea cinematicii robotului

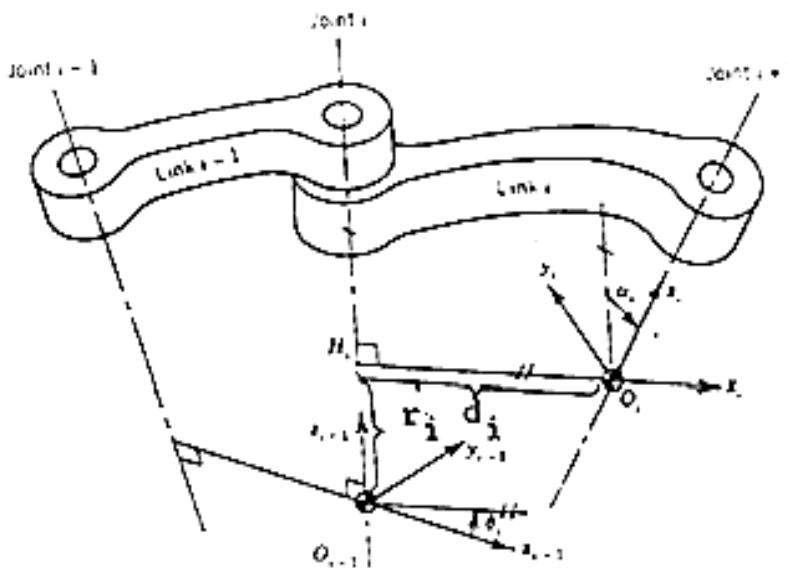
## Pasul 2 : Atribuirea de coordonate segmentelor

Pentru a descrie geometria mișcării robotului, atribuim un cadru de coordonate carteziene ( $O_i; x_i, y_i, z_i$ ) fiecărei legături, după cum urmează:

- axa  $z_i$  este direcționată de-a lungul axei de mișcare a articulația  $(i + 1)$ , adică legătura  $(i + 1)$  se rotește aproximativ sau se translateaza de-a lungul  $z_i$ ;
- axa  $x_i$  se află de-a lungul normalului comun din axa  $z_{i-1}$  la axa  $z_i$  (dacă  $z_{i-1}$  este paralelă cu  $z_i$ , atunci  $x_i$  este specificat în mod arbitrar, sub rezerva doar a  $x_i$  fiind perpendicular pe  $z_i$ );

# Modelarea cinematică robotului

Pasul 4 : Identificarea parametrilor cinematici al legaturii



axa  $z_i$  este direcționată de-a lungul axei de mișcare a articulația  $(i + 1)$ , adică legătura  $(i + 1)$  se rotește aproximativ sau se translatează de-a lungul  $z_i$ ;

axa  $x_i$  se află de-a lungul normalului comun din axa  $z_{i-1}$  la axa  $z_i$

dacă  $z_{i-1}$  este paralelă cu  $z_i$ , atunci  $x_i$  este specificat în mod arbitrar, sub rezerva doar a  $x_i$  fiind perpendicular pe  $z_i$

# **Modelarea cinematicii robotului**

Pasul 2 : Asocierea coordonatelor legaturii

- axa  $y_i$  completează coordonata prin regula mainii drepte.

Originea cadrului de bază al robotului  $O_0$  poate fi plasată oriunde în baza de sprijin, iar originea ultimului cadru (sistem) de coordonate (efector final) este specificată de geometria efectorului final.

# Modelarea cinematicii robotului

## Pasul 3 : Definirea coordonatelor articulatiilor

Coordonata articulației  $q_i$  este deplasarea unghiulară în jurul articulației  $z_{i-1}$  dacă i este rotativă, sau deplasarea liniară de-a lungul  $z_{i-1}$  dacă articulația i este translatională.

Spațiul dimensional N definit de coordonatele comune  $(q_1, \dots, q_N)$  se numește spațiul de configurare al mecanismului N DOF.

# Modelarea cinematicii robotului

Pasul 4 : Identificarea parametrilor cinematici ai legaturilor

În general, patru transformări elementare sunt necesare pentru a raporta cadrul de coordonate i la cadrul de coordonate i-1:

- Rotirea cu un unghi de  $\theta_i$  (în sensul spre dreapta) față de axa  $z_{i-1}$ , astfel încât axa  $x_{i-1}$  să fie paralelă cu axa  $x_i$ .
- Translatarea distanței  $r_i$  de-a lungul direcției pozitive a axei  $z_{i-1}$ , pentru a alinia axa  $x_{i-1}$  cu axa  $x_i$ .

# Modelarea cinematicii robotului

Pasul 4 : Identificarea parametrilor cinematici ai legaturilor

- Translatarea distanței  $d_i$  de-a lungul pozitivului direcției axei  $x_{i-1} = x_i$ , pentru a se uni originile  $O_{i-1}$  și  $O_i$ .
- Rotirea cu un unghi de  $\alpha_i$  (în sensul spre dreapta) spre axa  $x_{i-1} = x_i$ , pentru a uni cele două sisteme de coordinate.

Cadrul de coordonate al i-a este, prin urmare, caracterizat prin cei patru parametri de legătură cinematică D-H:  $\theta_i$ ,  $r_i$ ,  $d_i$  și  $\alpha_i$ .

# Modelarea cinematicii robotului

Pasul 4 : Identificarea parametrilor cinematici ai legaturilor

$$\theta_i, r_i, d_i, \alpha_i$$

Dacă articulația i este rotativă, atunci  $q_i = \theta_i$  și  $\alpha_i$ ,  $d_i$  și  $r_i$  sunt parametri constanti care depind de proprietățile geometrice și configurația legăturii i.

Dacă articulația i este translatională, atunci  $q_i = r_i$ , și  $d_i$ ,  $\alpha_i$  și  $\theta_i$  sunt parametri constanti care depind de configurația legăturii i. Atât pentru articulațiile de rotație, cât și pentru cele de translație,  $r_i$  și  $\theta_i$  sunt distanța și respectiv, unghiul dintre legăturile  $(i - 1)$  și i;  $d_i$  și  $\alpha_i$  sunt lungimea și „răsucirea” legăturii i.

# Modelarea cinematicii robotului

Pasul 5 : Definirea matricei de transformare a legaturilor

Poziția și orientarea cadrului de coordonate al i-lea pot fi exprimate în cadrul de coordonate (i - 1) prin următoarea matrice de transformare omogenă

$$A_i = \text{Rot}(z, \theta) \text{ Trans}(0, 0, r_i) \text{ Trans}(d_i, 0, 0) \text{ Rot}(x, \alpha)$$

$$A_i(q_i) = {}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & d_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & d_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & r_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

# Modelarea cinematicii robotului

Pasul 6 : Calculeaza matricea transformarii  
directe

Poziția și orientarea cadrului de coordonate ale efectorului final sunt exprimate în cadrul de coordonate de bază prin matricea de transformare directă:

$${}^0T_N(q_1, q_2, \dots, q_N) = {}^0T_N = A_1 A_2 \dots A_N = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

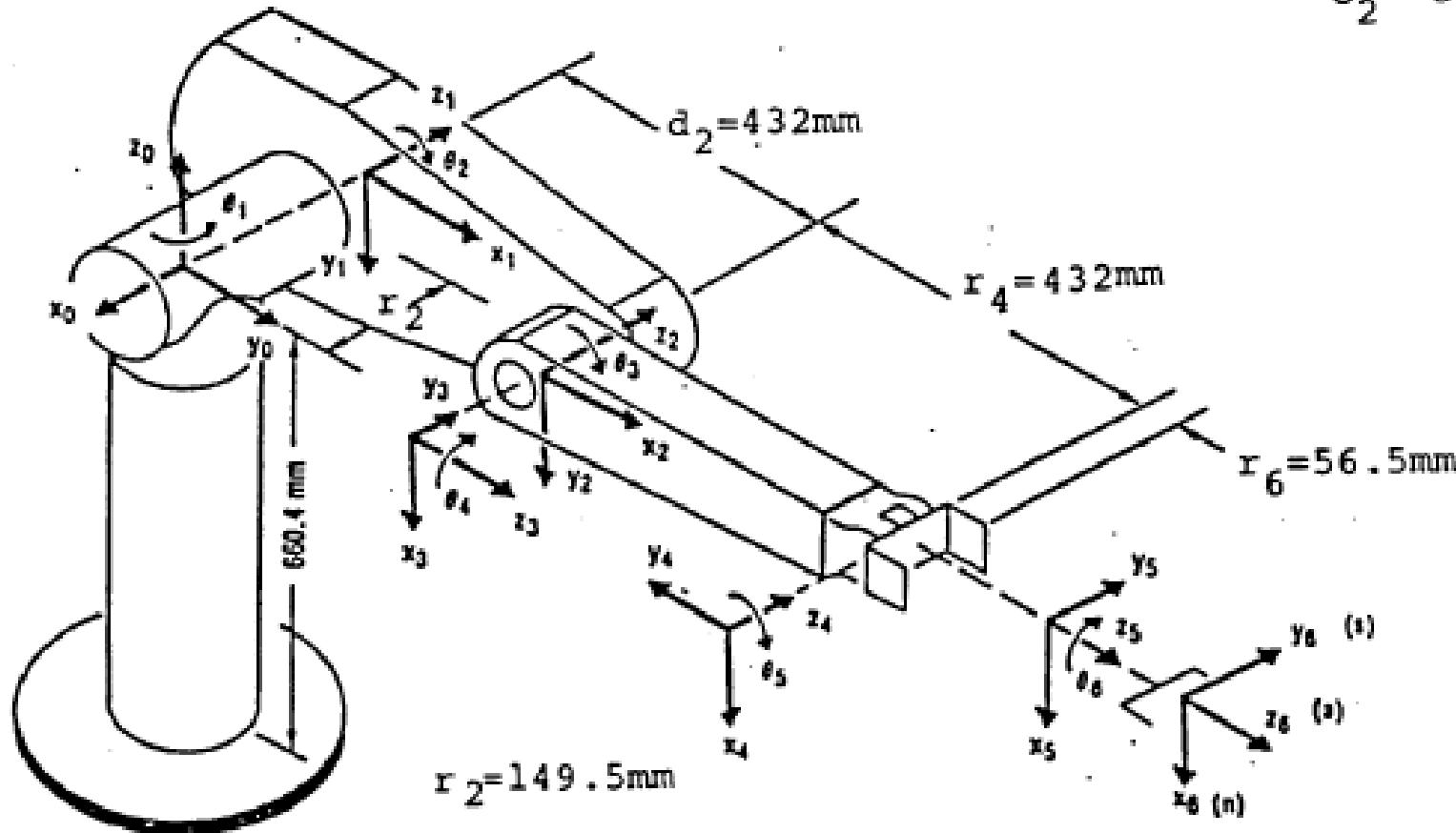
# Modelarea cinematicii robotului

EXEMPLUL 1: Robotul Puma

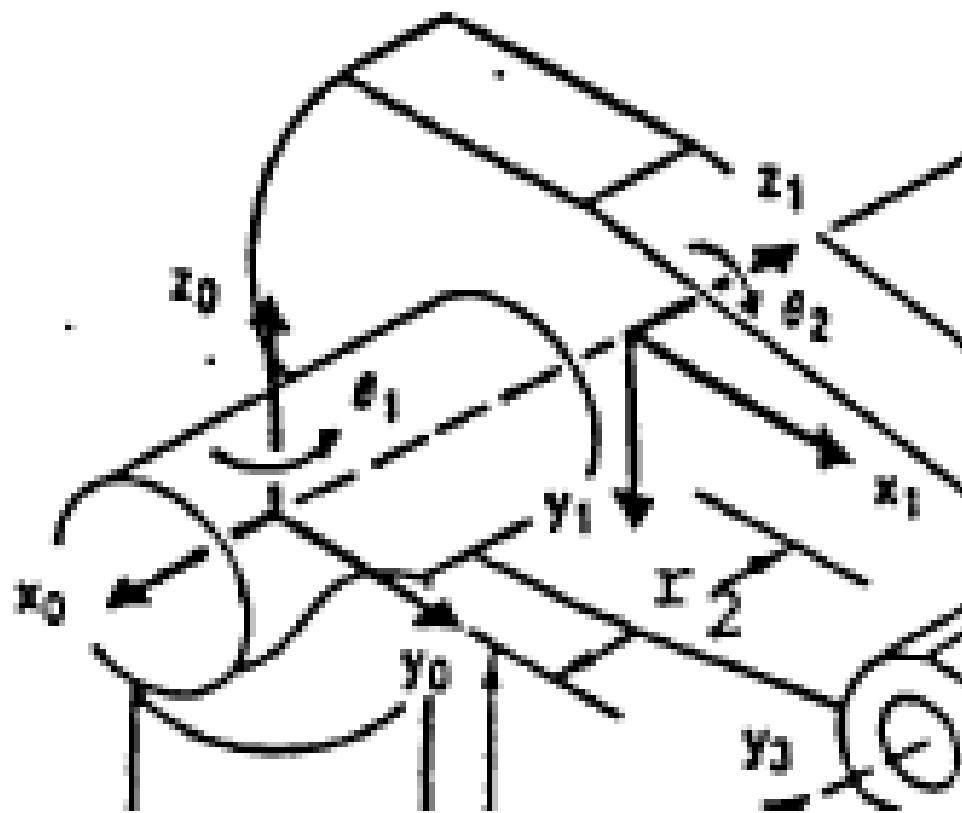
Link Coordinate Systems:

$$O_1 = O_0$$

$$O_2 = O_3, \quad O_4 = O_5$$

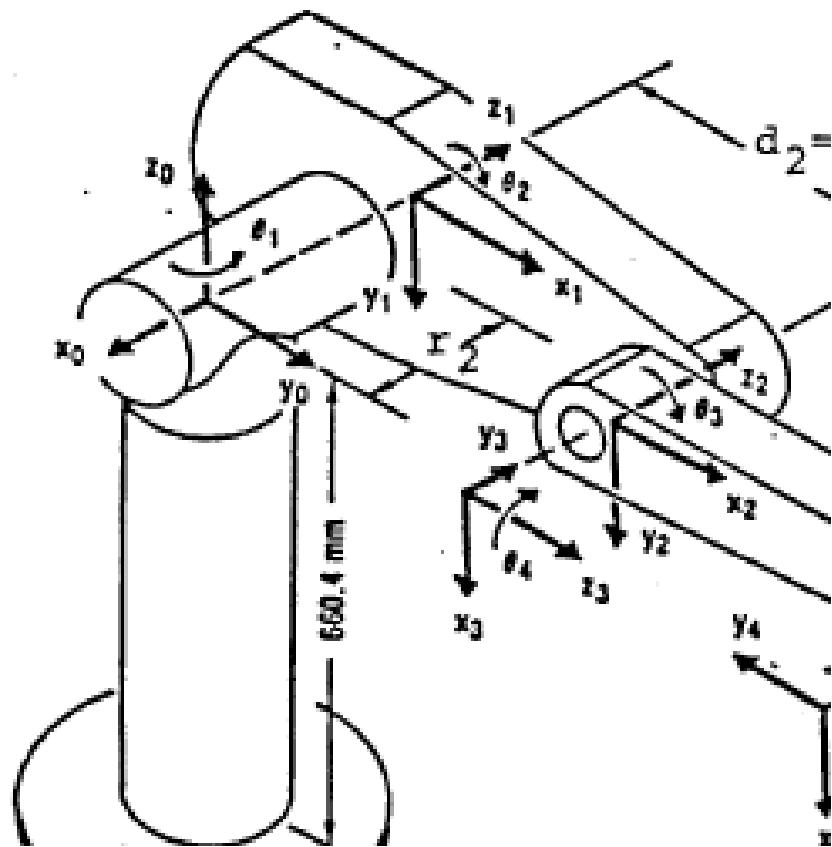


# Sistemele de coordonate 0 si 1



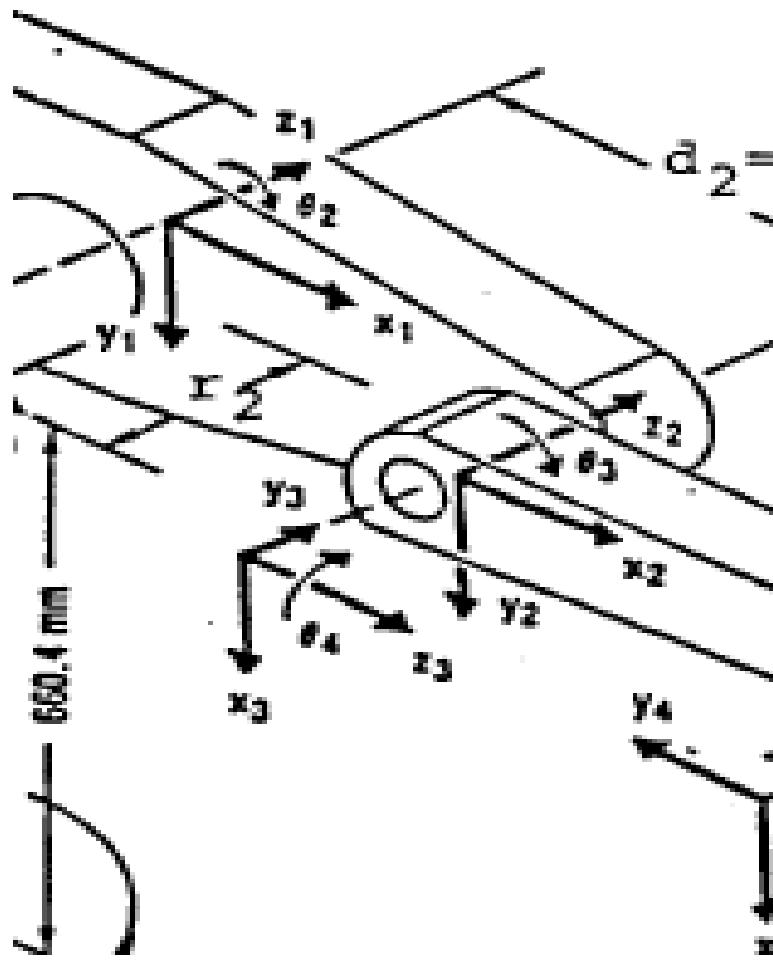
# Sistemele de coordonate 1 si 2

Lin

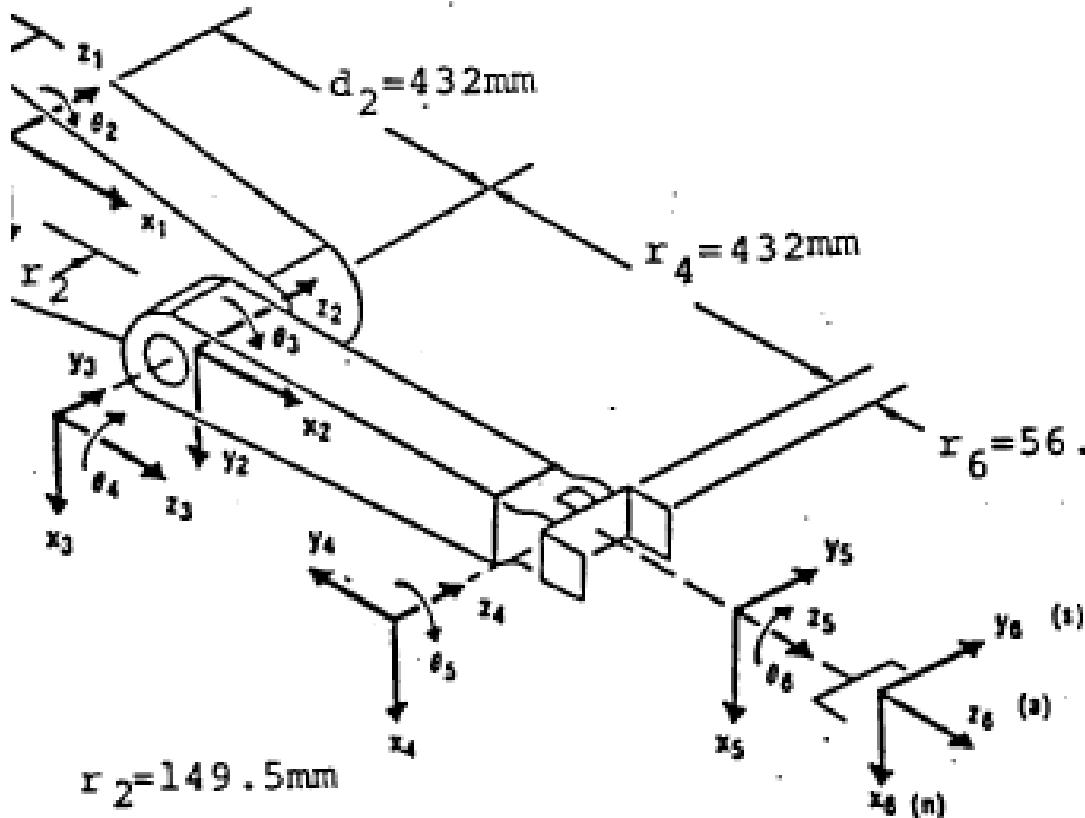


# Sistemele de coordonate 2 si 3

Lin



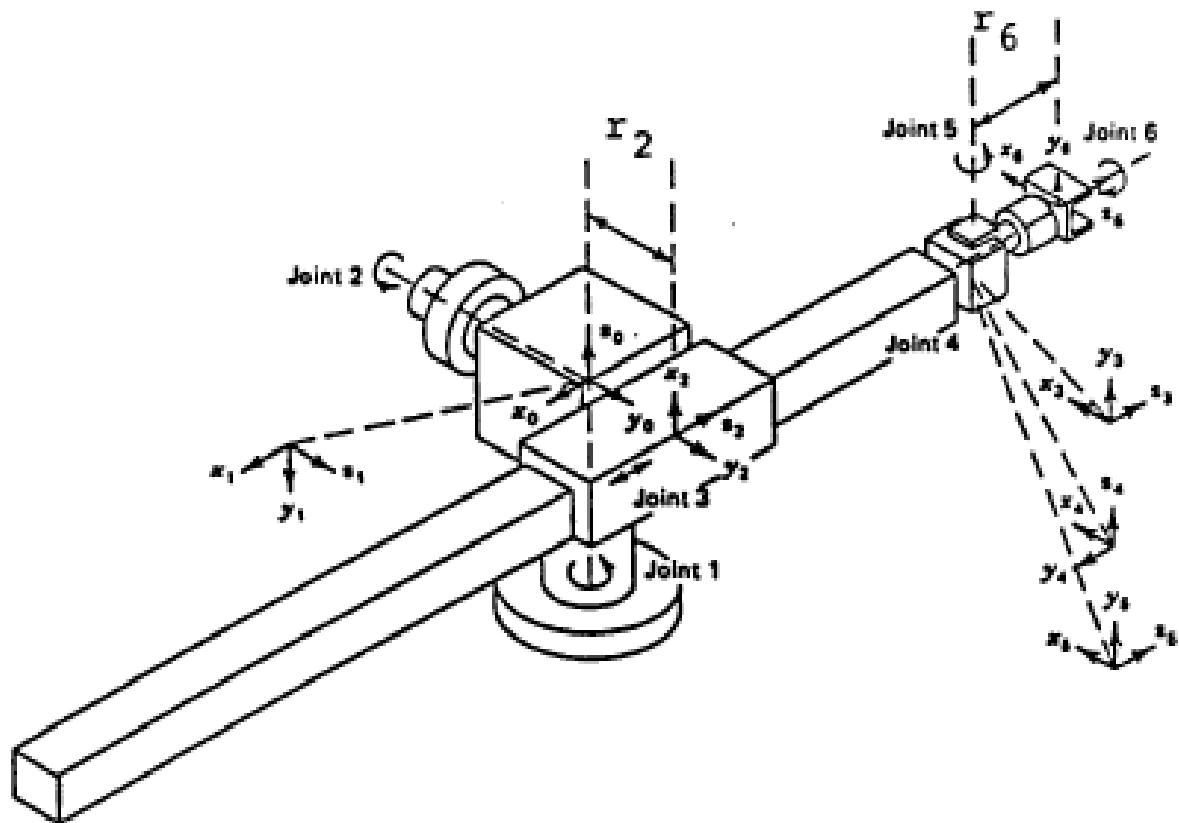
# Sistemele de coordonate 3, 4, 5, si 6

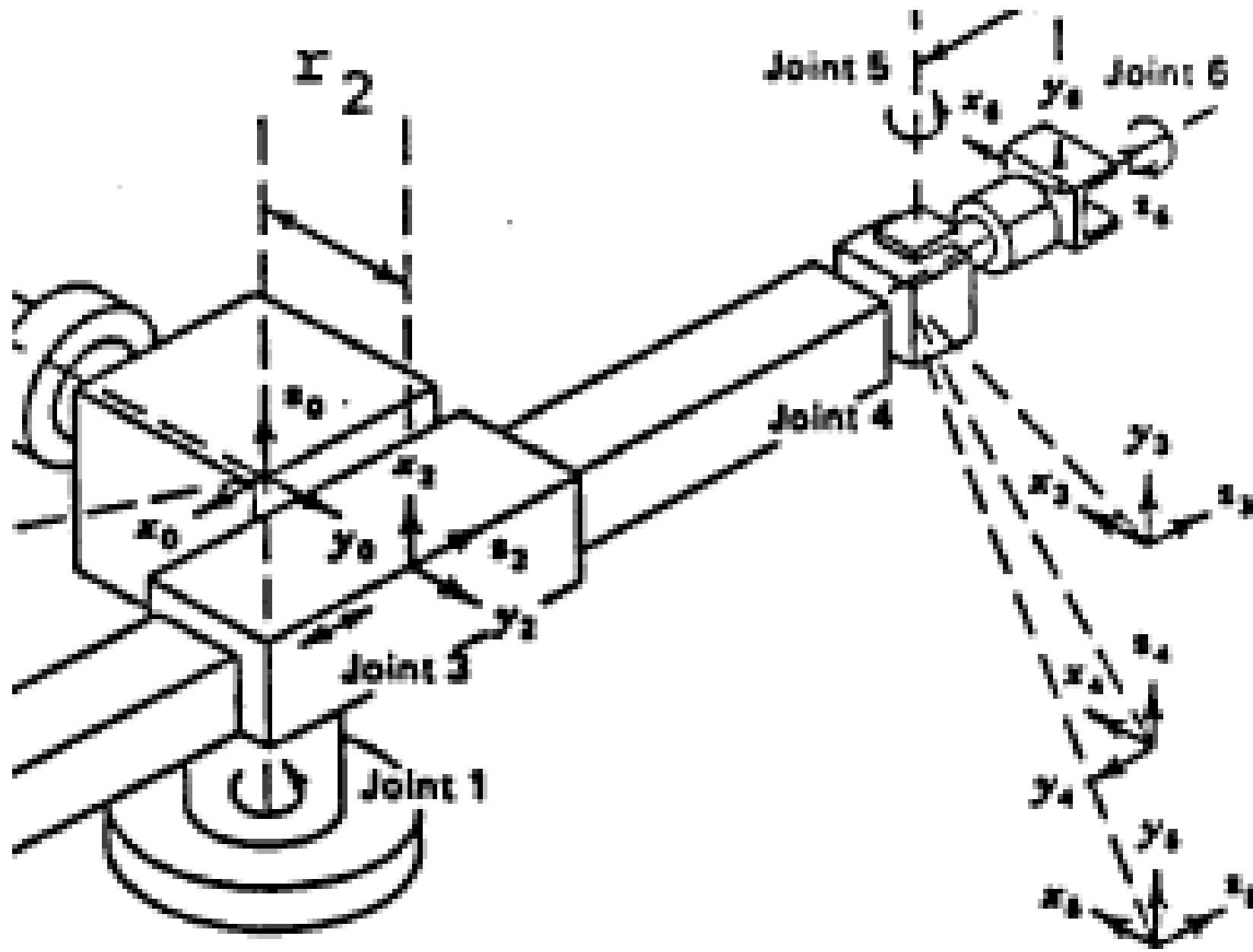


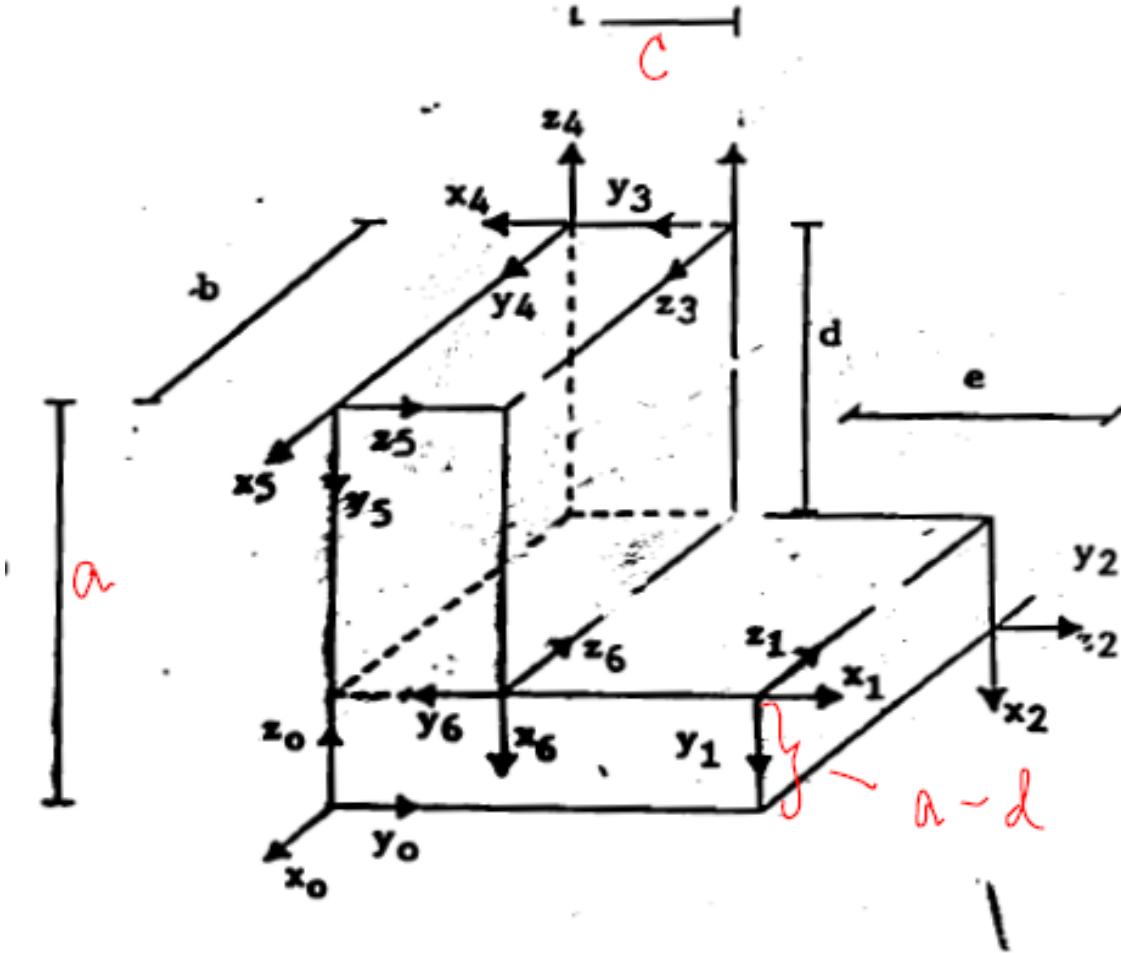
# Modelarea cinematicii robotului

## EXEMPLUL 2: Bratul robotic Stanford

$$\begin{aligned}o_1 &= o_0 \\o_3 &= o_4 = o_5 \\r_2 &= 16.2\text{cm} \\r_6 &= 24.7\text{cm}\end{aligned}$$

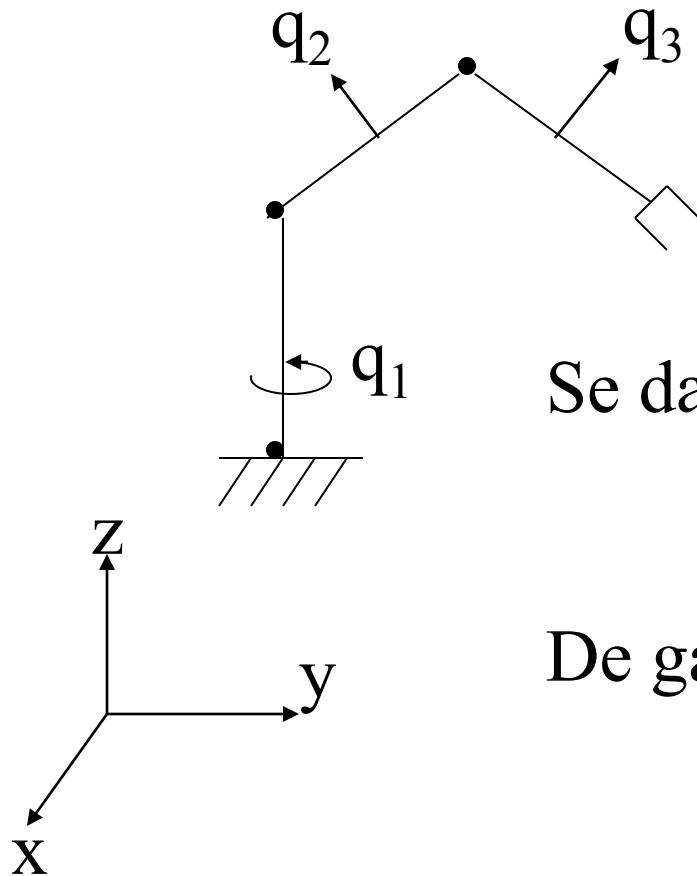






$i$	$\theta_i$	$r_i$	$d_i$	$m_i$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

# Problema cinematica directa



Se dau:  $q_1, q_2, q_3 \dots$   
(n pozitii articulatii)

De gasit: Pozitia efectorului final  $P_E$   
si orientarea  $R_E$   
(m parametrii ai efectorului final)

# Problema cinematică directă

- Se alocă sisteme de coordonate carteziene fiecărei legături (inclusiv baza  $\Phi$  și efectorul final  $N$ )
- Se identifică variabilele articulațiilor și parametrii legăturilor cinematice
- Se definesc matricele de transformare ale legăturilor.  $i^{-1}T_i = A_i$
- Se calculează transformarea directă

$${}^0T_N(q_1, q_2, \dots, q_N) = A_1 A_2 A_3 \dots A_N = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

# Problema cinematica inversa

Se cunosc date: poziție și orientare și se determină: coordonate comune ale efectuatorului final.

$$\underline{{}^0T_N} \longrightarrow q_1, q_2, q_3, \dots, q_N$$

Trebuie să fie rezolvate cel mult șase ecuații independente cu N necunoscute.

# Problema cinematică inversă

Aspecte analizate:

Existența soluțiilor:

- Spațiul de lucru
- **Spațiu de lucru dextros** (Spațiul de lucru accesibil este volumul pe care îl poate atinge manipulatorul. Spațiul de lucru dextros este un subset al celui în care manipulatorul se poate deplasa cu fiecare grad de libertate.)
- Mai puțin de 6 articulații
- Limite comune (practice)

Soluții multiple

- Criterii
- Solvabilitate sub formă închisă (algebric sau geometric) numărul de soluții =  $16^{di}$ ,  $ri \neq 0$  pentru șase puncte

# Solutia pentru transformarea inversa

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{N-1}T_N = A_1 A_2 A_3 \dots A_N$$

Given:  ${}^0T_N = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ \phi & \phi & \phi & 1 \end{bmatrix} A_i = \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix}$

Find:  $q = q_1, q_2, q_3, \dots, q_N$  (coordonatele articulatiilor)

# Solutia pentru transformarea inversa

$$\begin{bmatrix} \gamma_x & o_x & a_x & p_x \\ \gamma_y & o_y & a_y & p_y \\ \gamma_z & o_z & a_z & p_z \\ \phi & \phi & \phi & 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 A_3 \dots A_N$$

12 ecuatii

6 independente

N necunoscute

6 redundante

$$LHS(i,j) = RHS(i,j)$$

linie  
i = 1, 2, 3

coloana  
j = 1, 2, 3, 4

# Solutia pentru transformarea inversa

Abordare generală: Izolarea unei variabile pentru o articulație pe rand

$$\underbrace{A_1^{-1} {}^0T_N}_{\text{functie de } q_1} = \underbrace{A_2 A_3 \dots A_N}_{\text{functie de } q_2, \dots, q_N} = {}^1T_N$$

- se urmăresc constantele din  ${}^1T_N$
- echivalare  $LHS(i,j) = RHS(i,j)$
- rezolvare pentru  $q_1$

# Solutia pentru

## transformarea inversa

$$A_2^{-1} A_1^{-1} \dots T_N = A_3 \dots A_N = \underbrace{^2 T_N}_{\text{Functie de } q_3, \dots, q_N}$$

Functie de  $q_1, q_2$

↪ O necunoscuta  $q_2$  intrucat  $q_1$  a fost rezolvata

- urmarirea elementelor constante  $^2 T_N$
- echivalare  $LHS(i,j) = RHS(i,j)$
- rezolvare pentru  $q_2$
- este posibil sa fie o ecuatie care implica doar  $q_1$

Observatii:

- Nu exista un algoritm eficient 100%
- o abordare geometrica intuitiva este de dorit

# Solutia pentru transformarea inversa

Există două clase de geometrii robotice pentru care soluțiile cinematice inverse cu formă închisă sunt garantate

- Roboți cu orice 3 articulații translationale
- Roboți cu orice 3 axe de rotație intersectându-se într-un punct comun

Există roboti cu geometrie decuplata. Acești roboți servesc în principal pentru a efectua sarcini de manipulare

- pot reduce sistemul la un subsistem de ordine inferioară (adică ordinul 3) pentru care sunt soluții de formă închise garantat

# Formula analitica generala pentru rezolvarea problemei inverse

Cazul 1:  $\begin{cases} \sin\theta = a \\ \cos\theta = b \end{cases} \quad \begin{cases} a \in [-1,1] \\ b \in [-1,1] \end{cases} \quad \left. \begin{array}{l} \theta = \text{ATANZ}(a, b) \\ \text{unica} \end{array} \right\}$

Cazul 2:  $\begin{cases} \sin\theta = a \\ \cos\theta = \pm\sqrt{1 - a^2} \end{cases} \quad a \in [-1,1] \quad \left. \begin{array}{l} \theta = \text{ATANZ}(a, \pm\sqrt{1 - a^2}) \\ 2 \text{ solutii} \\ \theta, 180^\circ - \theta \end{array} \right\}$

$\begin{cases} \cos\theta = b \\ \sin\theta = \pm\sqrt{1 - b^2} \end{cases} \quad b \in [-1,1] \quad \left. \begin{array}{l} \theta = \text{ATANZ}(\pm\sqrt{1 - b^2}, b) \\ 2 \text{ solutii} \\ \theta, -\theta \end{array} \right\}$

→ degenerare de ordinul 2

$\begin{array}{l} \theta = 0^\circ, 180^\circ, |b| = 1, \\ \text{“limite”} \quad \rightarrow \text{singularitate} \end{array}$

# Formula analitica generala pentru rezolvarea problemei inverse

Cazul 3:  $a\cos\theta + b\sin\theta = 0 \rightarrow \theta = \text{ATANZ}(a, -b)$  or  $\text{ATANZ}(-a, b)$   
2 solutii,  $180^\circ$  separate

Singularitate cand  $a = b = 0$

→ degenerare de ordin infinit

Cazul 4:  $a\cos\theta + b\sin\theta = c$        $a, b, c \neq 0$       2 solutii  
 $\theta = \text{ATANZ}(b, a) + \text{ATANZ}(\pm \underbrace{\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}}_{\geq 0 \text{ ca solutia sa existe}}, c)$

$a^2 + b^2 + c^2 < 0 \rightarrow$  spatiu de lucru exterior

$a^2 + b^2 + c^2 = 0 \rightarrow$  1 solutie (singularitate)

degenerare de ordinul 2

# Formula analitica generala pentru rezolvarea problemei inverse

Cazul 5:  $\sin\theta\sin\phi = a$   
 $\cos\theta\sin\phi = b$

$$\begin{array}{ll} \theta = \text{ATANZ}(a, b) & \text{daca } \sin\phi \text{ este } \oplus \text{ pozitiv} \\ \theta = \text{ATANZ}(-a, -b) & \text{daca } \sin\phi \text{ este } \ominus \text{ negativ} \end{array}$$

Dc  $\cos\phi = c \rightarrow \phi = \text{ATANZ}(\pm\sqrt{a^2 + ,^2}, c)$  (2 solutii pentru  $\phi$ )

Atunci 2 solutii:

$$\left| \begin{array}{l} \theta = \text{ATANZ}(a, b) \\ \phi = \text{ATANZ}(\sqrt{a^2 + ,^2}, c) \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} \theta = \text{ATANZ}(-a, -b) \\ \phi = \text{ATANZ}(-\sqrt{a^2 + ,^2}, c) \end{array} \right.$$

Singularitate:  $a = b = 0 \quad |c| = 1$

$\theta = \text{nedefinit}$      $\phi = 1$  solutie

# Formula analitica generala pentru rezolvarea problemei inverse

Cazul 6:  $a\cos\theta - b\sin\theta = c \quad (1)$   
 $a\sin\theta + b\cos\theta = d \quad (2)$

Atunci  $\theta = \text{ATANZ}(ad - bc, ac + bd)$   
1 solutie

Pentru ca (1) & (2) sa fie satisfacute,  
atunci

$$a^2 + b^2 = c^2 + d^2$$

# Decuplare (cinematică)

Găsirea unui subset de articulații responsabil în principal de finalizarea unui subset al sarcinii de manipulator ”

Implică identificarea:

sarcină decuplată    ← Task Total  
subsistem robot decuplat responsabil pentru sarcină  
decuplată

Geometria robotului decuplat - se referă la un manipulator  
Geometria pentru care este garantată decuplarea

# Decuplare (cinematică)

Geometriile robotului decuplate: (6 axe)

Orice trei (3) conexiuni translaționale

Orice trei co-intersectarea axelor de rotație

Orice 2 Articulații translationale normale.

Îmbinarea normală la 2 îmbinări paralele

Orice 3 rotiri, îmbinări paralele

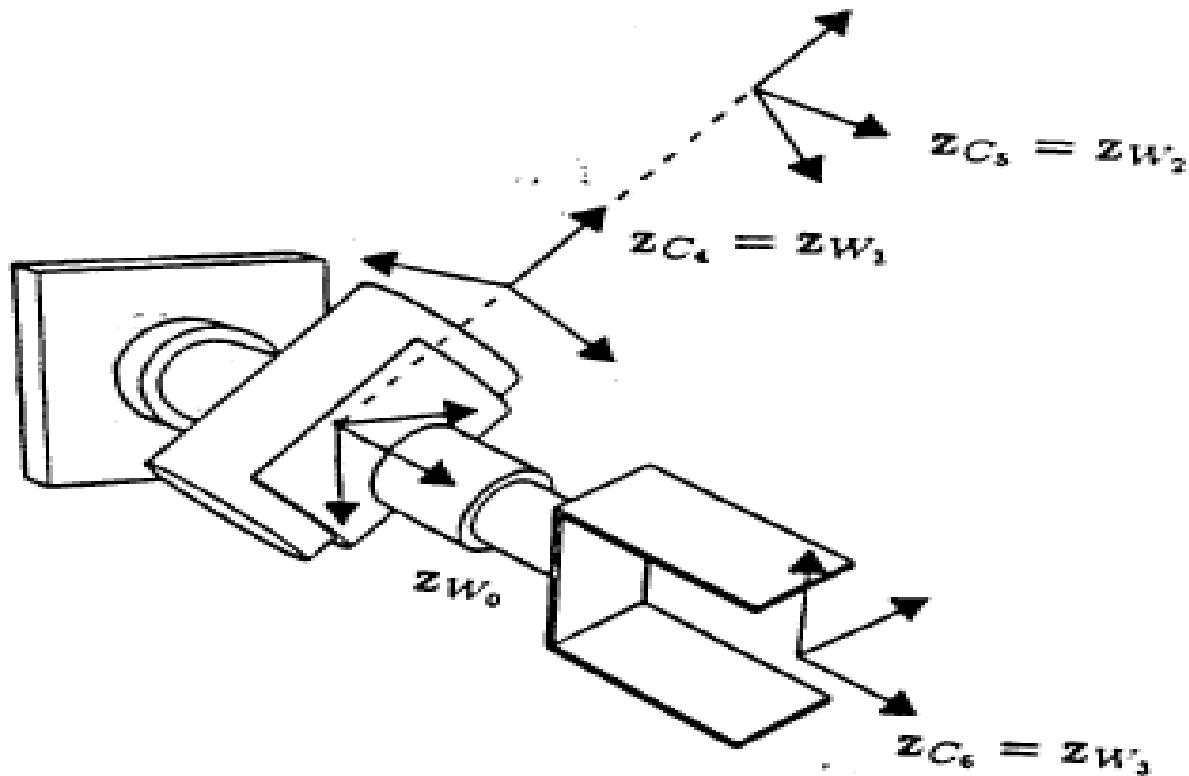
Pieper, 1968

Ang, 1992

# Decuplare (cinematică)

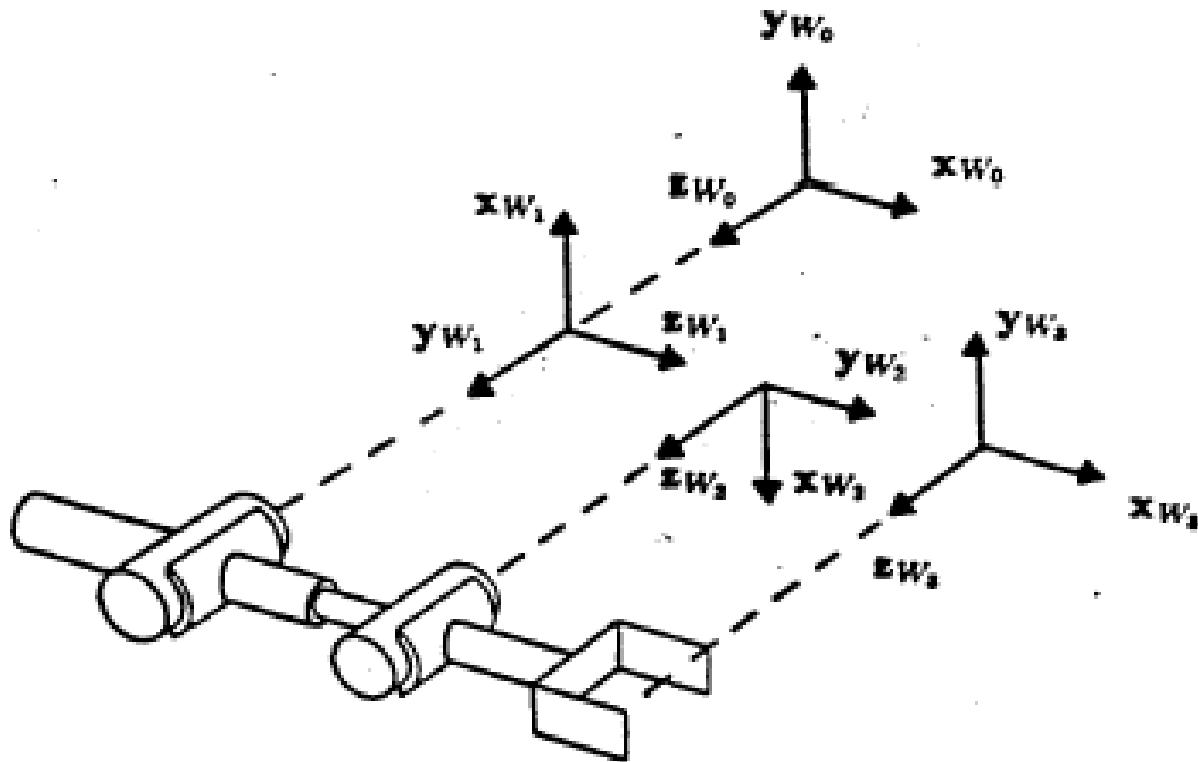
Roboti cu incheieturi sferice este un robot clasic cu geometrie decuplata

↳ 3 axe ale încheieturii care se intersectează la un punct comun



# Decuplare (cinematică)

Pentru robotii care nu au o geometrie decuplata, este posibil sa nu existe o solutie de forma inchisa; trebuie sa se apeleze la procedee numerice iterative.



# Solutii numerice

Trei cerințe importante pentru algoritmul numeric sunt:

- I. condiții a priori pentru convergență
- II. insensibilitate la estimările inițiale
- III. prevederi pentru soluții multiple

- Cele mai frecvente metode se bazează pe abordarea Newton-Raphson.

Bibliografie: A.A.Goldenberg, B. Benhabib, & R.G.Fenton,  
“A Complete Generalized Solution to the Inverse Kinematics of Robots”  
IEEE Journal of Rob. & Auto. 1(1): March 1985, pp. 14-20.

# Curs 4a Robotica

Forță, Moment, Cuplu

# Forța

- “efort” care apare atunci când ridicam sau tinem o greutate, când tragem sau împingem un corp pe o suprafață
- precizăm directia și sensul în care realizăm acest efort, ca și locul (punctul) în care “apasam” ori de care “tragem”, este normal ca forța să fie abstractizată sub forma unui vector

# Forța

- Statica studiază transformarea sistemelor de forțe aplicate corpurilor materiale în sisteme echivalente și condițiile de echilibru ale acestor cor puri sub acțiunea sistemelor de forțe date
- Dinamica studiază miscarea corpurilor materiale bazându-se pe rezultatele cinematicii și tinând seama de forțele care acionează asupra lor, precum și de masa lor

# Forța

Principiul fundamental al dinamicii (lex secunda). Acceleratia unui punct material este proportionala cu forța motoare aplicata si este îndreptata în directia dupa care actioneaza forta

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

- masa, masura a cantitatii de materie continuta în corpul material si element characteristic al existentei acestuia
- masa  $m$  a punctului material  $M$  reprezinta o masura a inertiei lui  $M$  (gradul de opunere a punctului material la actiunile exterioare menite sa-i schimbe starea de repaus sau de miscare rectilinie uniforma)

# Impulsul punctului material

$$\overline{F} = m \cdot \overline{a} = m \cdot \frac{d\overline{v}}{dt} = \frac{d(m \cdot \overline{v})}{dt}.$$

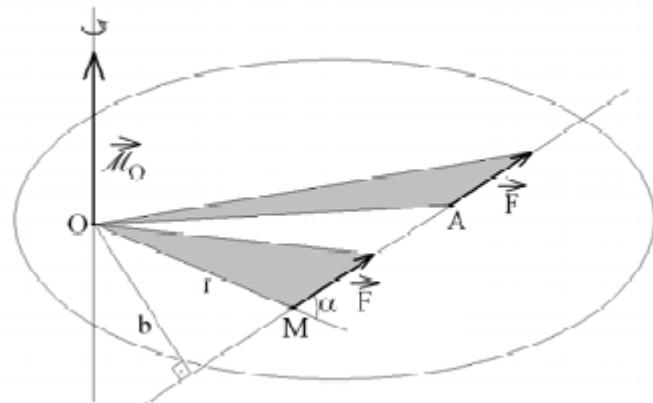
$$\overrightarrow{F} = \frac{d\overrightarrow{p'}}{dt}.$$

# Momentul forței

$$\overline{M}_O = \overline{OM} \times \overline{F}$$

$$\overline{M}_O = (\overline{OA} + \overline{AM}) \times \overline{F} = \overline{OA} \times \overline{F}$$

Cu alte cuvinte, aplicând forța  $F$  în punctul A se obține același efect de rotație ca și în cazul aplicării forței în punctul M, fenomen verificabil în mod direct.



# Lucrul mecanic. Puterea

$$\overline{F} \cdot d\overline{r}$$

lucru mecanic elementar al forței  $F$  relativ la deplasarea elementara  $d\overline{r}$

$$W = \int_{M(t_0)}^{M(t_1)} \overline{F} \cdot d\overline{r} = \int_{M(t_0)}^{M(t_1)} F_x dx + F_y dy + F_z dz$$

În cazul când punctul material  $M$  se deplacează pe curba simplă  $\Gamma$  între pozițiile  $M(t_0)$  și  $M(t_1)$  sub acțiunea forței  $F$ .

Lucru mecanic total:

$$W = \int_{t_0}^{t_1} \overline{F} \cdot \overline{v} dt$$

# Lucrul mecanic. Puterea

Marimea  $P(t)$ , se numeste puterea dezvoltata de forta  $F$  la momentul  $t$

$$P(t) = \frac{d}{dt} \left( \int_{t_0}^t \overline{F} \cdot \overline{v} \, dq \right) = \overline{F} \cdot \overline{v}$$

$$P = F_\tau v$$

# Energia cinetica a punctului material

$$\begin{aligned}\overline{F} \cdot d\overline{r} &= \frac{d}{dt}(m\overline{v}) \cdot d\overline{r} \\ &= \frac{d}{dt}(m\overline{v}) \cdot \overline{v} dt \\ &= \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2}mv^2 \right) dt \\ &= d\left(\frac{1}{2}mv^2\right).\end{aligned}$$

$$W = \int_{M(t_0)}^{M(t_1)} \overline{F} \cdot d\overline{r} = \Delta \left( \frac{1}{2}mv^2 \right)$$

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

lucrul mecanic efectuat de forta rezultanta aplicata punctului material intre momentele  $t = t_0$  si  $t = t_1$  este egal cu variatia energiei cinetice a punctului material intre aceste momente

# Energia cinetica a punctului material

$$E_c(t_0) + W = E_c(t_1)$$

Energia cinetica a corpului punctiform este egala cu lucrul mecanic "cheltuit" pentru a aduce particula din repaus pâna la viteza v sau cu lucrul mecanic necesar pentru a opri particula.

Lucrul mecanic W poate fi pozitiv (lucru mecanic motor), negativ (lucru mecanic rezistent) sau nul.

# Curs 4b Robotica

Sisteme de actionare

# Actuator

Modul de definire a actuatorului, ca o componentă indispensabilă sistemului mecatronic, este extrem de variată cu unele aspecte commune la diversi autori.

- Actuatorul , un sistem care transformă energia electrică / termică într-o miscare controlabilă.
- Mecanisme pentru activarea procesului de control din echipamente prin utilizarea semnalelor pneumatice, hidraulice sau electronice;
- Mecanisme alimentate energetic pentru acționarea dispozitivelor mecanice.

# Actuator

Actuator - un subansamblu care produce un lucru mecanic ca răspuns la un semnal exterior iar structura sa nu mai poate fi descompusa în sub-structuri decât cu riscul de a pierde capacitatea de generare a miscării.

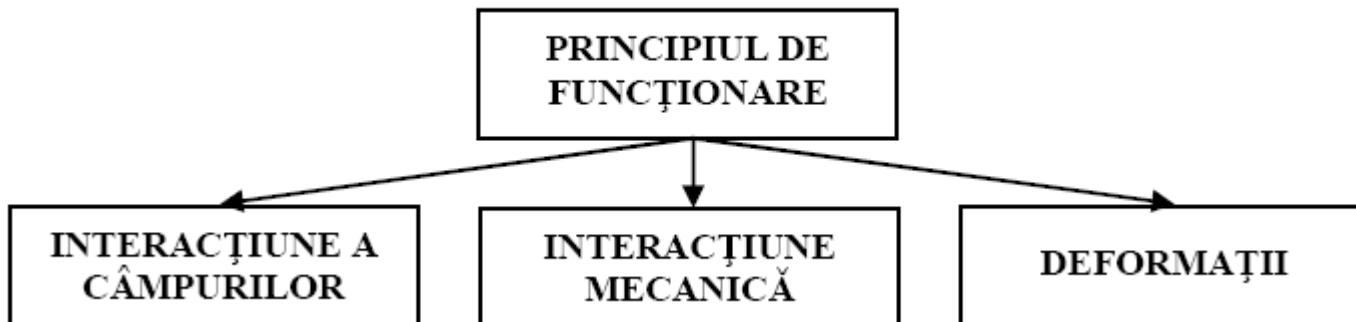


# Actuator

O primă clasificare a actuatoarelor poate lua în considerare două clase, pornind de la principiul de funcționare :

- Actuatorare clasice / convenționale;
- Actuatorare speciale.

Într-o sistematizare a actuatoarelor se consideră ca un prim criteriu cel referitor la principiul de interacțiune și creare a miscării



# Actuator

Interacțiunea campurilor electromagnetice stă la baza materializării unor actuatoare care au cursă teoretic nelimitată. Se includ în această categorie micromotoarele de c.c., micromotoare de curent alternativ asincrone și sincrone (cu rotor pe bază de magneti permanenti) sau limitată (micromotoare liniare, electromagneți).

Actuatoarele, a căror principiu de funcționare este o interacțiune mecanică, presupun existența unui flux energetic prin intermediul agentului fizic (lichid sau gazos) care impune deplasarea unui element mobil.

Actuatoarele a căror funcționare se bazează pe deformații liniare sau unghiulare au în componența structurală materiale inteligente (*smart materials*): materiale piezoelectrice, materiale electrostrictive și magnetostrictive, materiale reologice, materiale cu memoria formei (sensibile termic), materiale sensibile pH, materiale electrocromice (își modifică proprietățile optice funcție de tensiunea aplicată pe materialul electrod) etc..

# Actuator

Semnalul de intrare care determină principiul de conducere a actuatorului este un alt criteriu de clasificare.

Interacțiunea dinamică dintre actuator și sistemul controlat poate fi definită în acord cu valoarea energiei schimbate:

$$dW = F \cdot dx$$

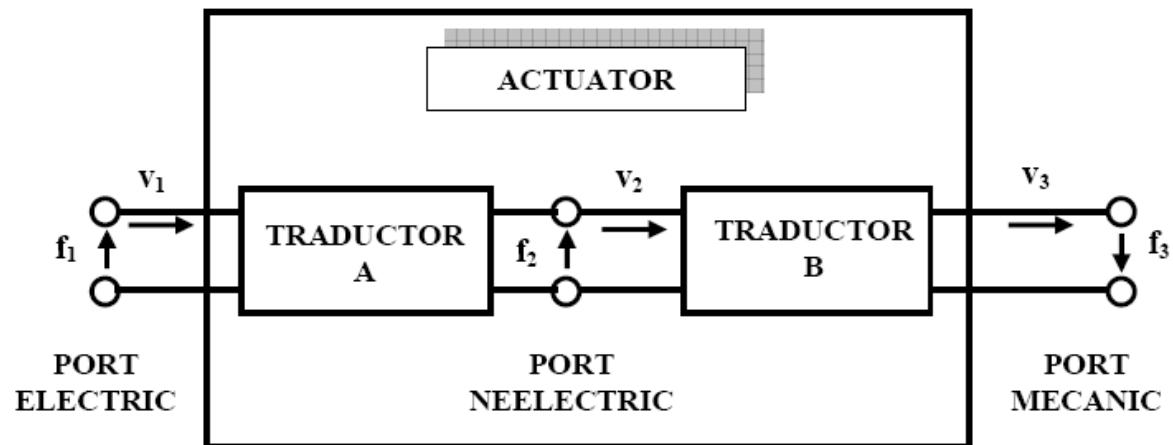
Funcție de valoarea admisibilă instantanee, actuatoarele se pot clasifica în

- Actuatoare semiactive unde lucrul mecanic poate fi  $dW \leq 0$  și care în practică înseamnă o disipare de energie ca urmare a unei interacțiuni cu sistemul controlat;
- Actuatoare active unde  $dW \neq 0$  și în practică înseamnă o creștere sau descreștere a nivelului energetic din sistemul controlat.

# Actuator

Componenta fundamentală a actuatorului este traductorul. Traductorul a fost definit ca un dispozitiv care transformă energie neelectrică în energie electrică sau invers. Traductorul a fost definit și ca un dispozitiv care transformă o formă de energie în alta: energie cinetică de translație în energie cinetică de rotație sau invers.

În baza celor prezentate anterior și utilizând *noțiunea de port  $\equiv$  bornă de intrare* și respectiv de ieșire, un actuator poate fi asimilat cu o inseriere de două tructoare cu două porturi: portul de intrare electric și portul de ieșire mecanic.



# Actuator

Actuatorul poate fi analizat pe baza a două tipuri de traductoare care pot fi luate în considerare:

- *Traductoare pe bază de caracteristici geometrice în care efectul de cuplaj între cele două forme de energie – intrare și de ieșire – se bazează pe formele geometrice ale elementelor componente. Actuatorale rezultate din această categorie de traductoare sunt denumite actuatorare geometrice. Este cazul tuturor actuatorarelor rotative.*
- *Traductoare pe bază de caracteristici de material în care fenomenul de conversie între formele de energie este direct utilizat pentru dezvoltarea actuatorarelor. Exemple caracteristice: actuatorale piezoelectrice, actuatorare cu memoria formei etc.*

# Actuator

In funcție de forma energiei de intrare folosite pentru concretizarea funcției actuatoare si implicit pe baza principiului de conversie energetică, se pot distinge categoriile:

- **Conversia termomecanică.** In acest caz energia de intrare este din domeniul termic iar cea de ieșire este energie mecanică.

*Actuatoarele pe bază de materiale cu memoria formei (AMMS) (pe bază de transformare de fază) asigură controlul forței într-o plajă largă, comparabilă cu alte variante de actuatoare.*

*Actuatoare termice pe bază de structură compozită bimetalică;*

*Actuatoare termice pe bază de geluri polimerice;*

*Actuatoare termice pe baza efectului de dilatare / comprimare.*

- **Conversia magnetomecanică.** In acest caz actuatoarele stabilesc o conversie energetică din domeniul magnetic în domeniul mecanic și invers.

*Actuatoare magnetostrictive care au la bază efectul magnetostrictiv prin care un material feromagnetic își modifică dimensiunile sub acțiunea unui camp magnetic exterior.*

*Actuatoare meagnetoreologice. Actuatoarele magnetoreologice au ca element de bază în structură fluidul magnetoreologic sau ferofluidul (lichid magnetic).*

*Actuatoare pe bază de memoria magnetică a formei*

*Actuatoare piezoelectrice*

# Actuator

Pe lângă noțiunea de actuator, se impune definirea în continuare a altor două definiții:

- servomechanism (în engleză), system asservi (în franceză) sau servomecanism (în română) se definește ca un sistem de reglare automată;
- servomotor – este un motor pentru care poziția rotorului este controlată și corectată în mod continuu.

# Mecanismul de actionare

Roboții industriali constituie componente de bază ale sistemelor de fabricație flexibilă.

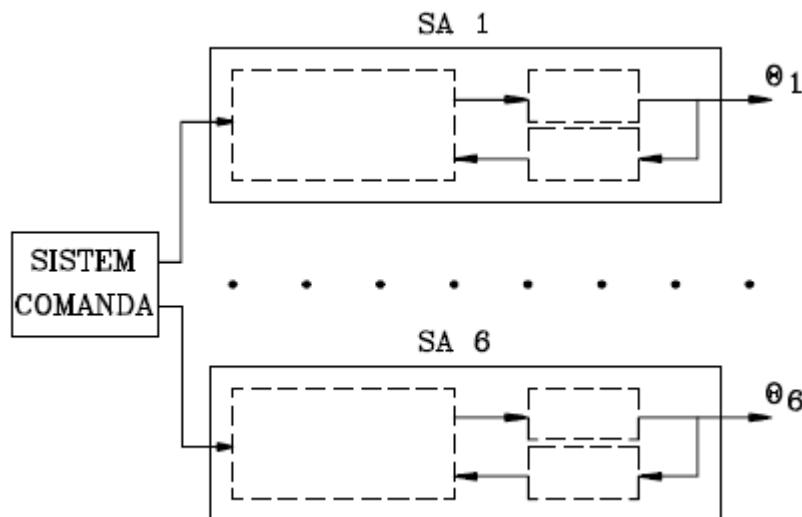
Sistemul mecanic al robotului industrial (RI) are sarcina de a deplasa un punct caracteristic "P" aparținând efectuatorului final (EF) conform unui program stabilit pentru o operație humanoidă. În acest scop, dispozitivul de ghidare (DG) al RI trebuie să posede un număr de grade de mobilitate  $M \in [3 - 6]$  distribuite între mecanismul generator de traекторie (MGT) și mecanismul de orientare (MO).

Deplasarea punctului caracteristic este asigurată prin aportul sistemului de acționare (SA) al RI. Acesta transformă o categorie de energie - energia electrică, energia hidraulică, pneumatică, chimică, etc. - în energie mecanică și transmite miscarea rezultată la cuplile cinematice conduceătoare ale RI.

SA îndeplinește astfel funcția de acționare: poziționarea relativă a elementelor care compun cupla cinematică conduceătoare.

# Mecanismul de actionare

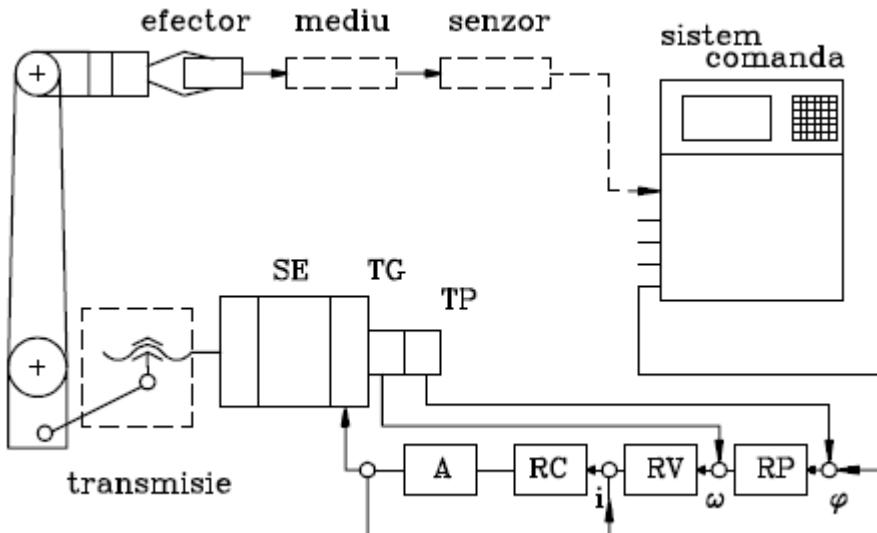
Succesiunea parametrilor cinematici ai cuplelor cinematice conduceătoare este asigurată de sistemul de comanda (SC) al RI în baza funcției de comandă ( $M = 6$ ;  $\Theta_1, \dots, \Theta_6$  sunt coordonatele generalizate din cuplurile cinematice).



# Mecanismul de actionare

Schela principală pentru acționarea unui grad de mobilitate și elementele componente ale sistemului de acționare electrică.

Semnificația notatiilor este următoarea: SE - servomotor electric; TG – tahogenerator; TP - traductor de poziție; A - amplificator de putere; RC, RV, RP - regulator de curent, viteză, poziție).



La ora actuală se face remarcată și tendința spre acționare directă cand rotorul servomotorului este cuplat fie direct la elementul mobil, fie prin intermediul unui mecanism paralelogram cu bare sau transmisii cu raport de transmitere unitar.

Funcție de destinație SA (pentru dispozitivul de ghidare sau efectoare final) acesta primește moduri diferite de realizare.

# Actuator

Componenta principală a servosistemului este servomotorul de acționare. Se utilizează la ora actuală cu preponderență servomotoare de c.c. în una din formele: servomotor cu intrefier axial, servomotor cu rotorul în pahar, servomotor cu rotor cilindric.

Complexitatea funcțiilor care trebuie realizate în cadrul aplicațiilor robotizate și necesitatea unui concept comun referitor la realizarea conversiei energie – lucru mecanic au condus la introducerea noțiunii de **actuator**.

# Actuator

## Criterii de comparatie actuatori

Criteriul	Descriere
Domeniul operațional	Indică viteza maximă și cuplul dependent de sarcina dinamică
Temperatura	Temperatura mediului ambiant este cauza unor multiple efecte negative în funcționare.
Randamentul motorului	Raportul dintre puterea de la arbore și puterea absorbită de la sursa de energie
Pierderile în motor	Pierderile în cupru, pierderile în miezul feromagnetic, pierderile prin frecare, etc. sunt concluziile pentru un actuator performant
Timpul de răspuns	Caracterizează dinamica motorului ca un răspuns la diverse semnale de intrare
Acceleratia	Sunt importante eventualele limitări a accelerării la nivele ale cuplului motor
Cuplul impulsional	Sugerează capacitatea actuatorului de a crea un cuplu motor de valori ridicate pentru un scurt timp
Cuplul de frecare	Frecare este unul dintre factorii neliniari ai sistemului

# Actuator

Criterii de comparatie tehnologii

Categoria tehnologiei utilizate	Efort maxim	Tensiune maximă	Eficiență	Viteză relativă (ciclul)	Putere specifică
Aliaje cu memoria formei (TiNi)	> 5	> 200	< 10	Scăzută	Foarte mare
Electromagnetic	50	0.1	> 90	Ridicată	Mare
Piezoelectric / ceramic (PZT)	0.2	110	>90	Ridicată	Mare
Piezoelectric / polimer (PVDF)	0.1	4.8	-	Ridicată	Mare
Electrostatic	50	0.03	>90	Scăzută	Scăzută
Polimer cu memoria formei	100	4	<10	Ridicată	Medie
Magnetostrictiv (terfenol)	0.2	70	60	Ridicată	Foarte mare

# Actuator

Criterii de comparatie motoare electrice

Cuplul impulsional Cmax – este impus prin valoarea maximă a curentului;

- Puterea tranzitorie PS , pentru un moment de inerție la arborele motorului – este definită prin relația:

$$P_s = \frac{C_{\max}^2}{J}$$

- Accelerația maximă max  $\varepsilon$  - caracterizează proprietățile de demaraj ale servomotorului și este definită prin relația:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{C_{\max}}{J}$$

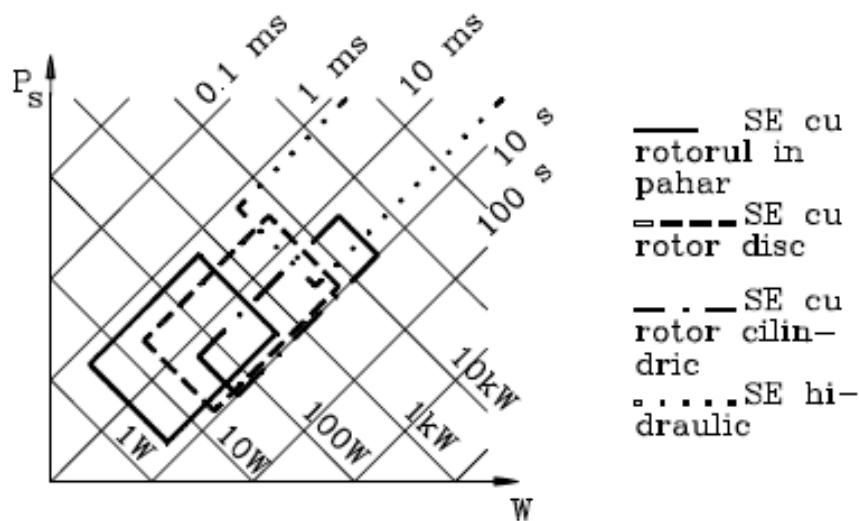
- Timpul de lansare T0 – este definit ca timpul necesar atingerii vitezei nominale la cuplu nominal:

$$T_0 = \frac{J\Omega_n}{C_n}$$

# Actuator

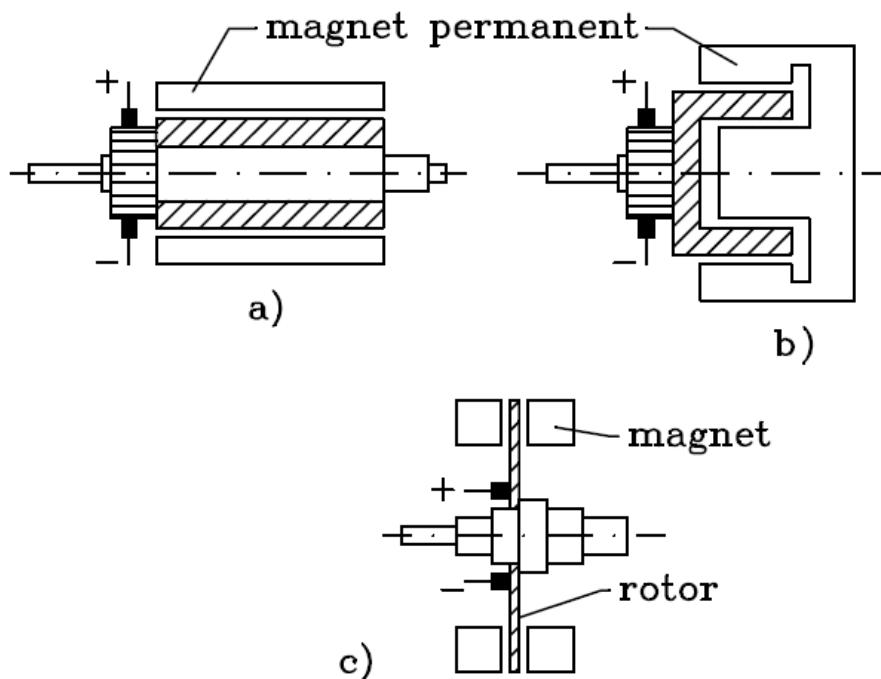
Comparatie a servomotoarelor de c.c. cu motoarele hidraulice (in planul PsW - "putere tranzitorie - energie cinetica dubla")

Dreptele de panta -1 reprezinta servomotoarele de aceeasi putere ([W]). Dreptele de pantă 1 se referă la servomotoare ce au acelasi timp de lansare ([s]). Se remarcă că acționările electrice sunt performante la puteri reduse. In această comparație nu se ține cont de puterea specifică sau cuplul specific.



# *Servomotorul electric*

Servomotoarele de c.c. ocupă primul loc în cadrul sistemelor de acționare electrică. Se pot menționa în acest sens servomotoarele cu întrefier axial, cu rotor cilindric sau cu rotor în pahar



# **Servomotorul electric**

Excitația servomotoarelor utilizate în robotică este realizată în general prin magneti permanenti. Sunt utilizați trei tipuri de magneti permanenti: ALNICO, pe bază de ferite și pe bază de pământuri rare.

**Magneții Alnico** se realizează, prin turnare, pe bază de aliaj în proporții variabile de fier, cobalt, nichel, aluminiu și cupru (Ex: Alnico 5: 13.5 % Ni, 24 % Co, 8 % Al, 3 % Cu, 51.5 % Fe). Stabilitatea termică a caracteristicilor magnetice la variații de temperatură, tehnologia de fabricație relativ simplă sunt cîteva avantaje ale acestor magneti.

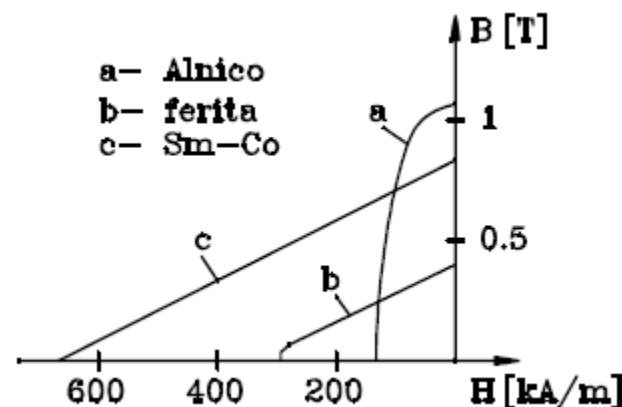
**Magneții din ferite** sunt realizati pe bază de oxid de fier și de bariu (sau de strontiu) în anumite proporții, amestecul fiind sinterizat (~ 13000 C) prin presare (sub acțiunea unui camp magnetic H puternic). Acești magneti prezintă o sensibilitate ridicată a caracteristicilor magnetice la variația temperaturii.

**Magneții pe bază de pământuri rare** se obțin prin sinterizare în atmosferă inertă. Cei mai utilizați sunt magnetii pe bază de samarium - cobalt Sm-Co5 (65 % Co). Variația magnetizării cu temperatura este neglijabilă.

# **Servomotorul electric**

Având în vedere acțiunea de demagnetizare a curentului prin inducție asupra magnetilor, firmele constructoare limitează curenții de pornire la aprox.  $10I_n$  ( $I_n$  reprezintă curentul nominal al servomotorului). Unele servomotoare dispun de bobine de magnetizare (dispuse pe magneti) pentru remagnetizarea magnetilor în cazul unor demagnetizări accidentale.

Material	$(BH)_{max}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$B_r$ [T]	$H_c$ [kA/m]	Variația magnetizării cu temperatura [%/ <sup>0</sup> C]
Alnico 1500	82	1.08	125	- 0.02
Spinalor 6H – (ferita)	29.5	0.4	285	- 0.18
SmCo <sub>5</sub>	145	0.85	650	- 0.04



# **Servomotorul electric**

Indusul – rotorul - servomotoarelor utilizate în robotică este "fără fier" înfăsurările (din cupru) fiind dispuse pe suport izolator.

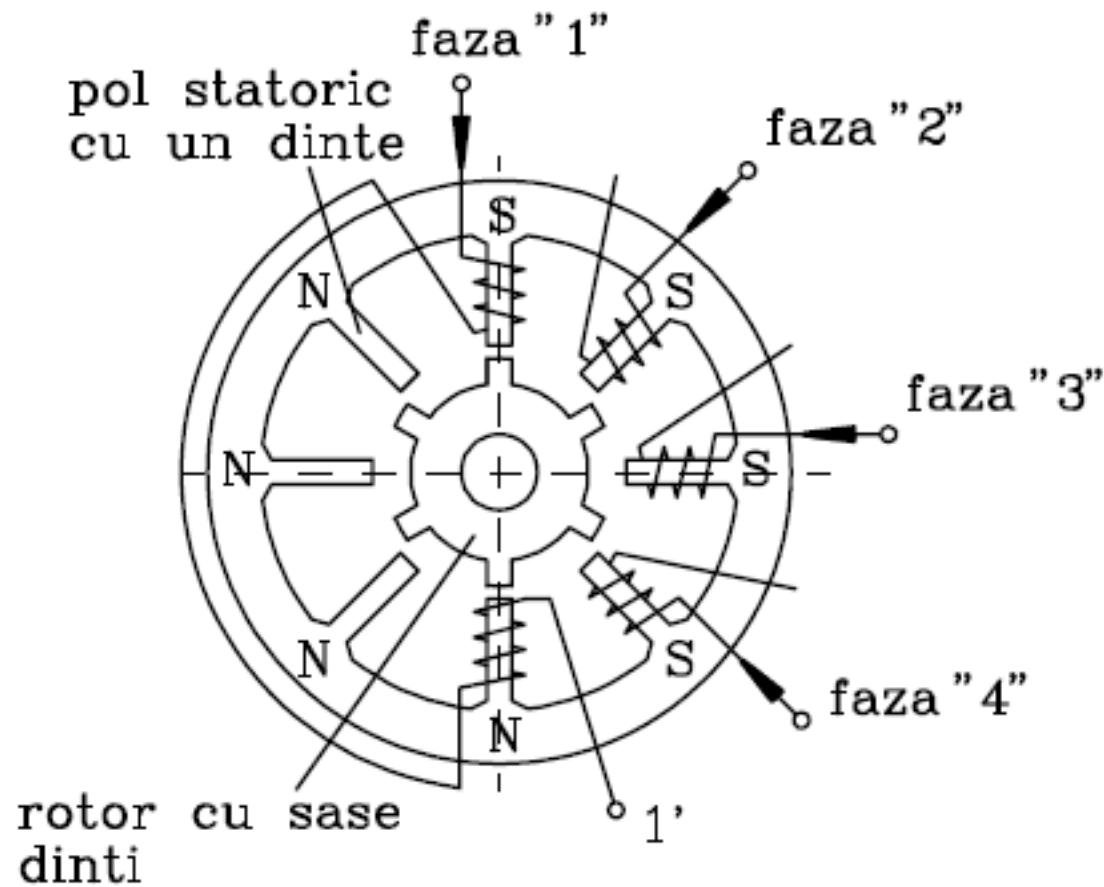
Se remarcă câteva avantaje remarcabile ale acestor servomotoare: caracteristici mecanice riguros liniare din cauza inexistenței saturației magnetice, a efectelor curenților turbionari sau a histerezei; constanta de timp electrică neglijabilă din cauza inductivității reduse; constanta de timp mecanică redusă (de ordinul ms). Caracterizarea unui servomotor de c.c. presupune luarea în considerare a valorilor nominale (tensiune, viteză, cuplu, curent) și a valorilor maxime a acestor parametri în regimuri tranzitorii.

**Motoarele pas cu pas (m.p.p.)** sunt de asemenea incluse în sistemele de acționare ale robotilor industriali. Motorul pas cu pas este un convertor electromecanic care realizează conversia impulsurilor de comandă aplicate fazelor motorului într-o miscare discretă - pasii motorului.

Constructiv m.p.p. se clasifică în:

- m.p.p. cu reluctanță magnetică variabilă
- m.p.p. cu magnet permanent
- m.p.p. hibride

# M.P.P



# M.P.P

Acstea motoare sunt cu rotor pasiv, putand avea pe suprafața rotorului dinți și crestături . Partea statorică (un stator sau mai multe) cuprinde infăsurări distribuite sau concentrate (de ex. opt infăsurări concentrate). Bobinele polilor diametral opusi se conectează în serie și se alimentează de la o sursă de curent continuu prin intermediul unui comutator electronic.

Prin alimentarea unei faze statorice (de ex. 1-1'), rotorul se va rota astfel încât circuitul magnetic să prezinte reluctanță magnetică minimă (axa infăsurării alimentate să coincidă cu axa unor dinți rotorici). Întrerupând alimentarea fazei 1-1' și alimentând fază 2-2', rotorul va ocupa o nouă poziție de reluctanță minimă rotindu-se cu un unghi "Θ" - pasul unghiular. O micsorare a pasului unghiular se poate obține prin mărirea numărului de poli statorici și rotorici sau prin reunirea în aceeași masina a mai multor seturi independente (electric și magnetic) de stator și rotoare decalate spațial între ele.

# M.P.P

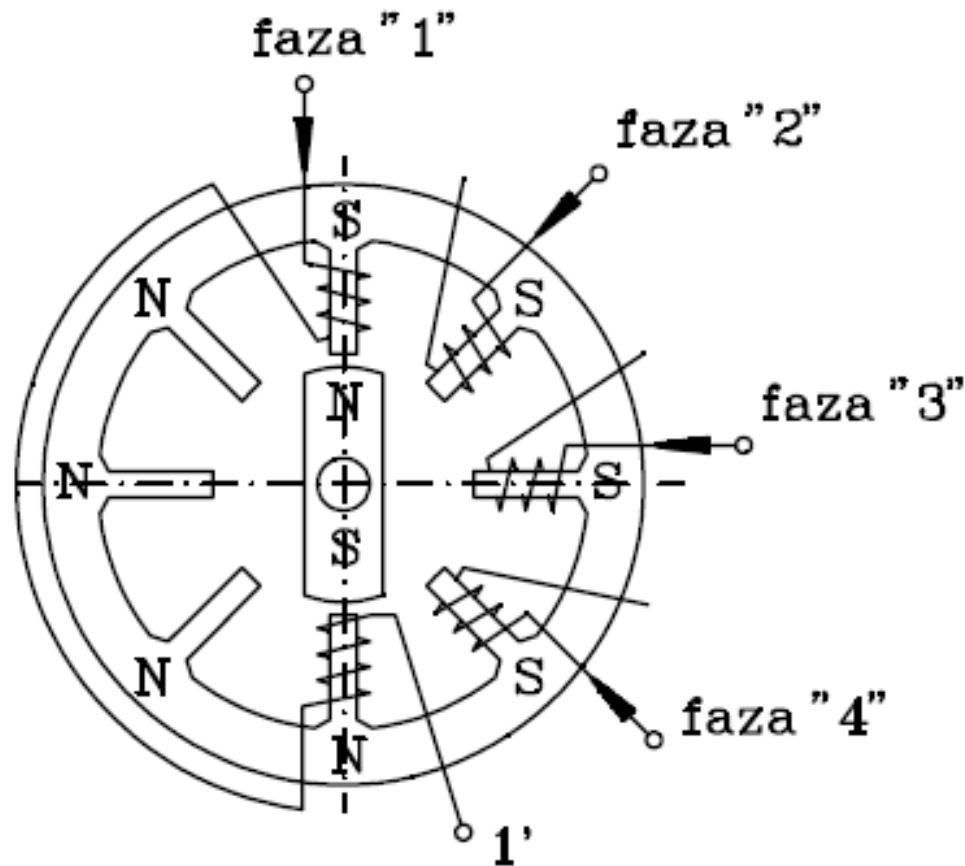
M.p.p. cu reluctanță magnetică variabilă au următoarele **avantaje** principale:

- frecvența maximă de comandă atinge limite relativ mari și deci se pot realiza viteze ridicate;
- construcție mecanică simplă;
- poate fi realizat pentru o gamă largă de pasi unghiulari;
- este bidirecțional dacă dispune de un număr mare de faze.

Dintre **dezavantajele** m.p.p cu reluctanță magnetică variabilă se pot menționa:

- nu memorează poziția și nu dezvoltă cuplu electromagnetic în lipsa alimentării fazelor statorice;
- oscilații importante ale rotorului la alimentarea unei singure faze statorice la un moment dat.

# M.P.P



# **M.P.P**

Varianta unui m.p.p cu magnet permanent in rotor.

Prin alimentarea fazei de comandă statorice se creează un flux ce interacționează cu cel al magnetului permanent. Rotorul se va roti astfel incat să ocupe o poziție ce corespunde unei reluctanțe minime pentru circuitul magnetic.

**Avantajele** utilizarii unui astfel de motor sunt:

- dezvoltă un cuplu de fixare a rotorului chiar în cazul nealimentării fazelor;
- consum energetic mai redus;
- rotorul are o miscare amortizată datorită prezenței magnetului permanent.

Principalele **dezavantaje** ale acestui motor sunt:

- performanțele motorului sunt afectate de variația caracteristicilor magnetilor permanenti;
- tensiunea electromotoare indusă în infasurarea de comandă are valori ridicate.

# **M.P.P**

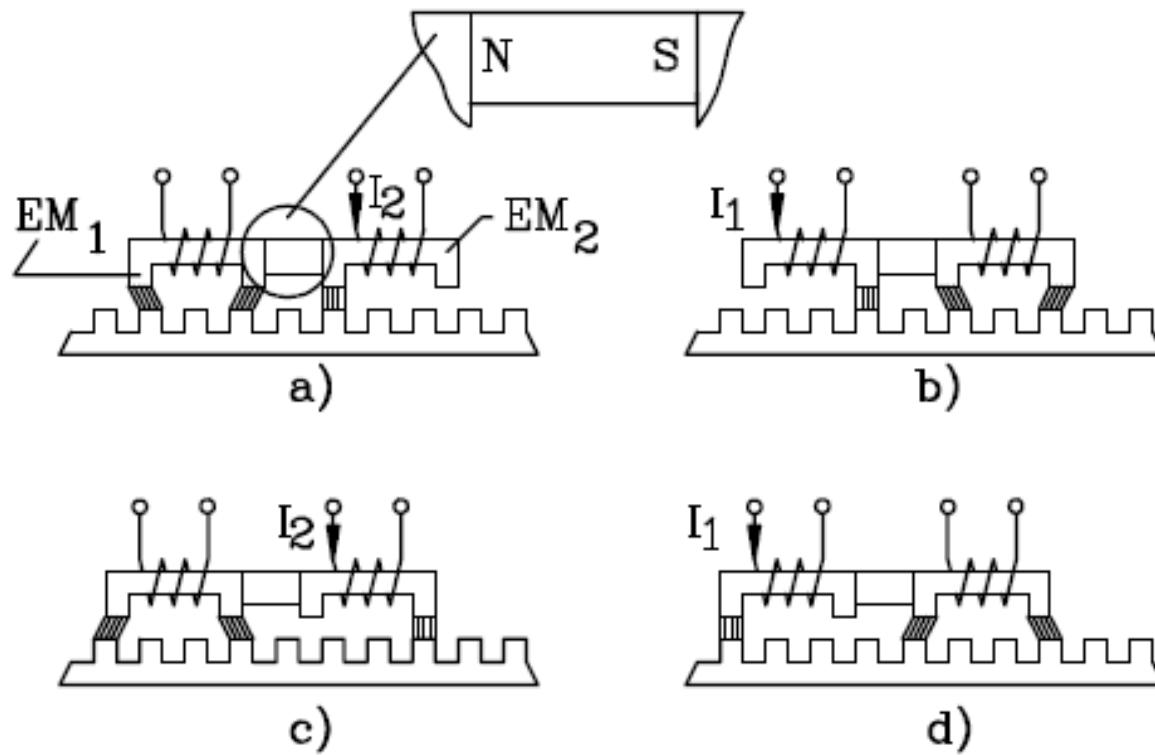
Variante m.p.p.

Referitor la construcția m.p.p. se mai pot aminti variantele constructive ale m.p.p. electromecanice ( o combinație compactă m.p.p. si reductor armonic cu angrenare radială = m.p.p. RESPONSYN, sau angrenaj frontal = m.p.p. MEASURMATIC) si a m.p.p. electrohidraulice (combinatie m.p.p. cu amplificator de cuplu hidraulic cu piston axial).

Realizarea principală - constructivă si functională - a unui m.p.p. liniar. Partea activă este realizată din doi electromagneți (EM1 si EM2) si separați de un magnet permanent. Partea pasivă feromagnetică este danturată cu același pas ca si cel al electromagneților din partea activă. Magnetul permanent asigură un flux magnetic ce se inchide prin electromagneți si prin circuitul magnetic al părții pasive. Alimentarea unui electromagnet se realizează de asa manieră incat campul sub un pol al acestuia se va dubla iar sub celălalt se anulează. La alimentarea doar a electromagnetului EM2 partea mobilă tinde să ocupe poziția de reluctanță minimă. Decupland alimentarea pe EM2 si alimentand EM1 partea mobilă se va deplasa cu un sfert de pas sub acțiunea forțelor electromagnetice si va ocupa o nouă poziție de reluctanță minimă

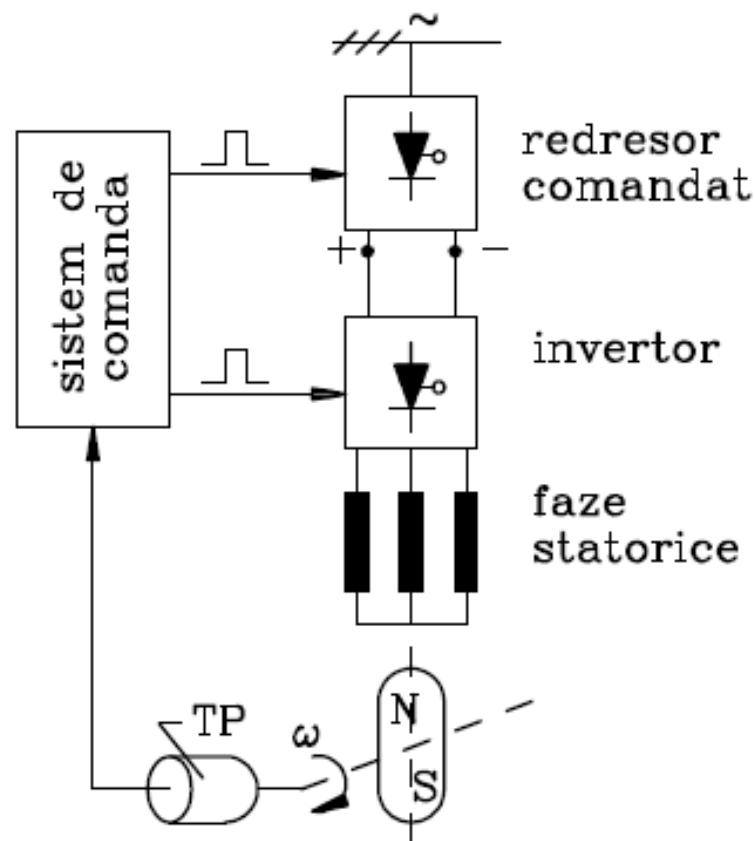
# M.P.P

Variante m.p.p.



# M.P.P

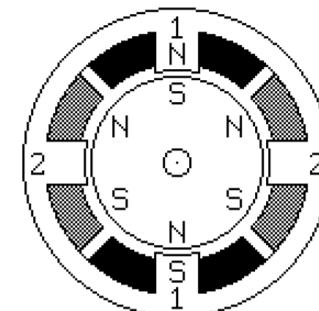
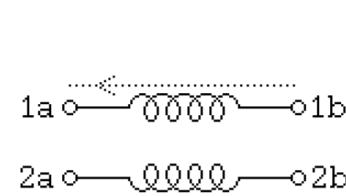
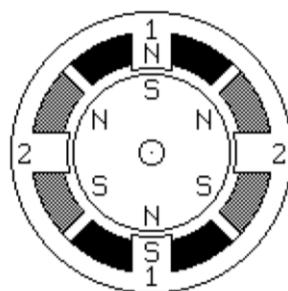
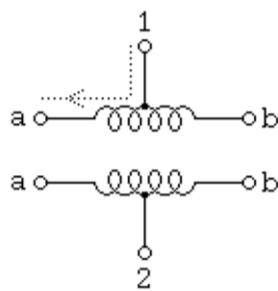
Motorul sincron cu magnet permanent, autopilotat, are posibilitatea de înlocuire a motoarelor de c.c. utilizate în construcția robotilor industriali.



# M.P.P

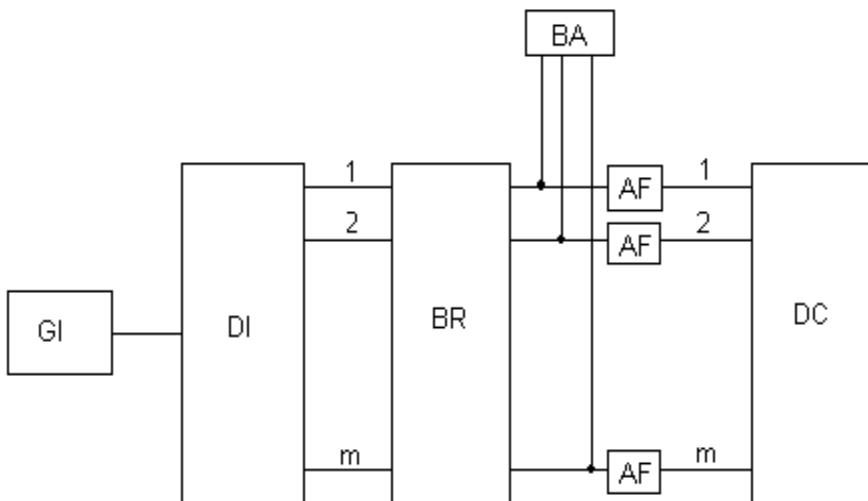
## MOTORUL(unipolar si bipolar)

Cel mai des folosite motoare pas cu pas pot fi grupate in clase generale, motoare unipolare si motoare bipolare. Motoarele bipolare produc in mod tipic un cuplu de torsiune mai mare intr-o forma data.



# M.P.P

## Circuite de comanda pentru M.P.P.



GI –generator de impulsuri

DI- distribuitor de impulsuri

BR – bloc de reversare

BA- bloc de afisare succesiune impulsuri

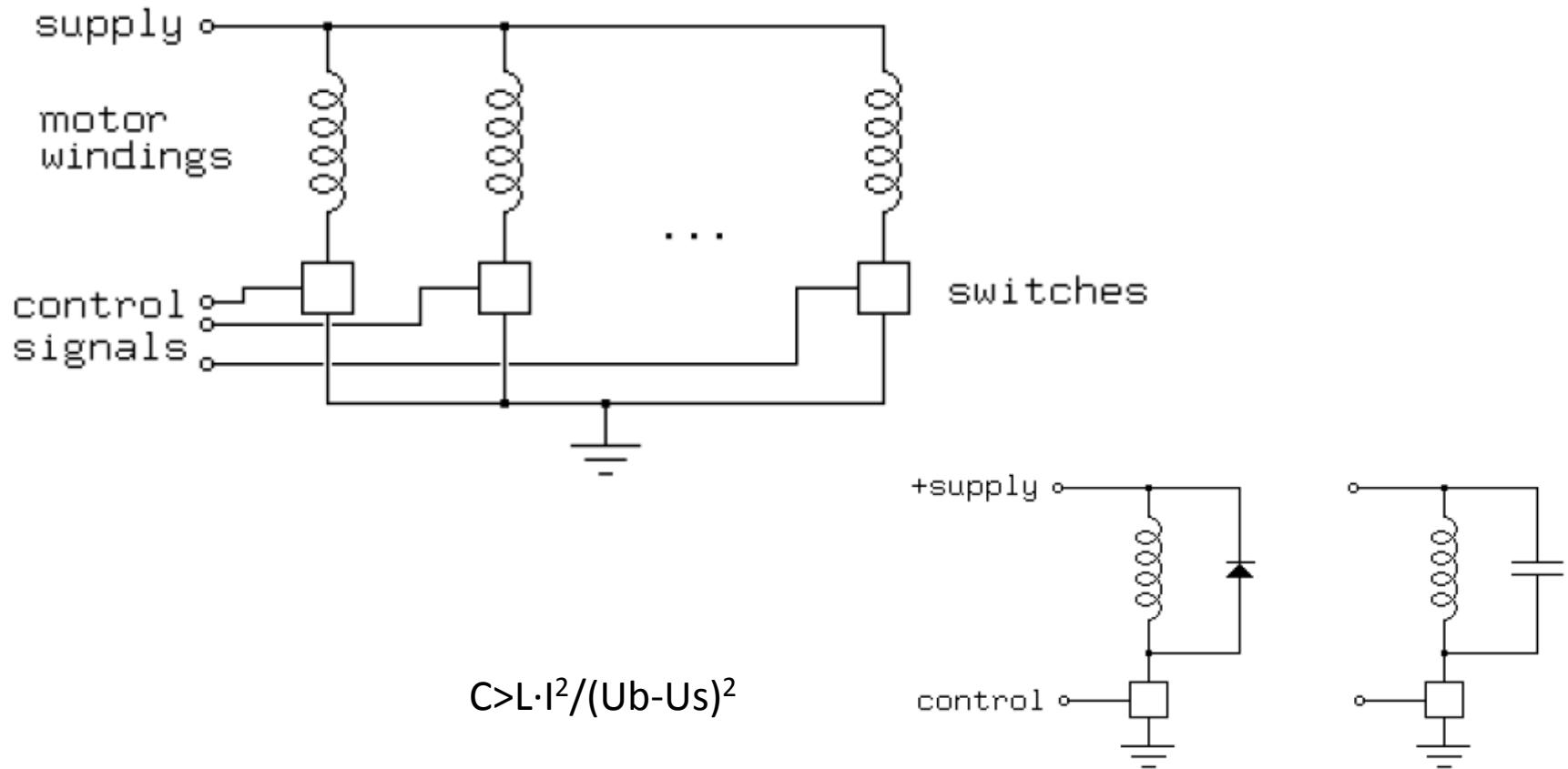
AF- amplificator formator

Sistemul de comanda a motoarelor pas cu pas reprezinta un ansamblu de blocuri functionale care realizeaza un sistem  $m$  fazat de impulsuri de tensiune, teoretic dreptunghiulare, pentru alimentarea infasurilor de comanda ale motorului, intr-o animita succesiune.

Posibilitatea de reglare a frecventei sistemului de impulsuri  $m$  fazat intr-un domeniu foarte larg, pana la frecventa nula, cand se mentine sub tensiune o singura infasurare de comanda, in scopul fixarii rotorului intr-o anumita pozitie, constituie o particularitate esentiala a acestui sistem de comanda fata de convertizoarele de frecventa obisnuite.

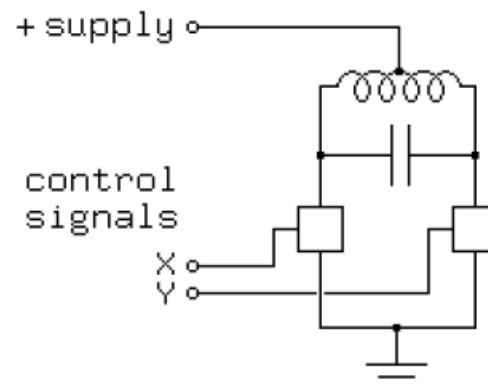
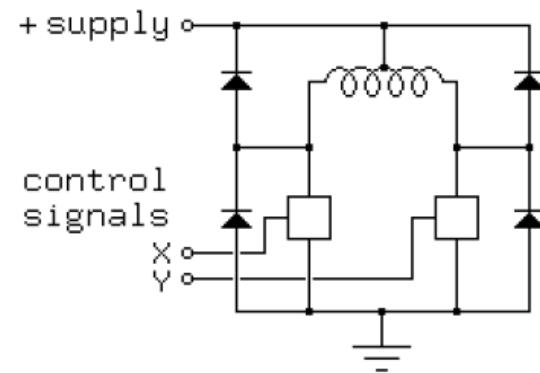
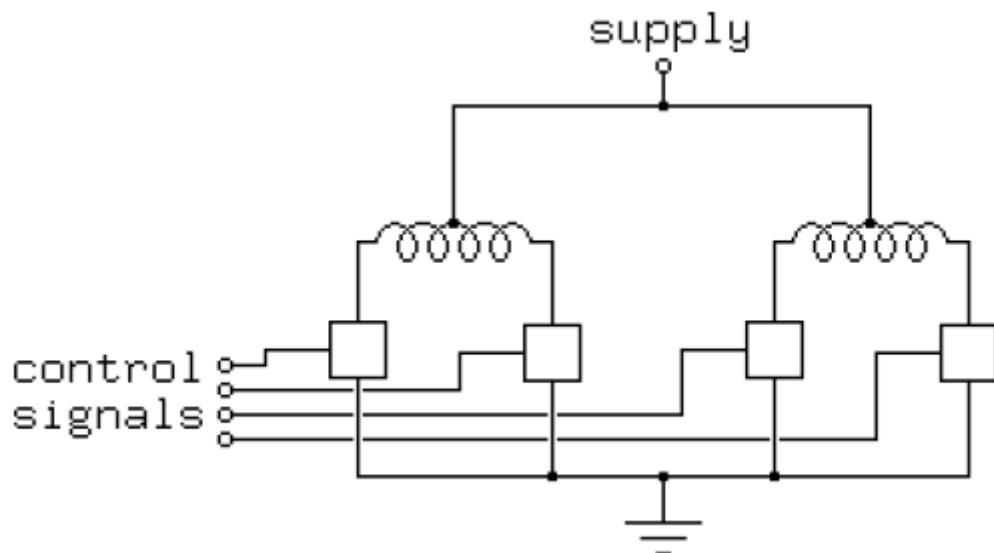
# M.P.P

## Circuite de comanda pentru M.P.P. cu reluctanta variabila



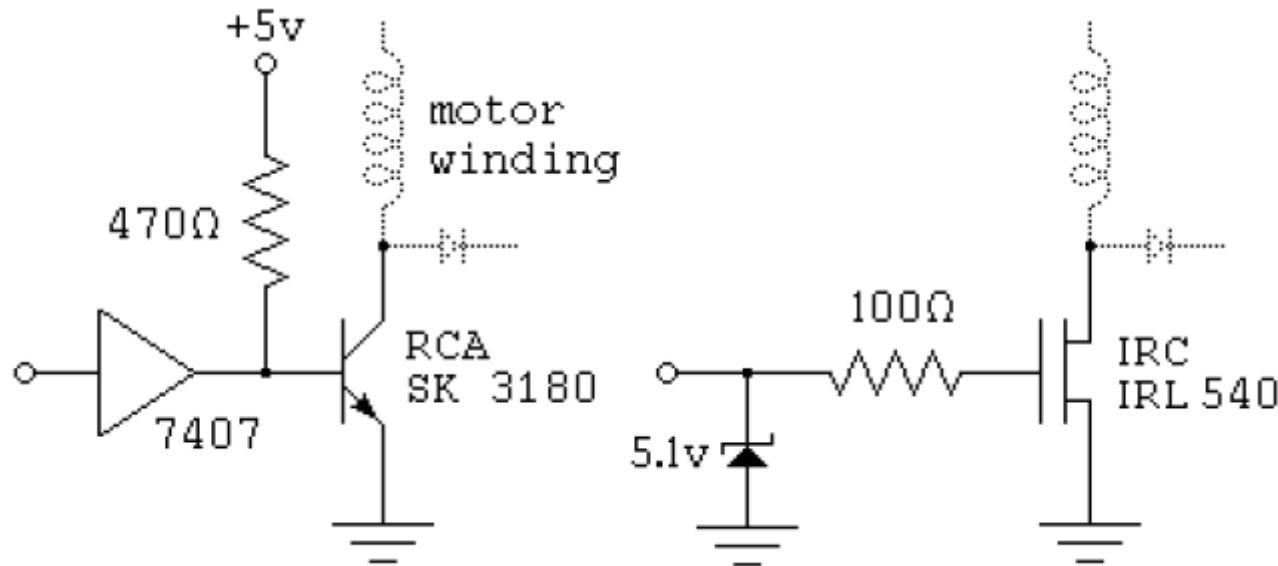
# M.P.P

## Circuite de comanda pentru M.P.P. unipolar



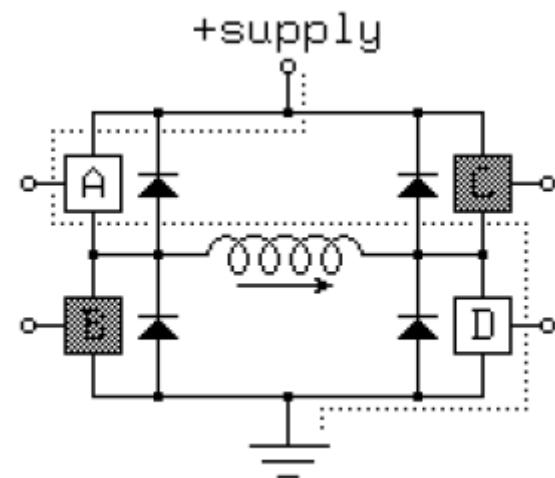
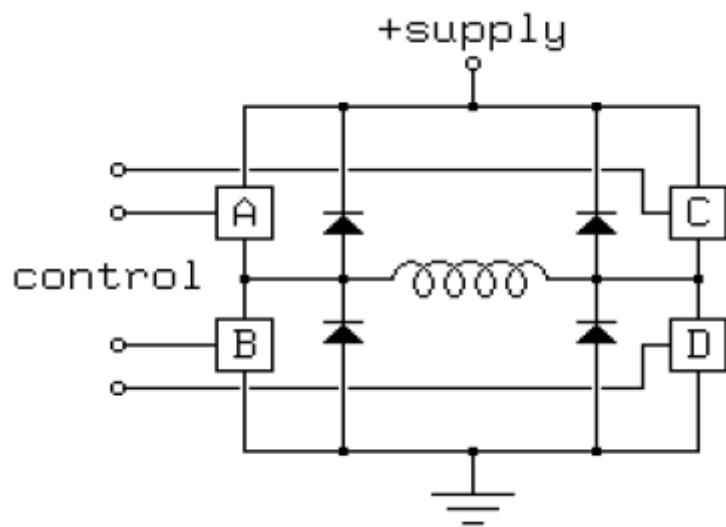
# M.P.P

## Circuite de comanda pentru M.P.P. unipolar



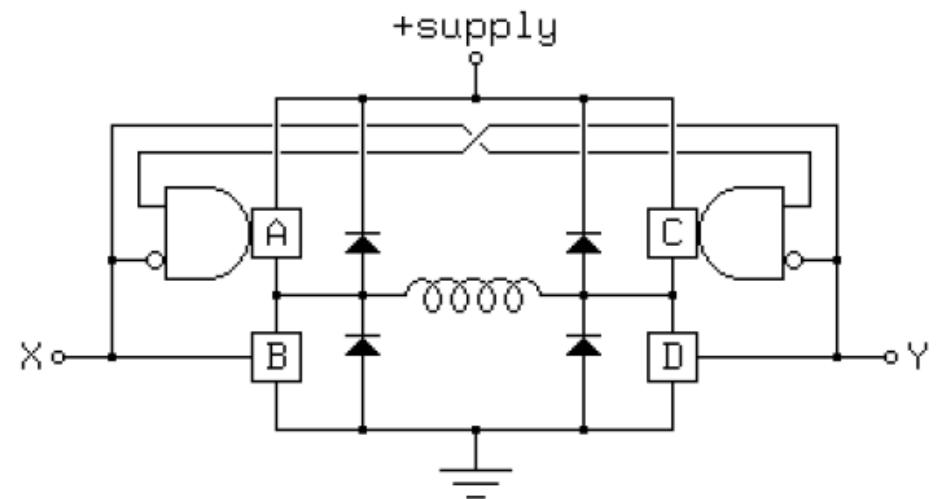
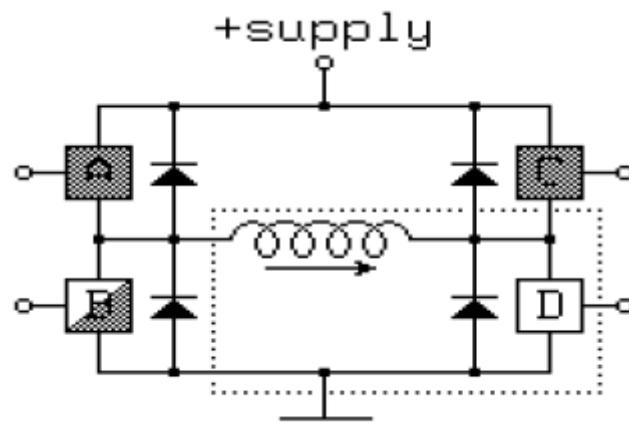
# M.P.P

## Circuite de comanda pentru M.P.P. bipolar



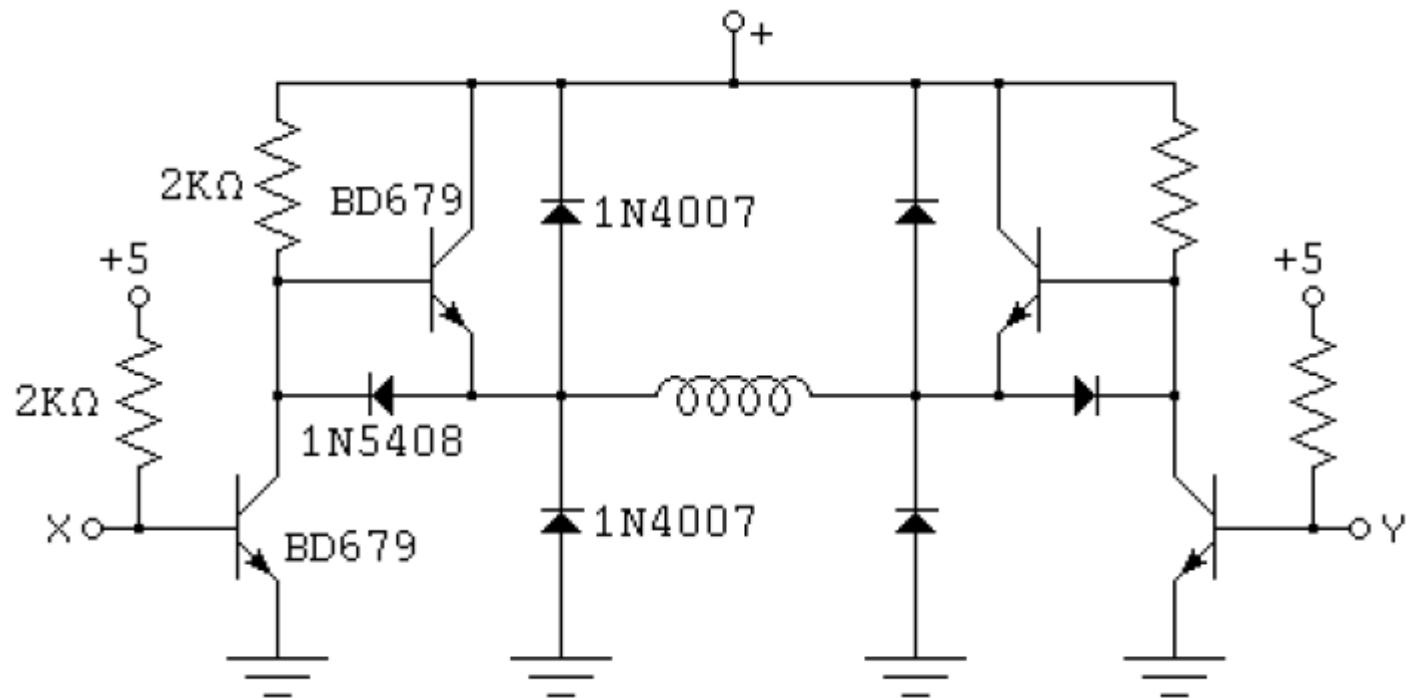
# M.P.P

## Circuite de comanda pentru M.P.P. bipolar



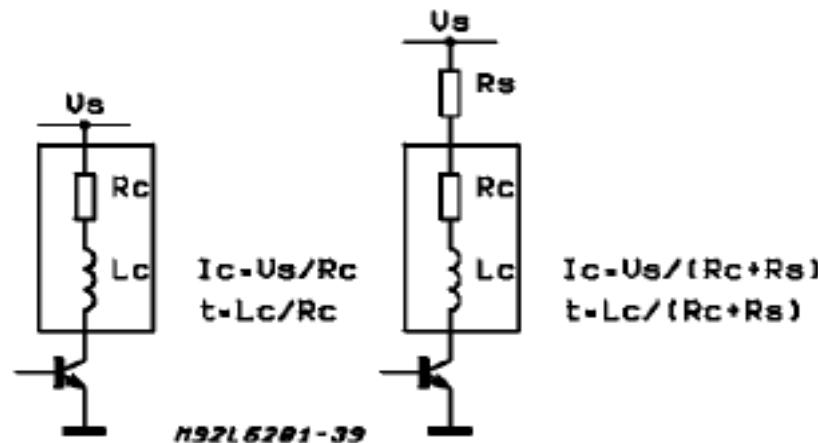
# M.P.P

## Circuite de comanda pentru M.P.P. bipolar



# M.P.P

## Circuite de comanda pentru M.P.P.



# **M.P.P**

## **Regimul tranzitoriu. Reducerea constantei de timp**

Aparitia regimurilor tranzitorii de functionare este determinata de modificarea frecventei impulsurilor de comanda, la pornire, franare, reversare sau la schimbarea vitezei de rotatie, precum si la modificarea cuplului rezistent. In timpul regimurilor tranzitorii, rotorul trebuie sa urmareasca succesiunea impulsurilor de comanda fara pierderi de pasi, respectiv la sfarsitul regimului tranzitoriu, pozitia unghiulara a rotorului sa fie in punctul de echilibru stabil al caracteristicii cuplului static sincronizat corespunzator infasurarii la care este aplicat impulsul de comanda.

Cu toate acestea, in timpul regimului tranzitoriu, rotorul poate ramane in urma, cu conditia ca sa se mentina in zona de stabilitate dinamica.

# **M.P.P**

## **CARACTERISTICILE MOTORULUI PAS CU PAS**

**Unghiul de pas (pasul motorului)** reprezinta unghiul de rotatie al rotorului corespunzator unui tact de comanda. Din punct de vedere cantitativ el depinde de numarul de perechi de poli si de numarul infasurilor de comanda decalate spatial una de alta; in cazul motoruluipas cu pas de tip activ – de numarul dintilor rotorici si in cazul motorului pas cu pas de tip reactiv – de numarul infasurilor de comanda. De asemenea, unghiul de pas depinde, la ambele tipuri de motoare, de secventa de comanda a infasurilor statorului. Spre exemplu, in cazul unei secvente de tipul 1 – 1,2 – 2 – 2,3 – 3 ... se obtine un pas egal cu jumatate din valoarea corespunzatoare unei secvente simple 1 – 2 – 3 ... Din punct de vedere cantitativ marimea unghiului de pas depinde de precizia configuratiei geometrice a circuitului magnetic. Nesimetria circuitului magnetic poate provoca mici variatii ale unghiului de pas, care insa se compenseaza de-a lungul unei rotatii complete.

# M.P.P

## CARACTERISTICILE MOTORULUI PAS CU PAS

**Cuplul static sincronizat.** Caracteristica cuplului static sincronizat reprezinta variatia cuplului electromagnetic dezvoltat de motor in functie de unghiul de decalaj al axei magnetice a rotorului fata de axa fluxului resultant statoric, in cazul cand infasurarile de comanda sunt parcuse de curent. In general cuplul electromagnetic variaza periodic cu unghiul de rotatie dupa o functie apropiata de o sinusoida.

# M.P.P

## CARACTERISTICILE MOTORULUI PAS CU PAS

**Cuplurile limită.** O deosebită importanță în alegerea domeniului de funcționare a motoarelor pas cu pas o are cunoasterea valorilor maxime ale cuplului aplicat pe arborele motorului. În regim permanent de funcționare se definește un cuplu critic cvasistationar ca fiind valoarea maxima la care poate mari cuplul rezistent, la o frecvență de comandă dată, fără a cauza ieșirea din sincronism a motorului (pierderea pasilor). La frecvențe de comandă mai mari, cuplul critic cvasistationar este mai mic, variația cuplului critic cvasistationar cu frecvența de comandă reprezintă caracteristica de sarcină limită a motorului pas cu pas. La pornire se definește un cuplu critic de pornire, care reprezintă valoarea maxima a cuplului rezistent la care motorul poate porni cu frecvența dată fără pierdere de pasi. Variația cuplului critic de pornire cu frecvența de comandă se numește caracteristica limită de pornire. În mod similar se definesc cuplurile critice de oprire și reversare.

# M.P.P

## CARACTERISTICILE MOTORULUI PAS CU PAS

**Frecvențele limită.** Caracteristica de sarcina limită, precum și cele dinamice limită (de pornire, oprire și reversare), s-au stabilit luând ca reper o frecvență de comandă dată. Astfel s-au definit cuplurile limită. Dacă se ia ca referință un cuplu rezistent dat se pot defini în mod similar frecvențele limită (critice) la funcționarea în regim static și dinamic (pornire, oprire, reversare). Toate marimile critice depind în cea mai mare măsură de panta curentului ce se stabilește în infasurările de comandă și de inerția sistemului de acțiune. Caracteristicile statice și dinamice cuplu – frecvența are forme care se apropie de hiperbolă, prezintând una sau mai multe și datorită prezenței fenomenului de rezonanță mecanică. La nivelul superior se situează caracteristica limită de oprire, aceasta din cauza că efectul de oprire este favorizat de sensul cuplului rezistent. Sub caracteristica limită de oprire urmează, în ordine, caracteristicile de sarcina limită, de pornire și de reversare, aceasta din urmă exprimând regimul cel mai greu de funcționare sincronă a motorului pas cu pas. De altfel, caracteristica limită de reversare este acoperitoare în sensul că alegerea domeniului de funcționare cuplu – frecvența a motorului pe baza acestei caracteristici, determină o funcționare fără pierderi de pasi în orice regim de funcționare.

# M.P.P

## Ecuatia de functionare a M.P.P.

$$[u] = [R] \cdot [i] + [L] \cdot \left[ \frac{di}{dt} \right] + \left[ \frac{dL}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right] \cdot [i]$$

## Pasul M.P.P.

$$\theta_p = \frac{360}{p \cdot m}$$

p – este numarul perechilor de poli ai rotorului;

m – este numarul infasurilor de comanda.

Pentru p=4 si m=4;

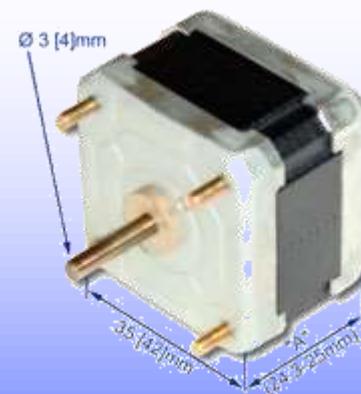
$\theta_p = 22,5^\circ$ . Acest pas se realizeaza pentru o schema de comanda cu patru tacturi. Pentru o comanda dupa schema cu opt tacturi,

$\theta_p = 11,5^\circ$ .

# **ANALIZA PARAMETRILOR UNUI MOTOR PAS CU PAS**

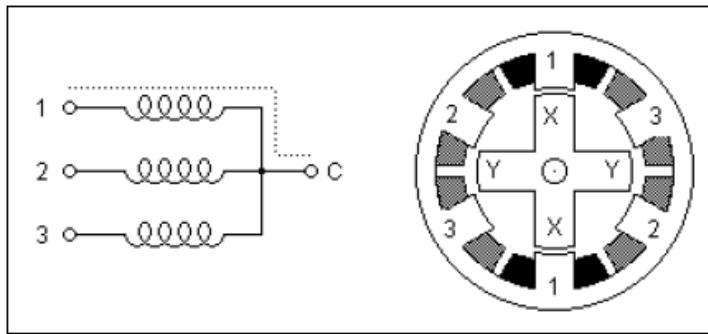
## GENERALITATI

- Motoarele pas cu pas acopera o nisa importanta in lumea motor-controlului
- Motoarele pas cu pas (MPP) au cteva caracteristici care le fac foarte potrivite in a fi utilizate in astfel de aplicatii :
  - lipsa periilor
  - nu depind de sarcina
  - pozitionare in bucla deschisa
  - cuplu de mentinere
  - raspuns excelent

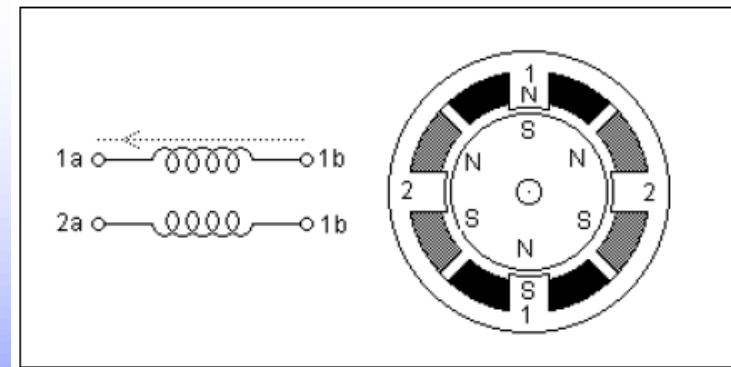
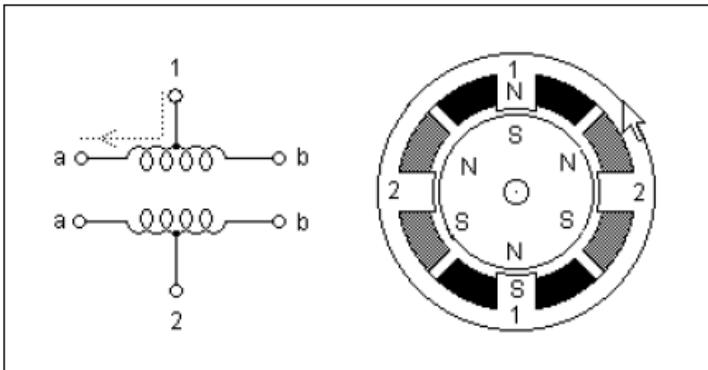


# TIPURI DE MOTOARE PAS CU PAS

- MPP cu reluctanta variabila

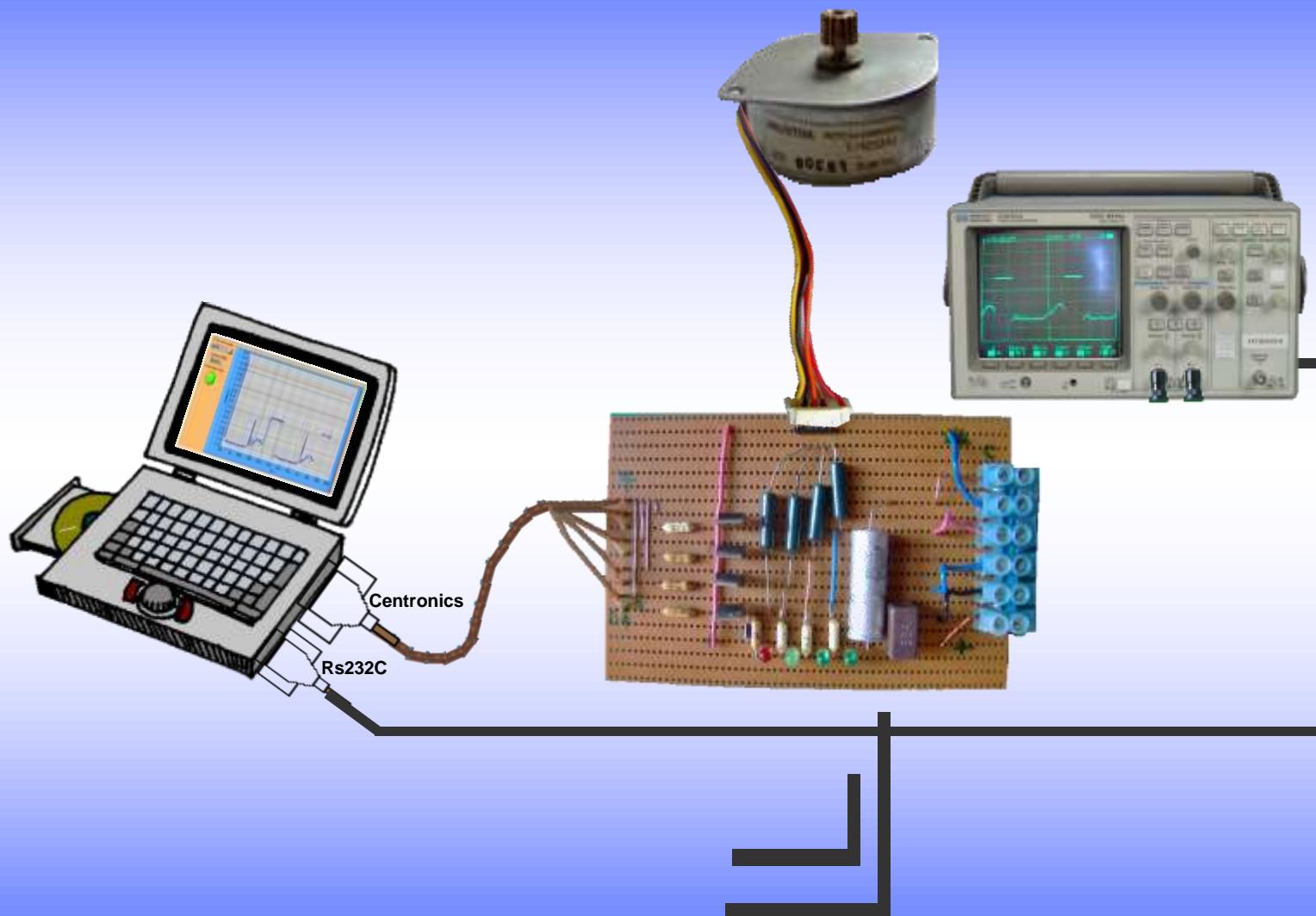


- MPP cu magneti permanenti

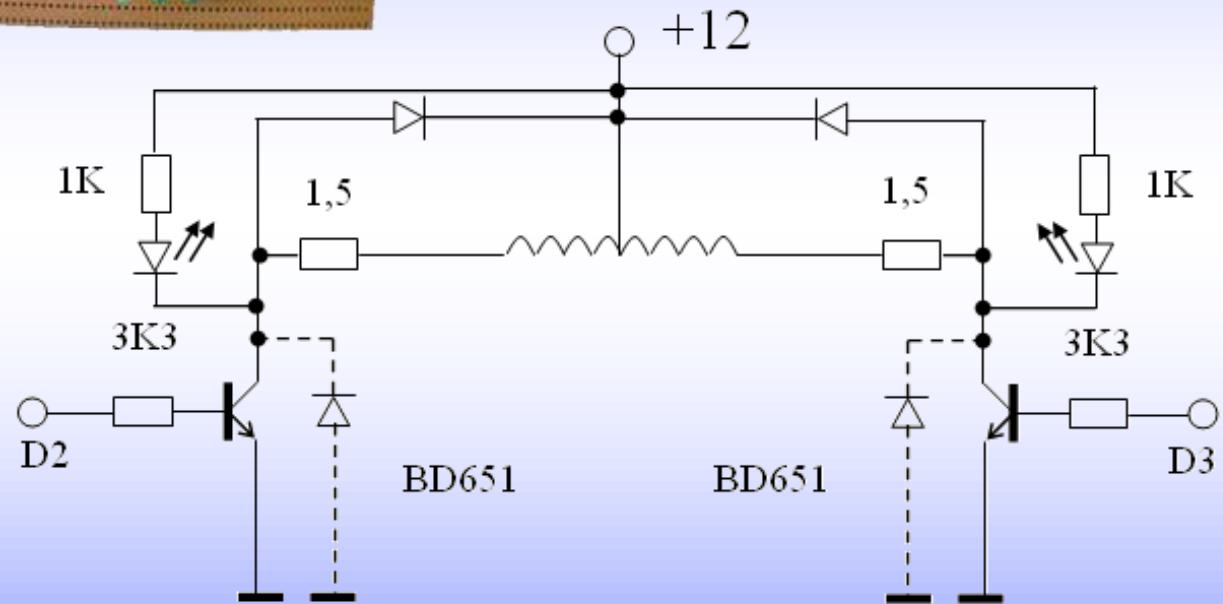
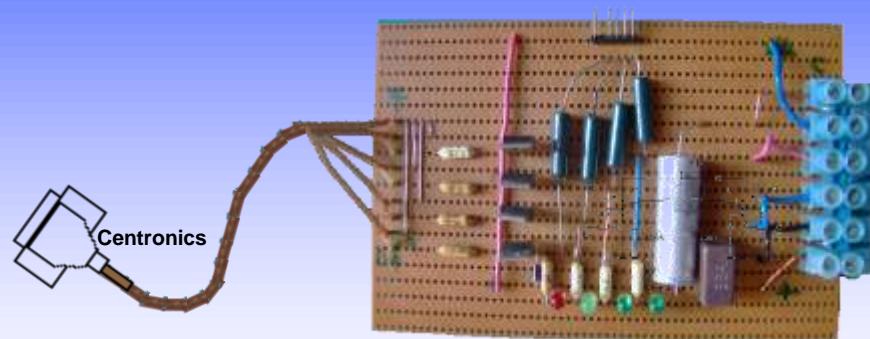


- MPP hibride

# SCHEMA BLOC



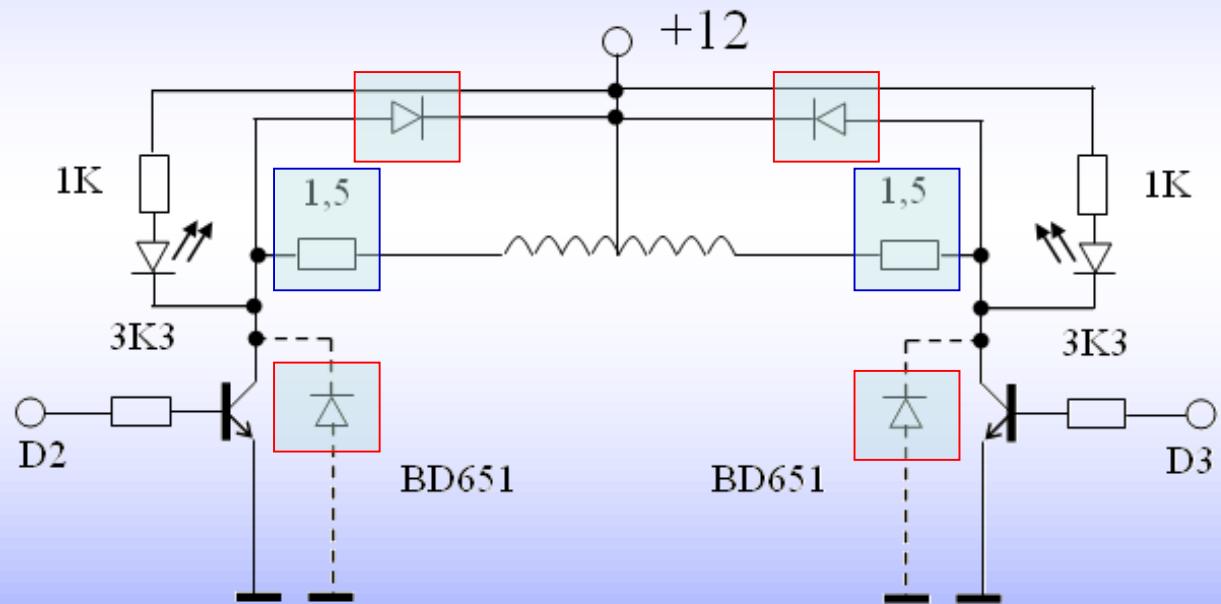
# SCHEMA ELECTRONICA MODUL DE PUTERE



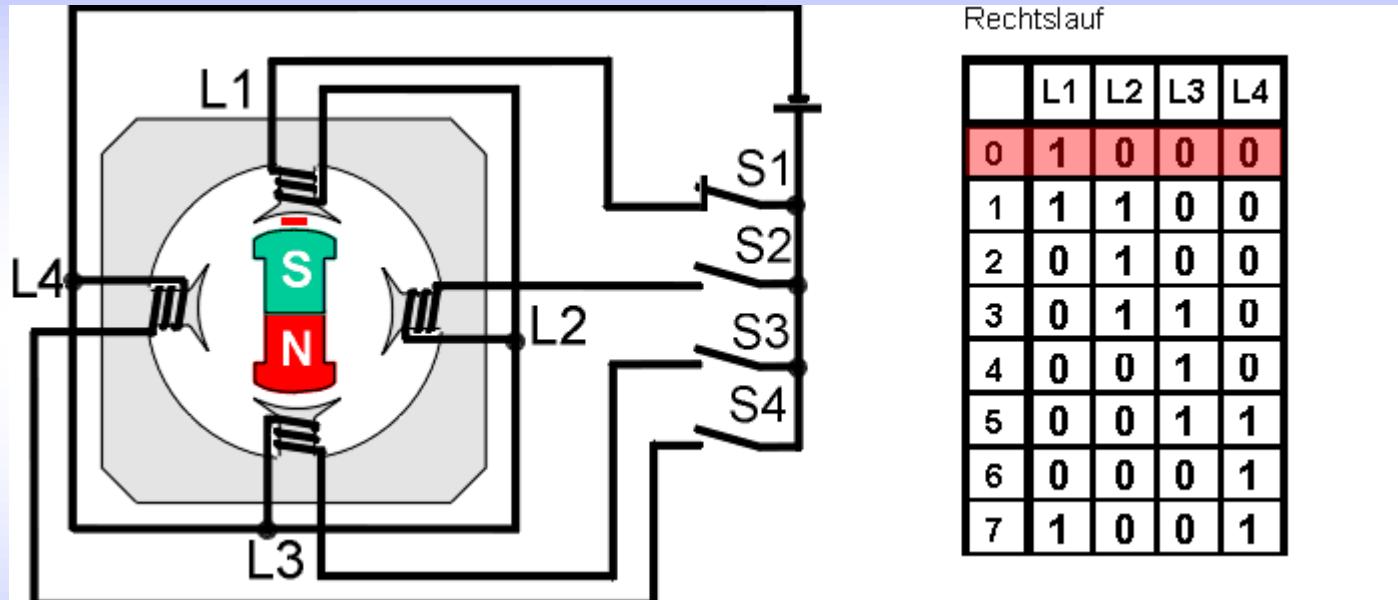
# REGIMUL TRANZITORIU – diode DRL

- Asigura protectia comutatoarelor la autoinductiile infasurilor
- Forme de unda U si I vizibil distincte cu si fara DRL

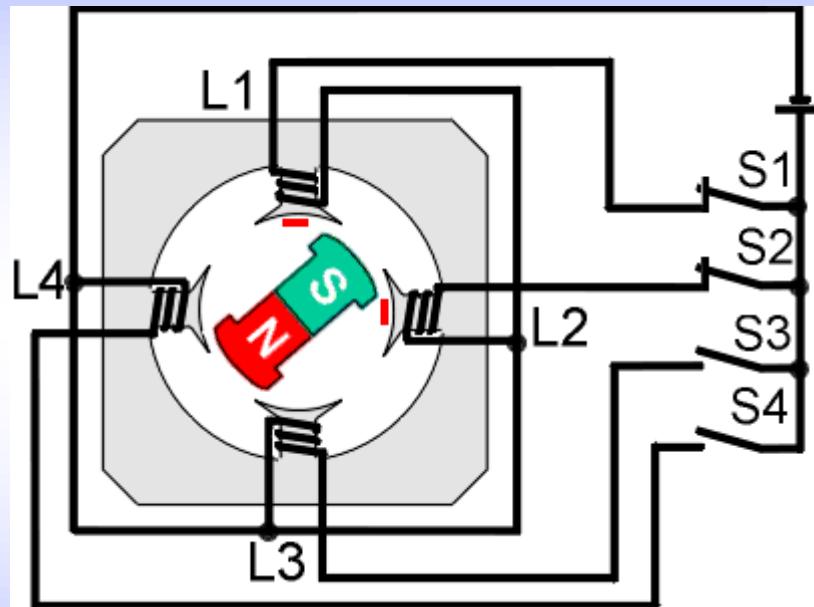
- Reducerea regimului oscilant



# MOTOARE PAS CU PAS – MOTORUL UNIPOLAR



# MOTOARE PAS CU PAS – MOTORUL BIPOAR



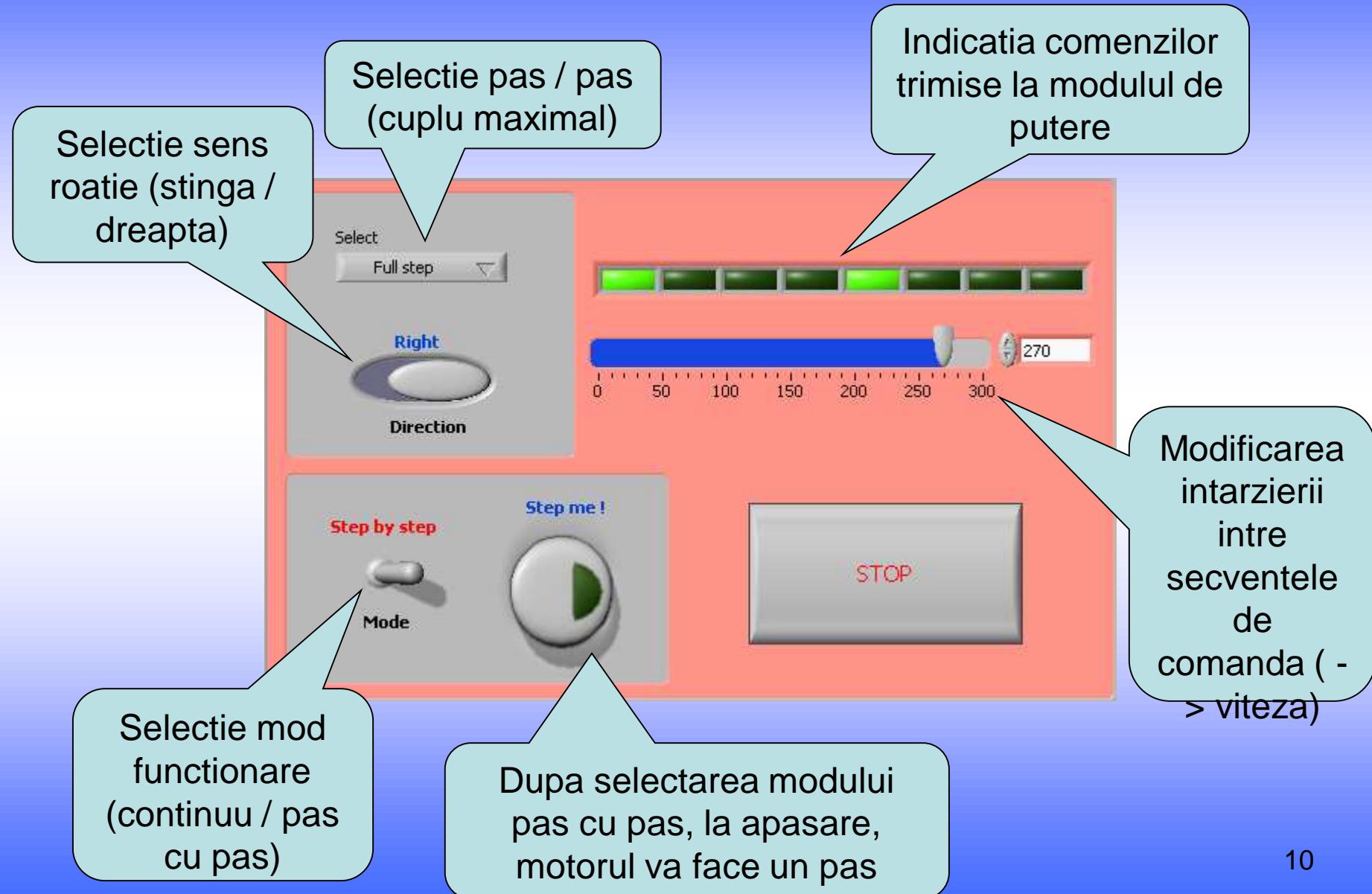
Rechtslauf

	L1	L2	L3	L4
0	1	1	0	0
1	0	1	1	0
2	0	0	1	1
3	1	0	0	1

## APLICATIA DE COMANDA MPP

- Dezvoltata in LabVIEW
- Permite comanda MPP unipolar
- Secvente de comanda pentru pas intreg (si cuplu maximal)
- Posibilitatea schimbarii sensului de rotatie
- Posibilitatea functionarii continue sau executarea unui pas la apasarea unui buton

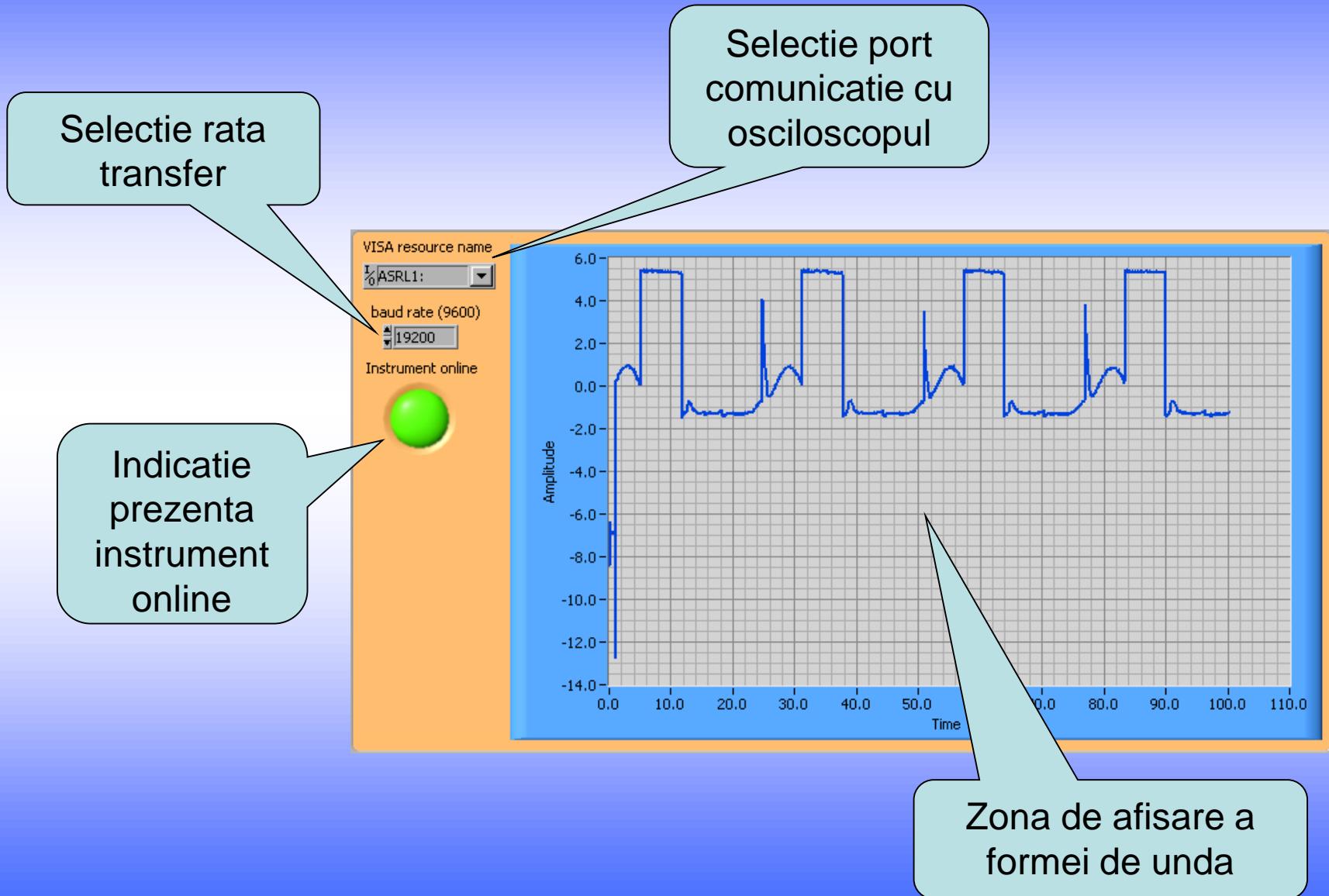
# APLICATIA DE COMANDA MPP – panoul frontal



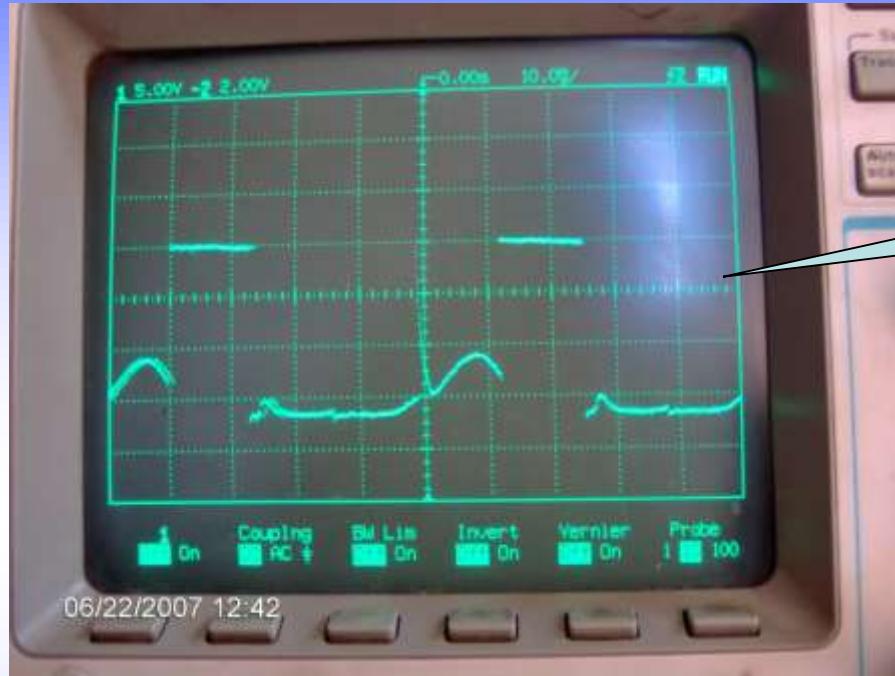
## APLICATIA DE ACHIZITIE DATE

- Dezvoltata in LabVIEW
- Detecteaza daca osciloscopul este conectat
- Permite configurarea osciloscopului catodic HP54600A
- Gestionarea transferul de date catre calculator
- Realizeaza prelucrarea si afisarea datelor achizitiei

# APLICATIA DE ACHIZITIE DATE – panoul frontal

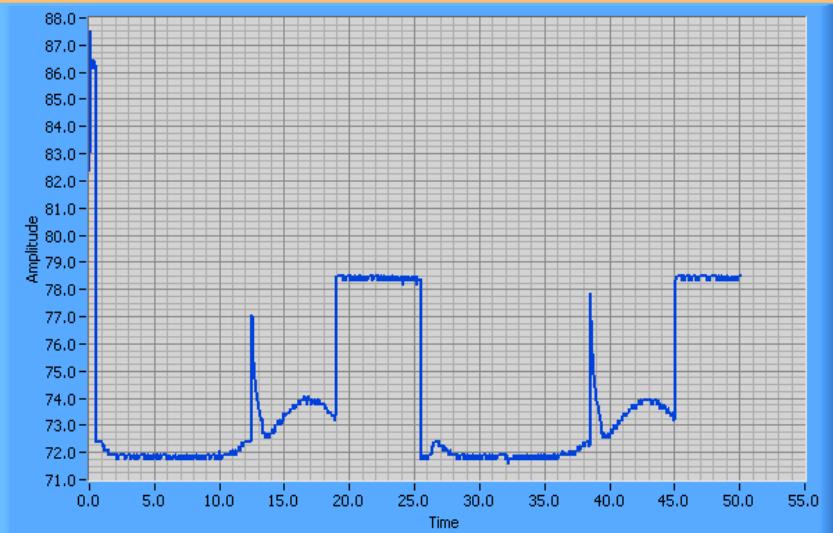


# OSCILOSCOP vs. COMPUTER

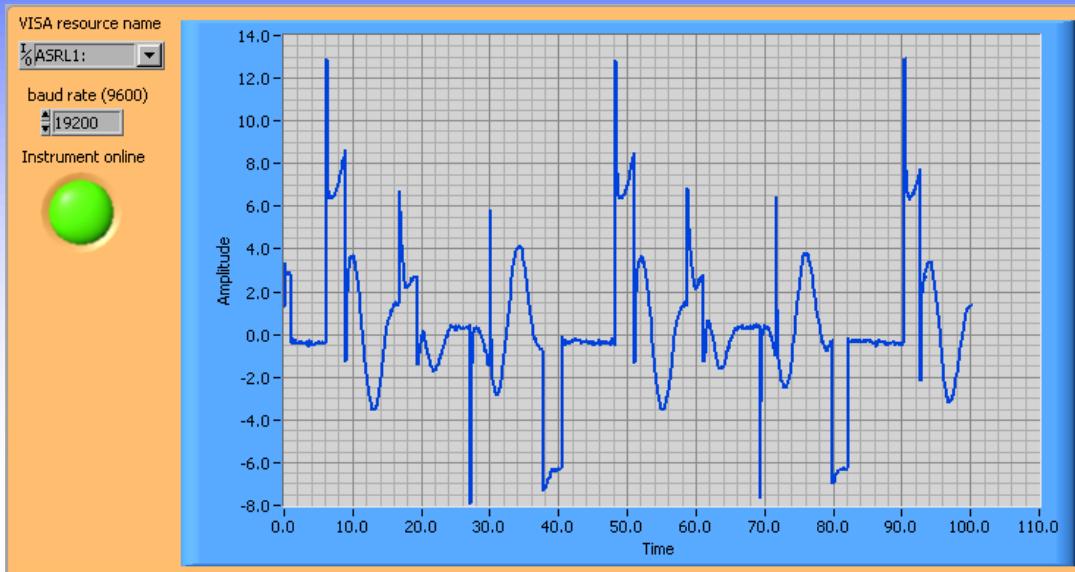


Imaginea de pe ecranul osciloskopului

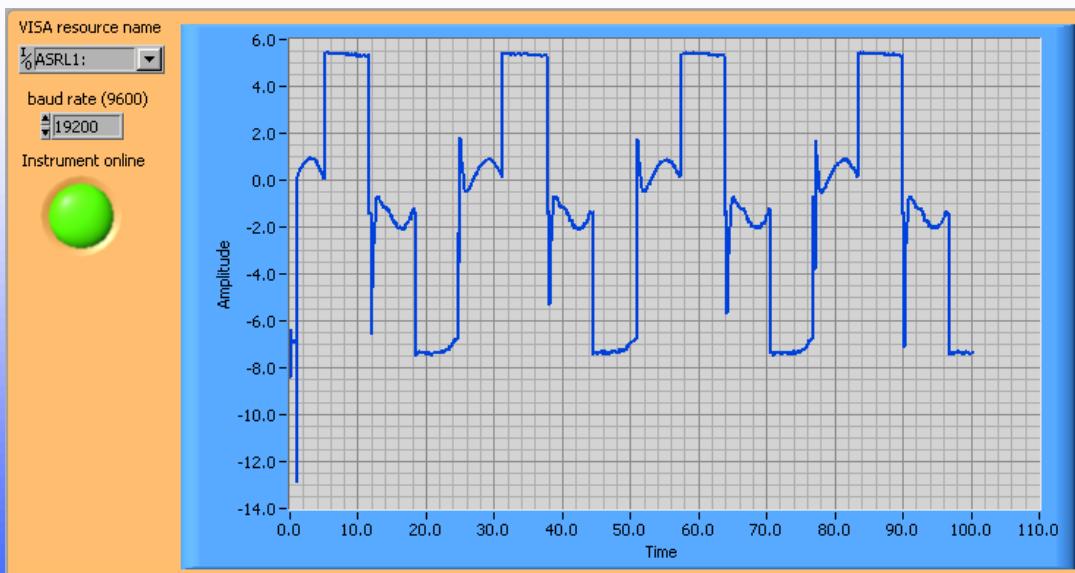
Imaginea dupa achizitie si prelucrarea semnalelor



# FORME DE UNDA ACHIZITIONATE

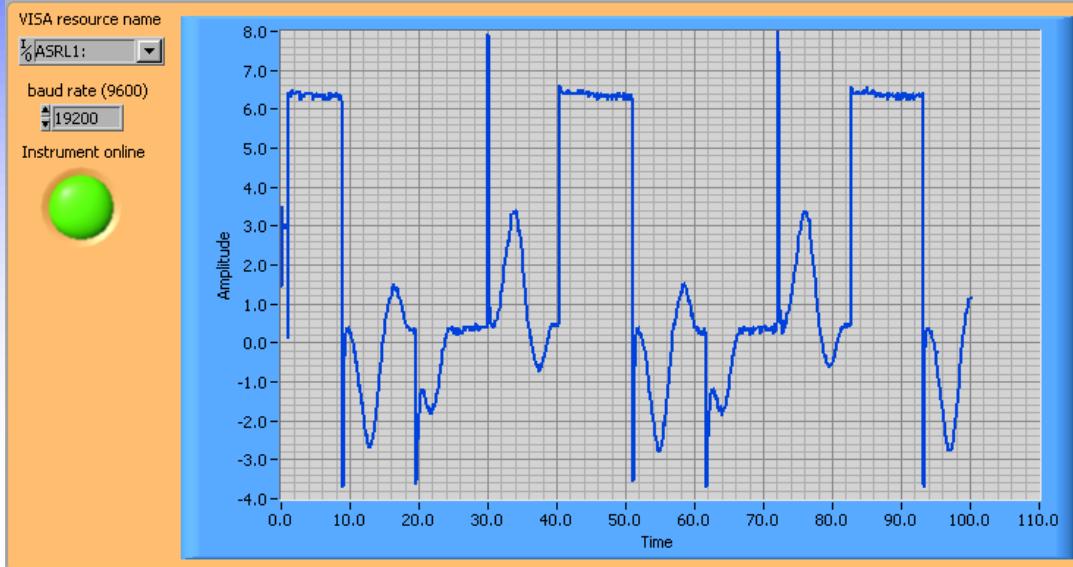


- Curentul prin infasurare la comanda cu pas intreg, **FARA DRL**

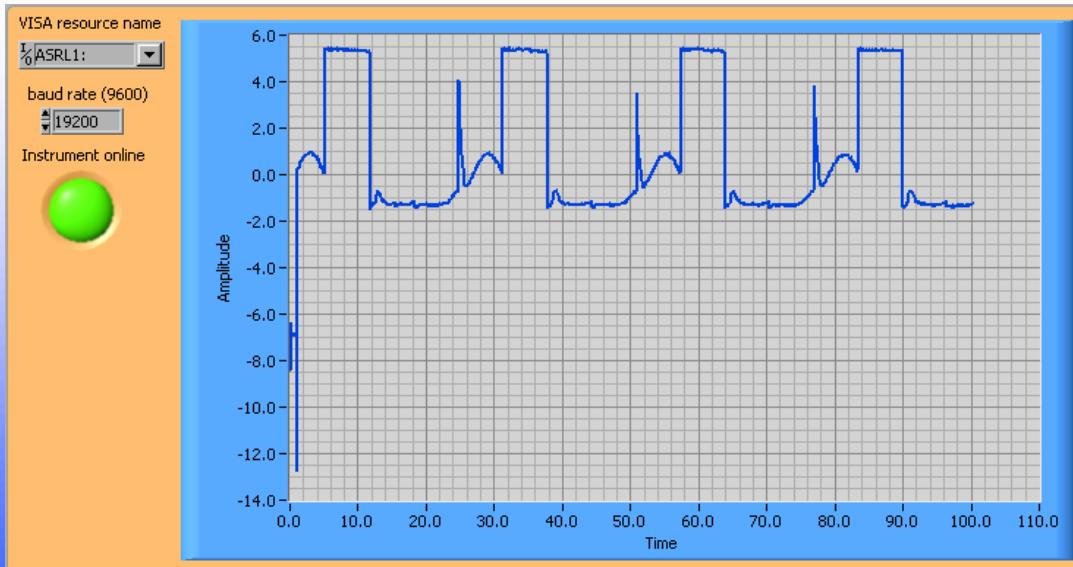


- Curentul prin infasurare la comanda cu pas intreg, **CU DRL**

# FORME DE UNDA ACHIZITIONATE

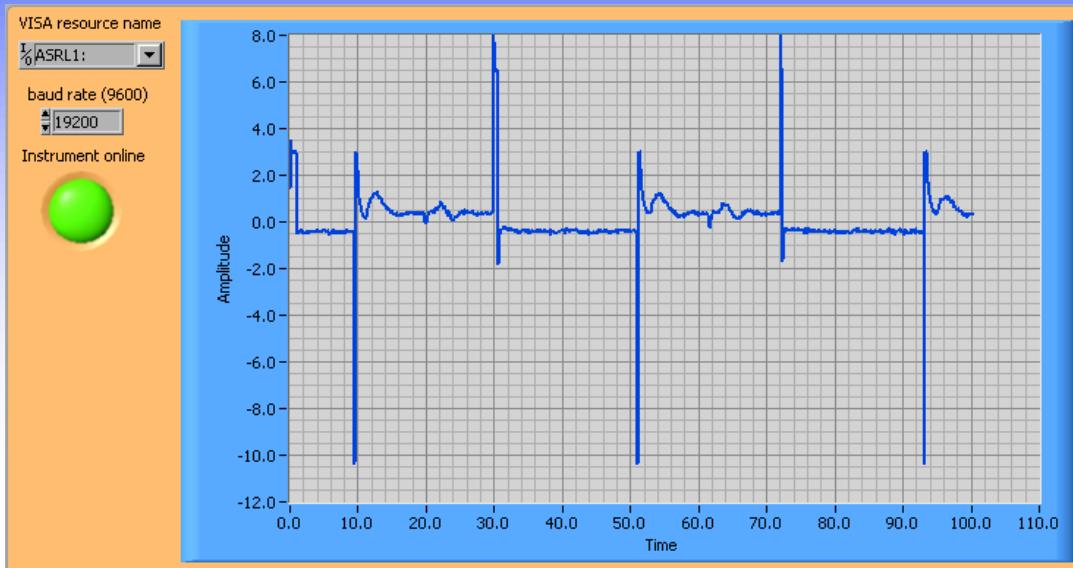


- Tensiunea la bornele infasurarii la comanda cu pas intreg, FARA DRL

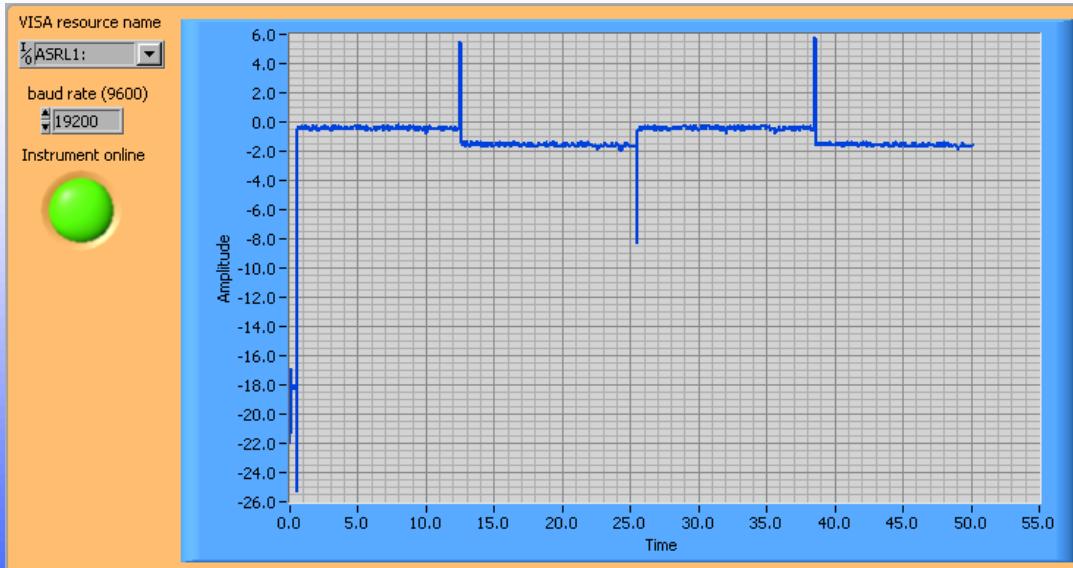


- Tensiunea la bornele infasurarii la comanda cu pas intreg, CU DRL

# FORME DE UNDA ACHIZITIONATE

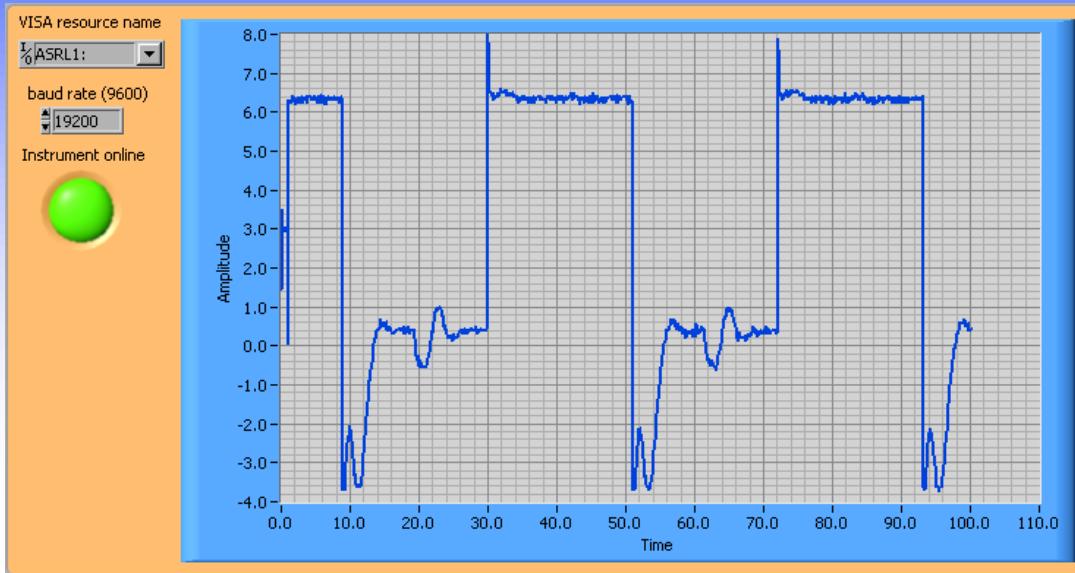


- Curentul prin infasurare la comanda cu pas intreg (cuplu maximal), FARA DRL

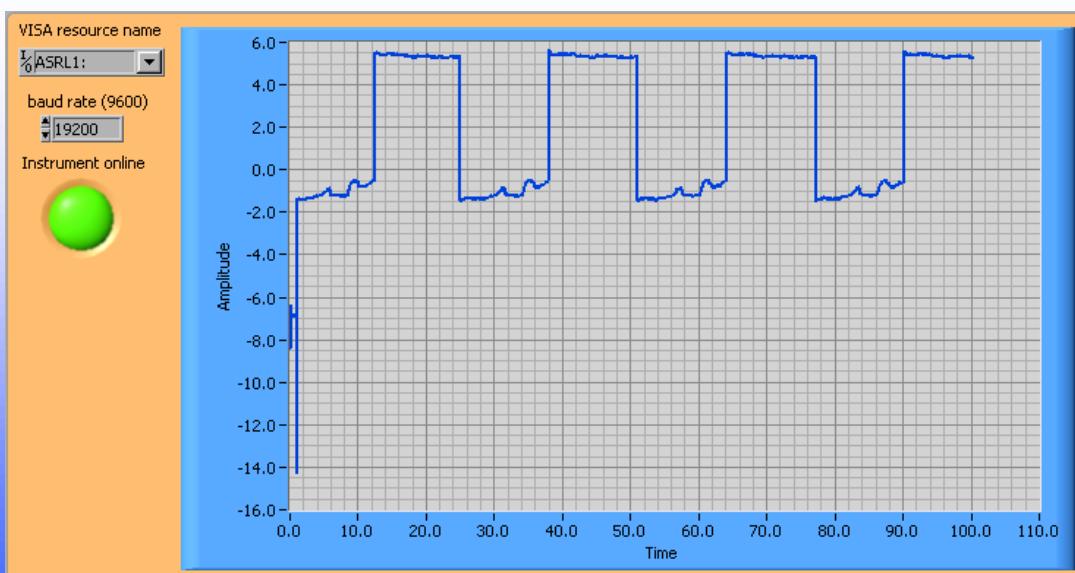


- Curentul prin infasurare la comanda cu pas intreg (cuplu maximal), CU DRL

# FORME DE UNDA ACHIZITIONATE



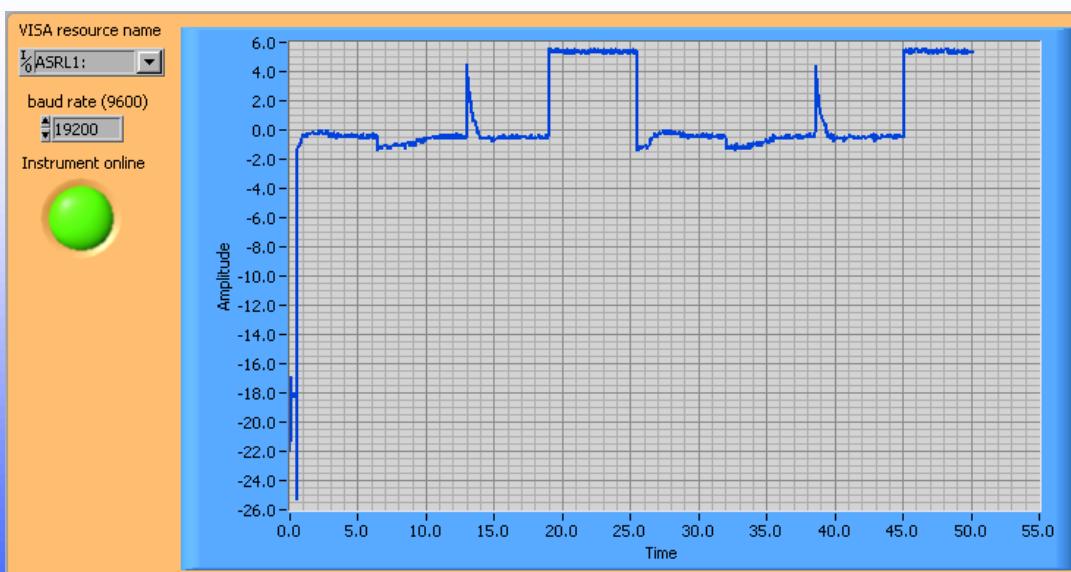
- Tensiunea la bornele infasurarii la comanda cu pas intreg (cuplu maximal), **FARA DRL**
- Tensiunea la bornele infasurarii la comanda cu pas intreg (cuplu maximal), **CU DRL**



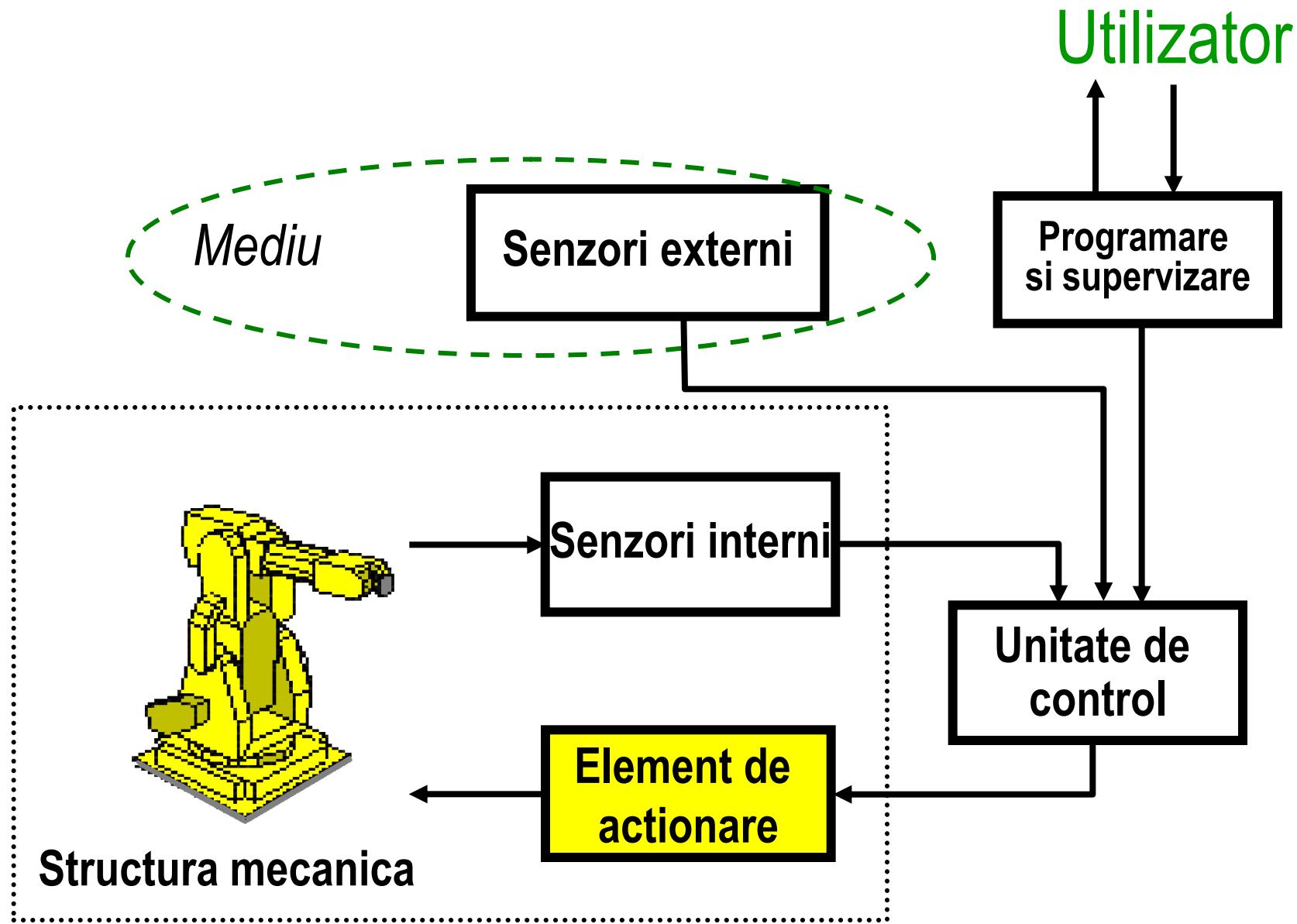
# FORME DE UNDA ACHIZITIONATE



- Tensiunea la bornele infasurarii la comanda cu pas intreg (rotor blocat), **FARA DRL**
- Tensiunea la bornele infasurarii la comanda cu pas intreg (rotor blocat), **CU DRL**



*Element de  
actionare*



# Elemente de acționare

## 1 – Elemente de acționare pneumatice

Cilindrii

## 2 – Elemente de acționare hidraulice

Cilindrii

Motoare

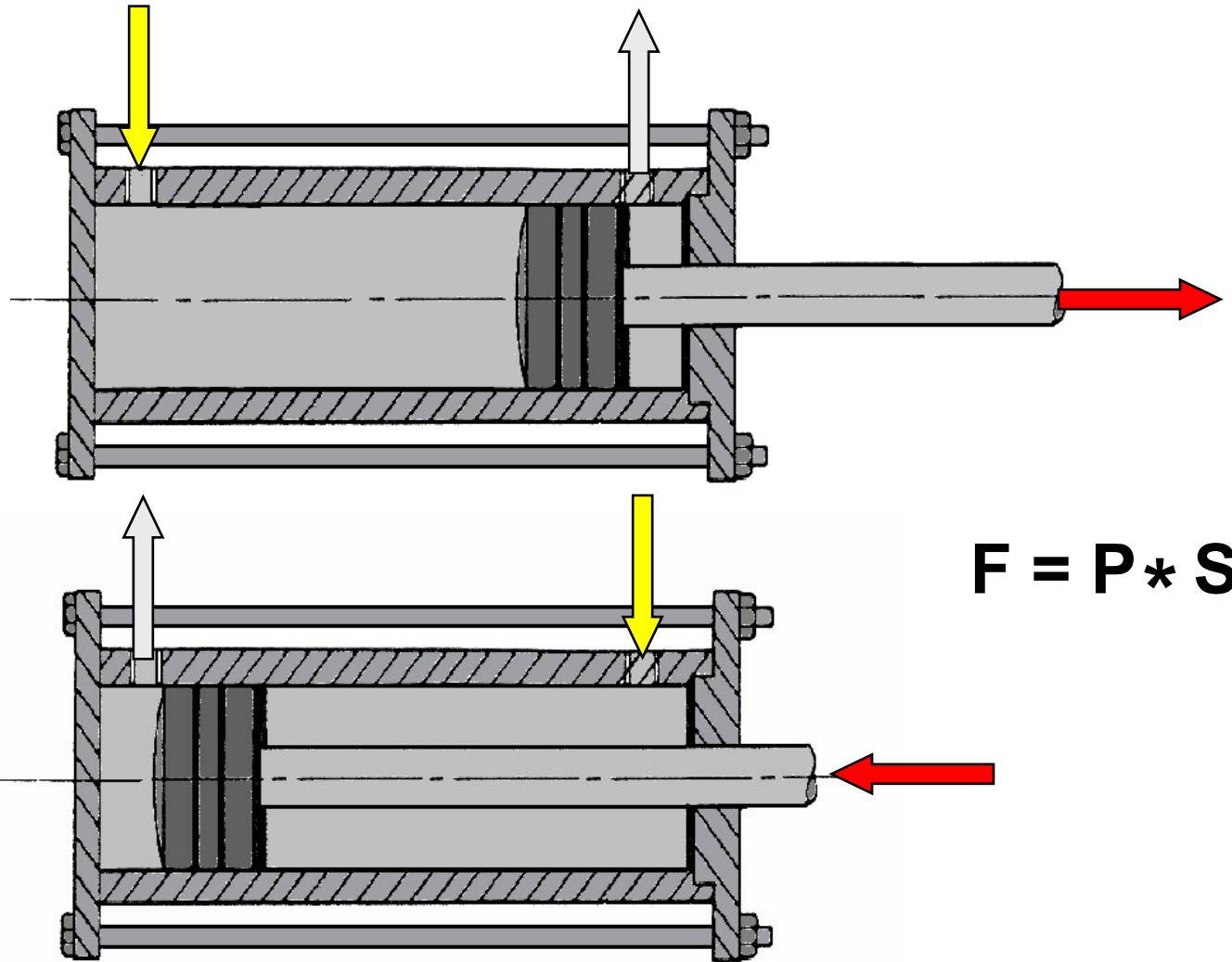
## 3 – Elemente de acționare electrice

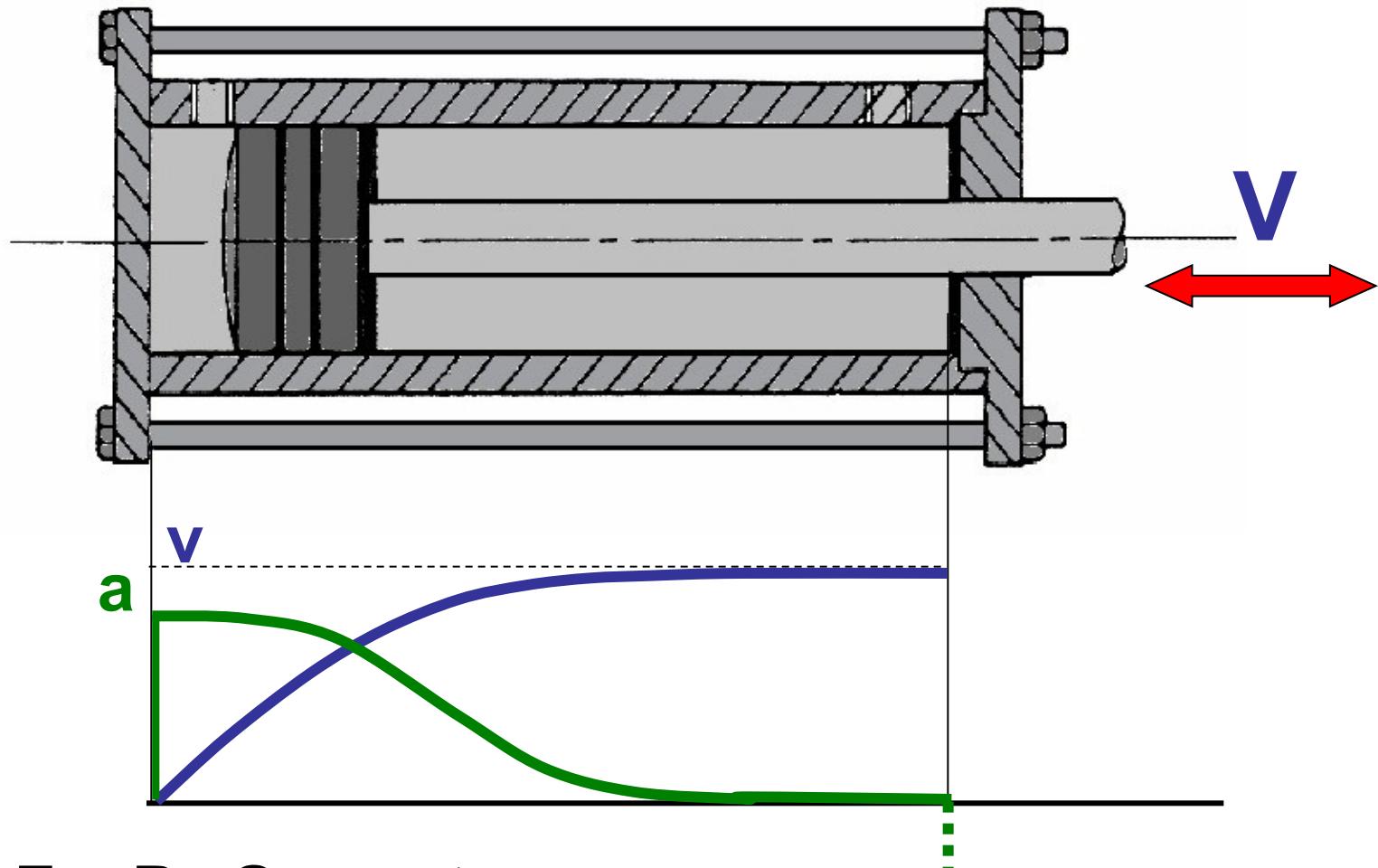
Motoare de cc

Motoare de ca

Motoare pas cu pas

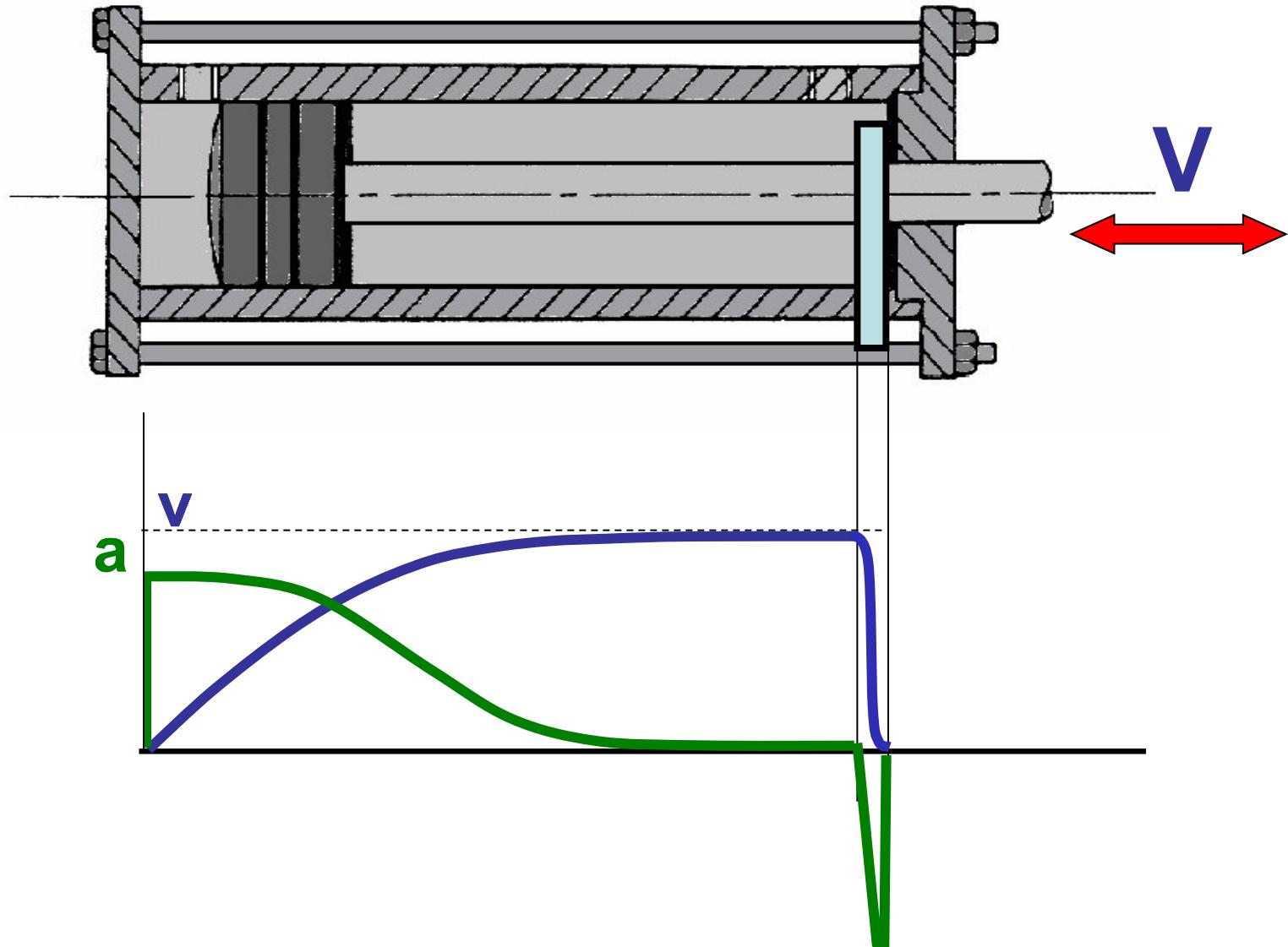
# 1 – Element de actionare pneumatic (cilindric) Cilindrii cu dublu efect



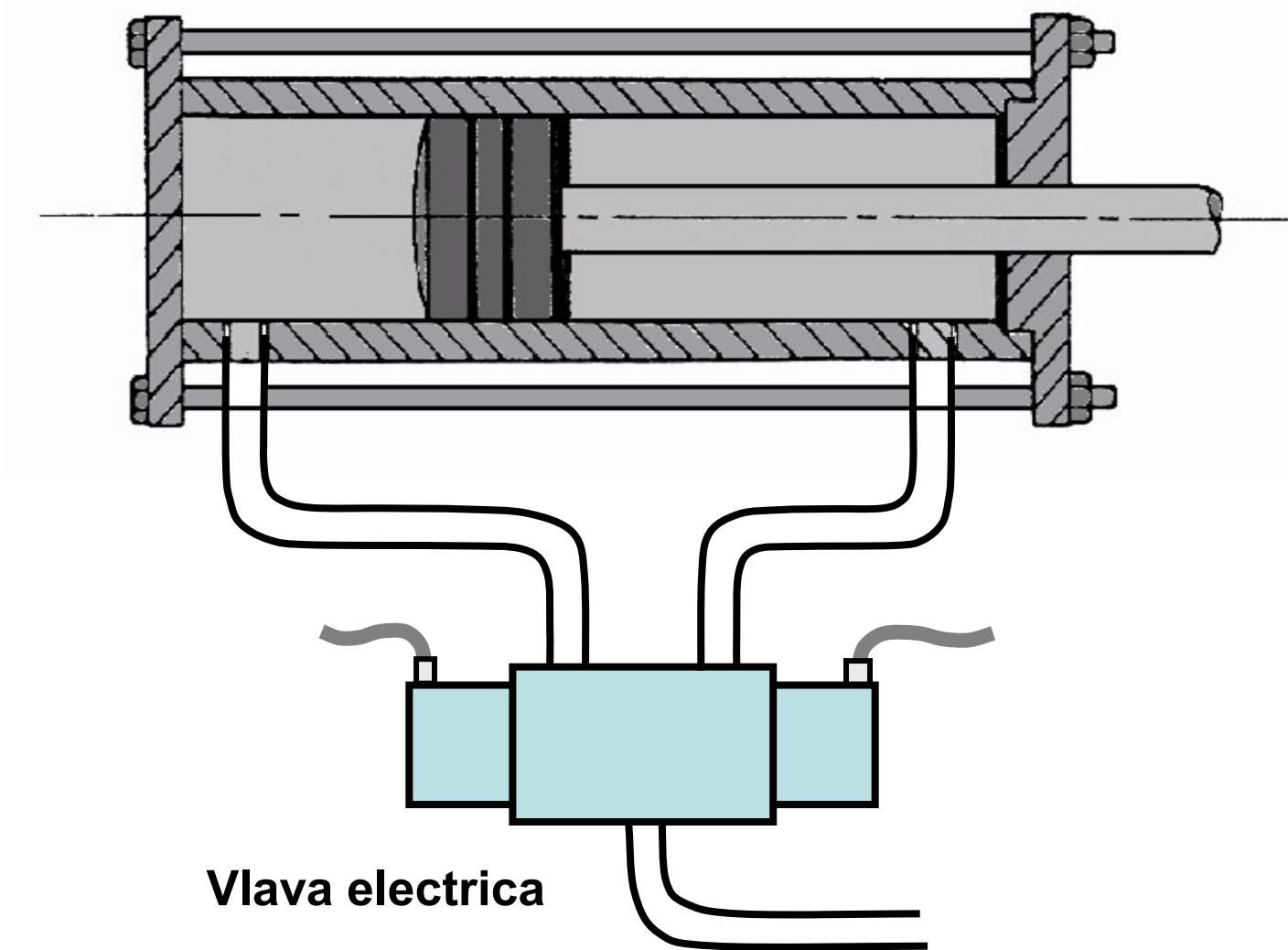


$$\left. \begin{array}{l} F = P * S \\ F - F_f = M * a \\ F_f = k * v^2 \end{array} \right\} \Rightarrow a = \frac{P * S - k * v^2}{M}$$

Viteza nu este controlabila. Viteza maxima in cilindru este atinsa cand forta de frecare ( $k v^2$ ) egaleaza forta ce produce avansul ( $F = P.S$ ), si deci  $a = 0$ .

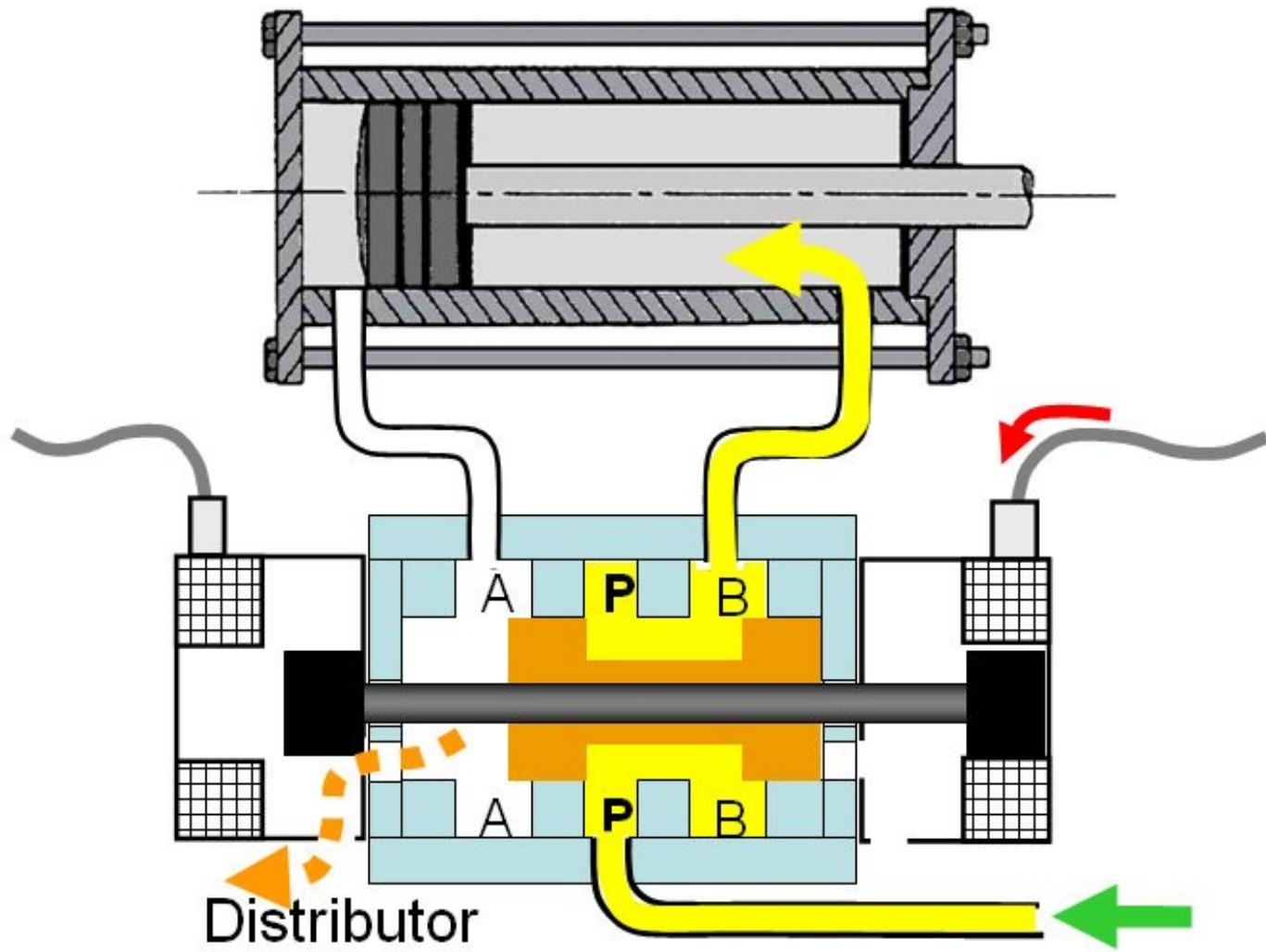


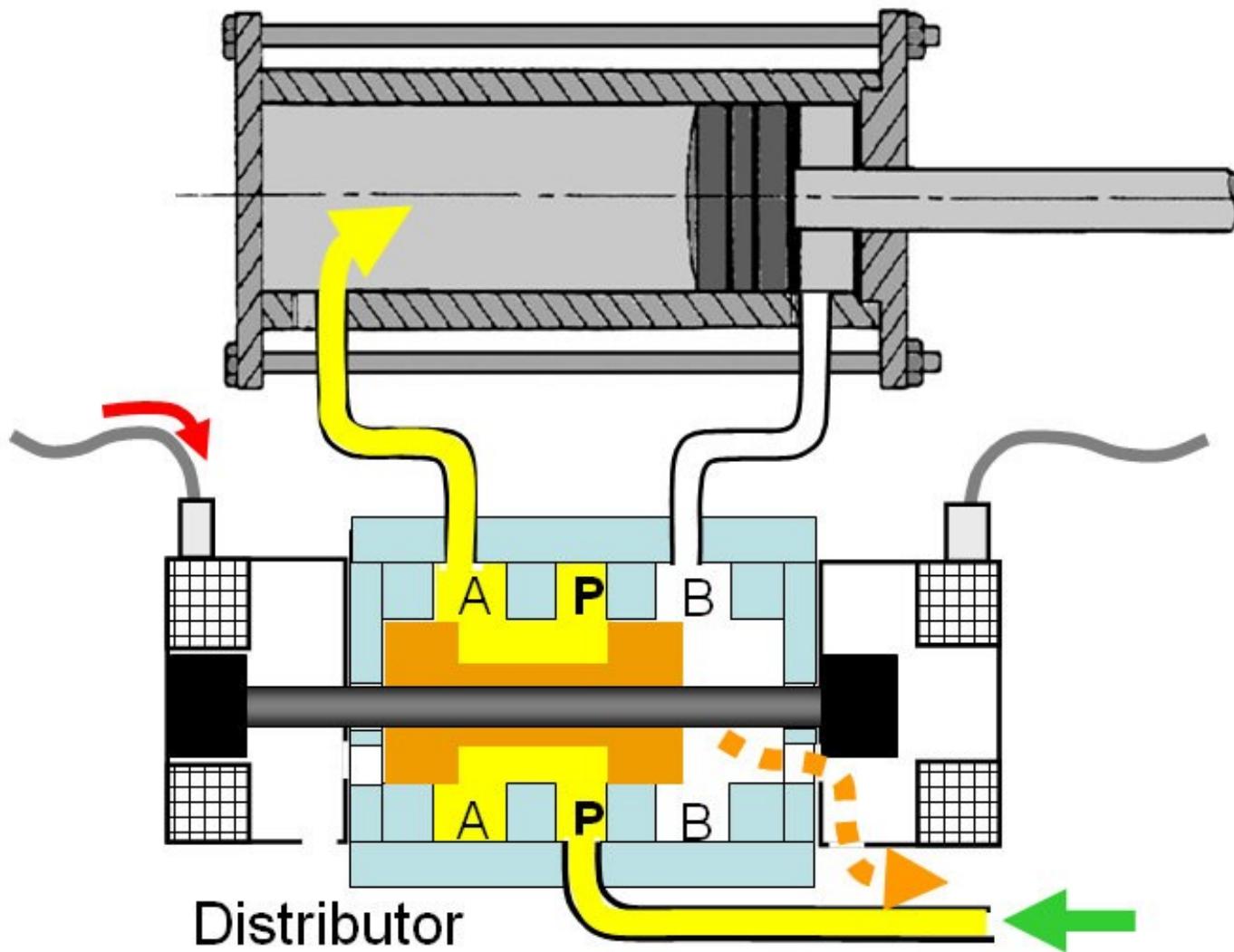
- Impactul produs când se atinge capătul cursei este redus utilizând un absorbant de soc.

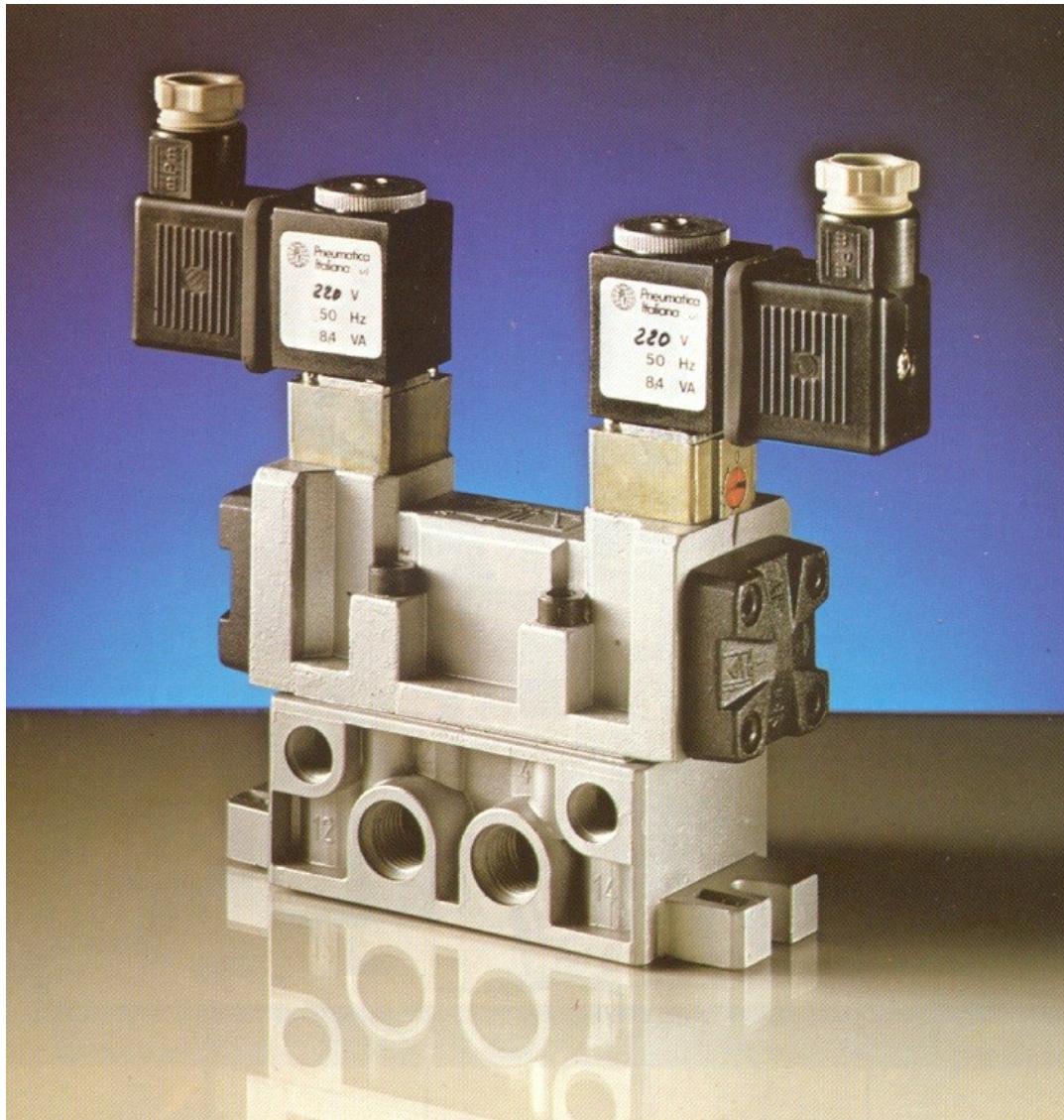


**Valva electrica**

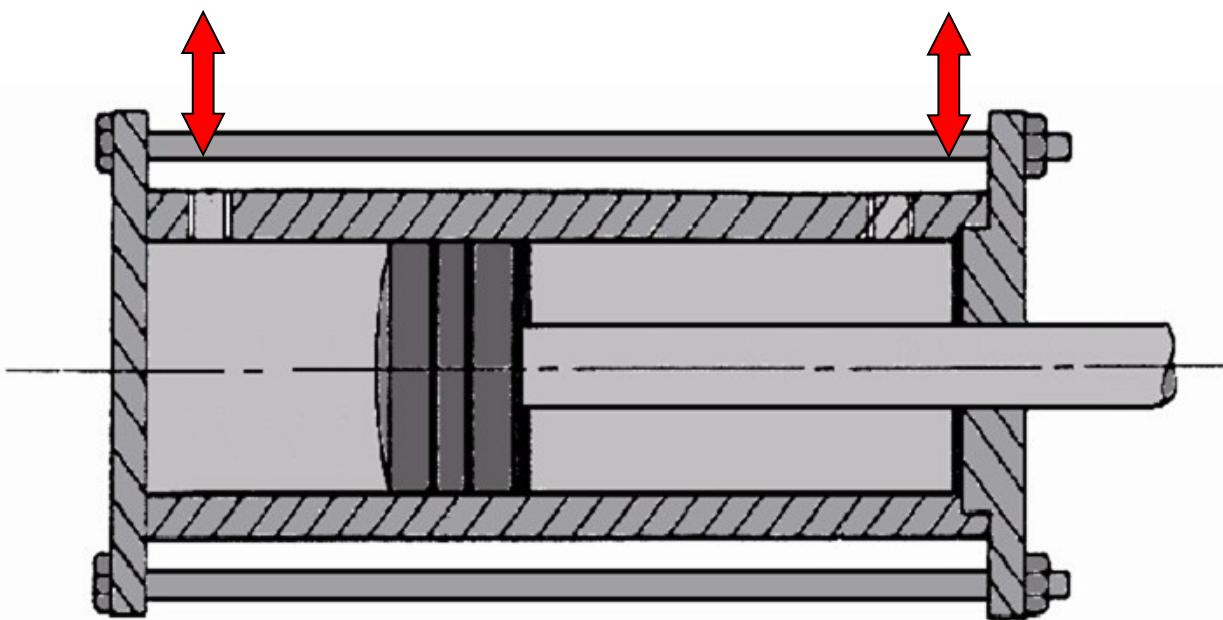
- Valva electrica: interfață hidraulic-electric



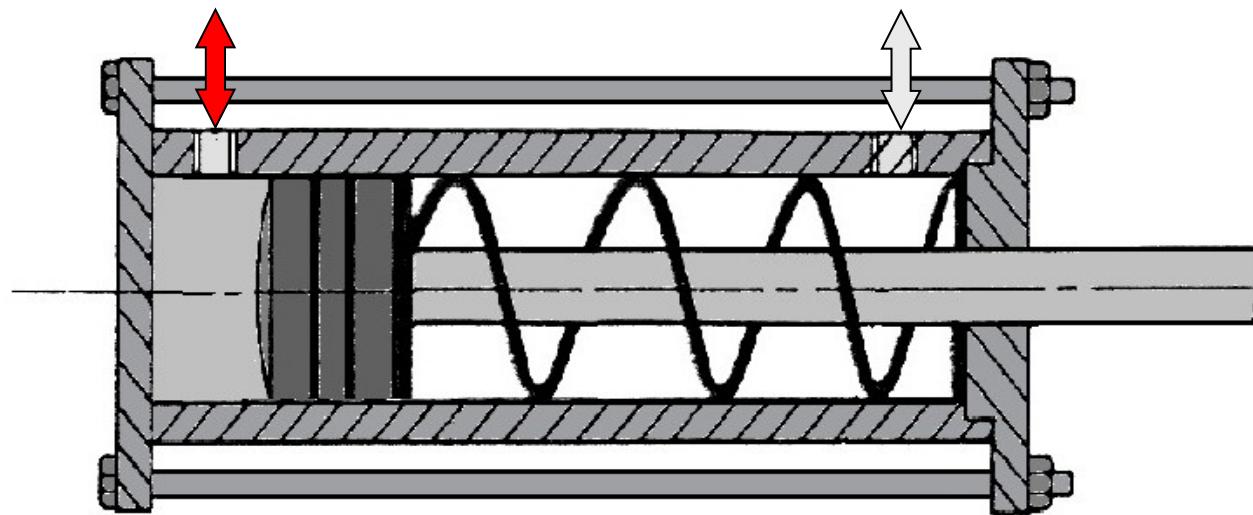




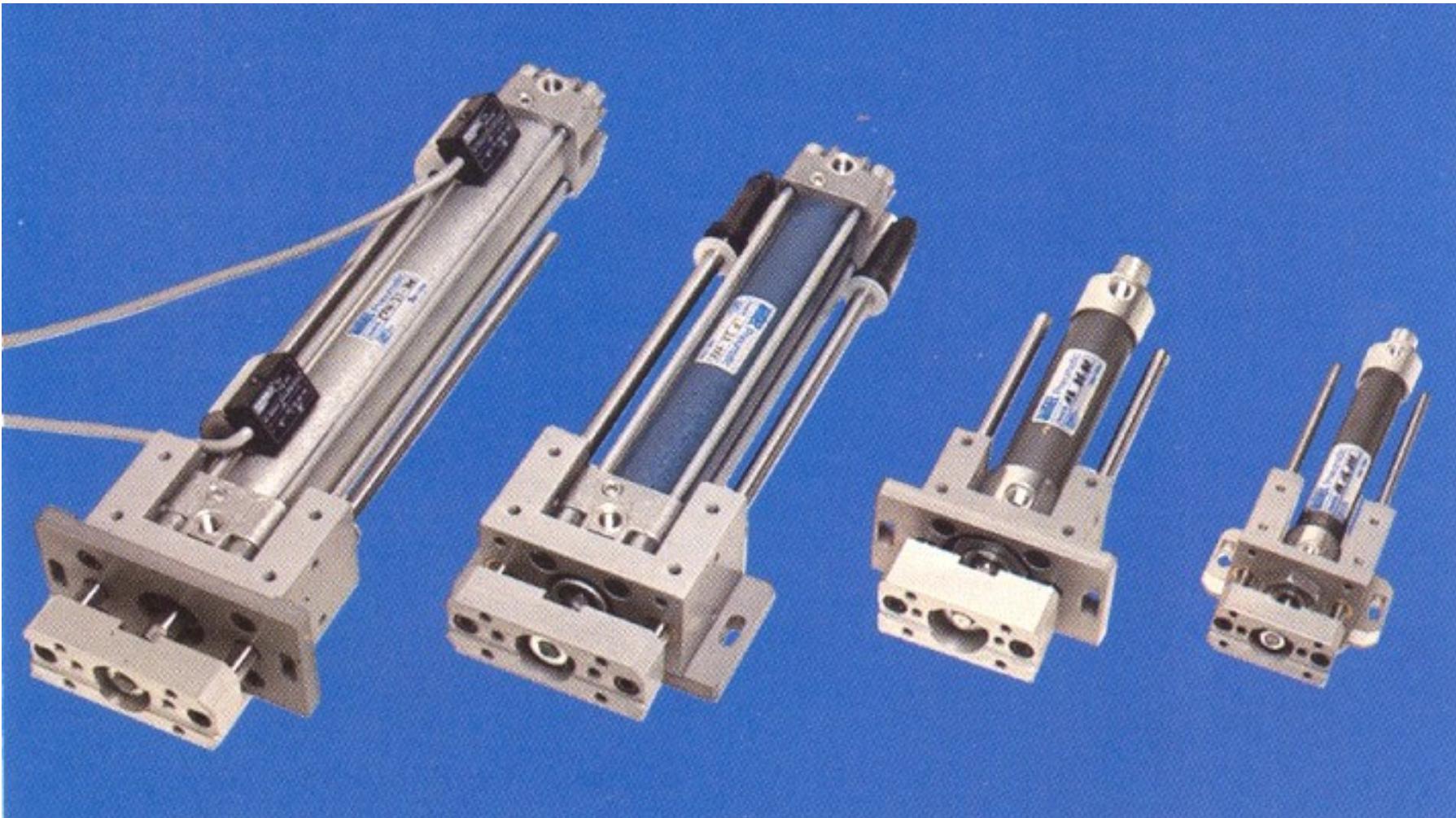
# Distribuidor



Cilindru cu dublu efect

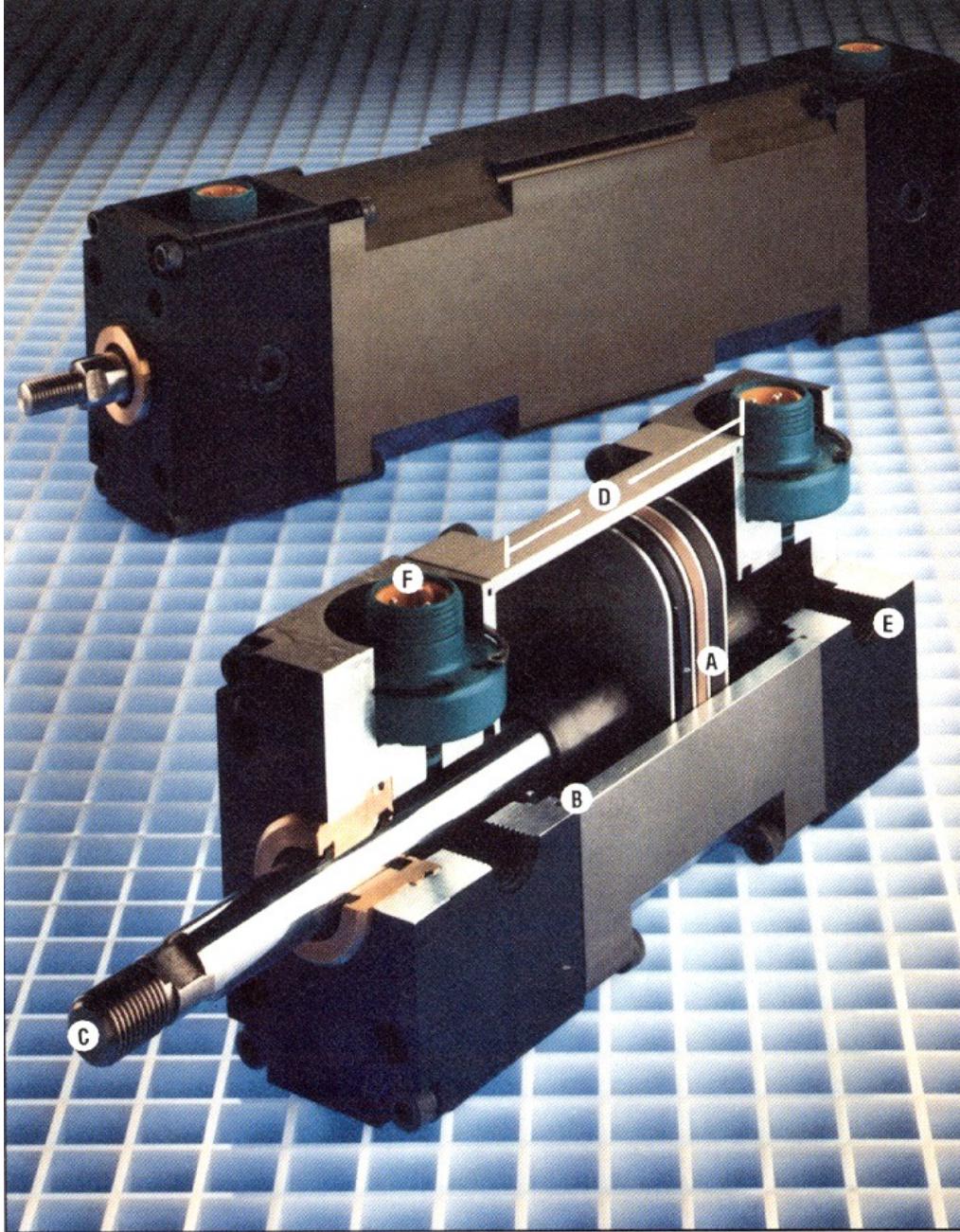


Cilindru cu simplu efect

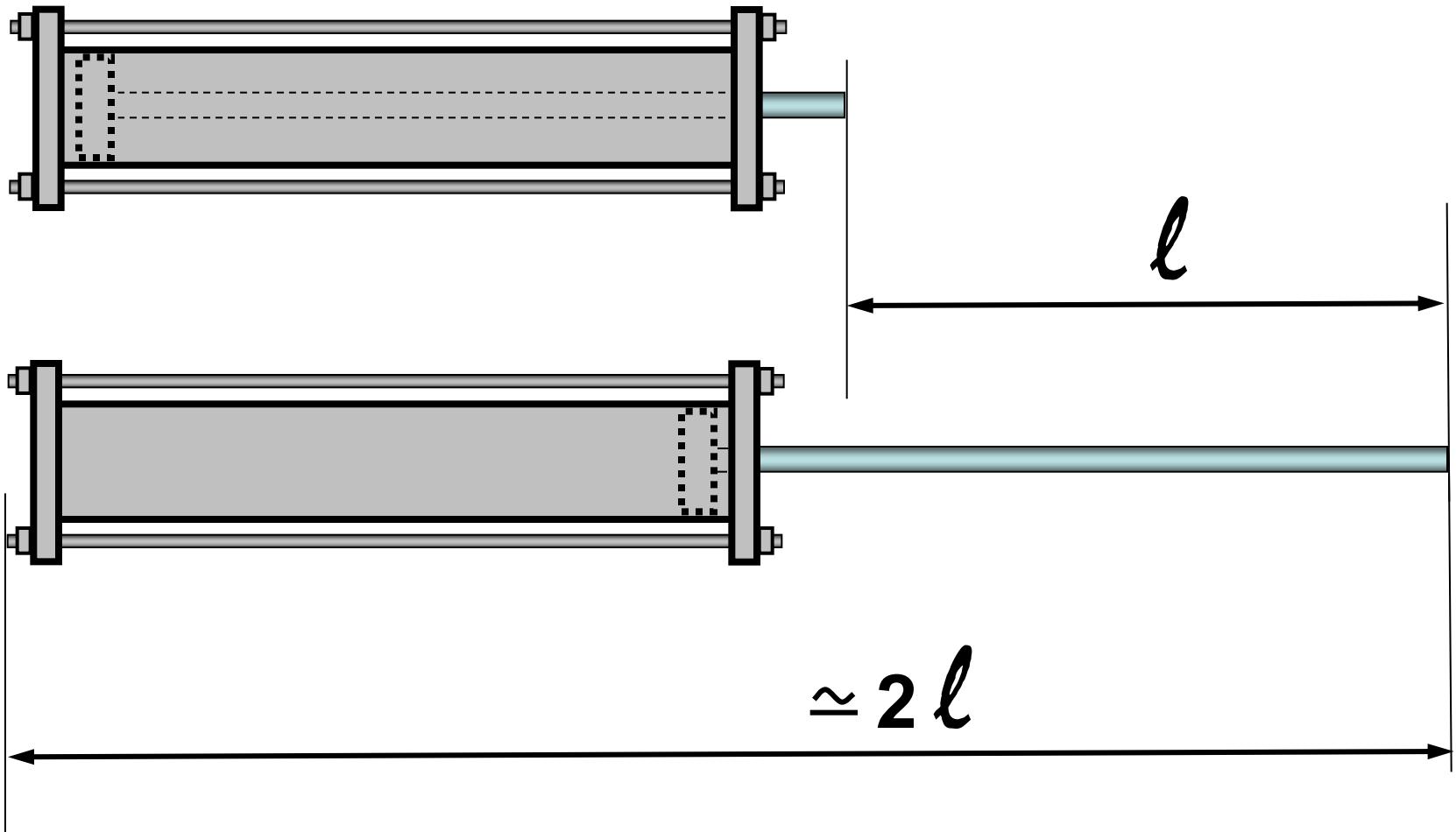


Exemplu de cilindri pneumatici comerciali

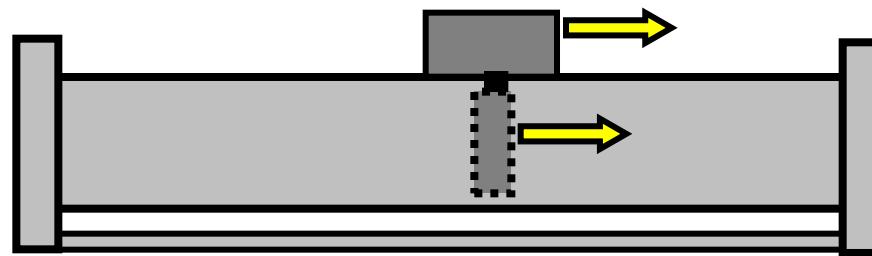
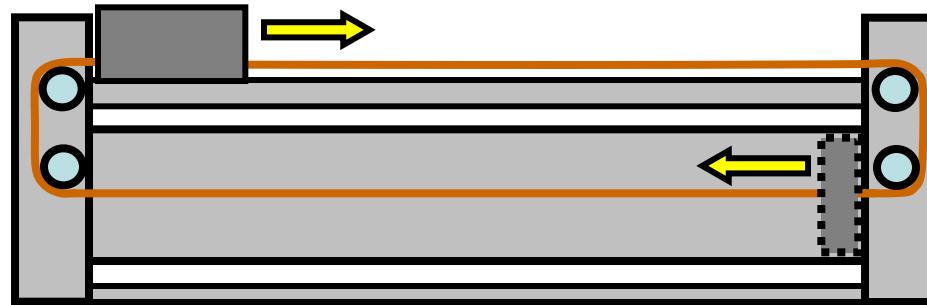
(Ghidaje laterale pentru a preveni rotirea axială)



Pistoane ovale pentru a preveni rotirea axei evitând necesitatea ghidurilor auxiliare



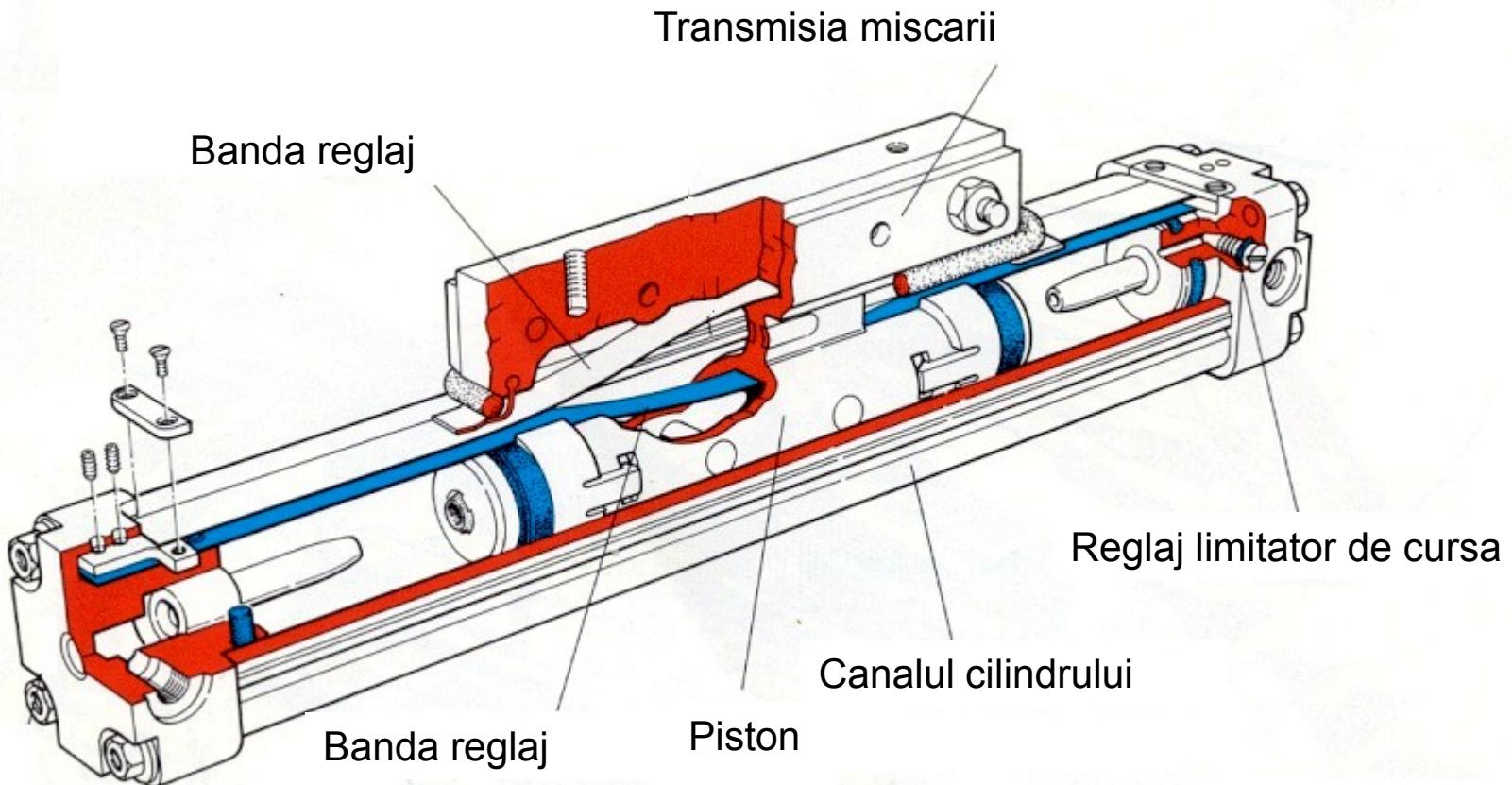
Dezavantaje clasice ale cilindrilor: o deplasare a lungimii  $\ell$  necesită o lungime suplimentară  $\ell$ .



$$\Delta l \approx l$$

A horizontal double-headed arrow below the equation indicates the stroke length of the actuator.

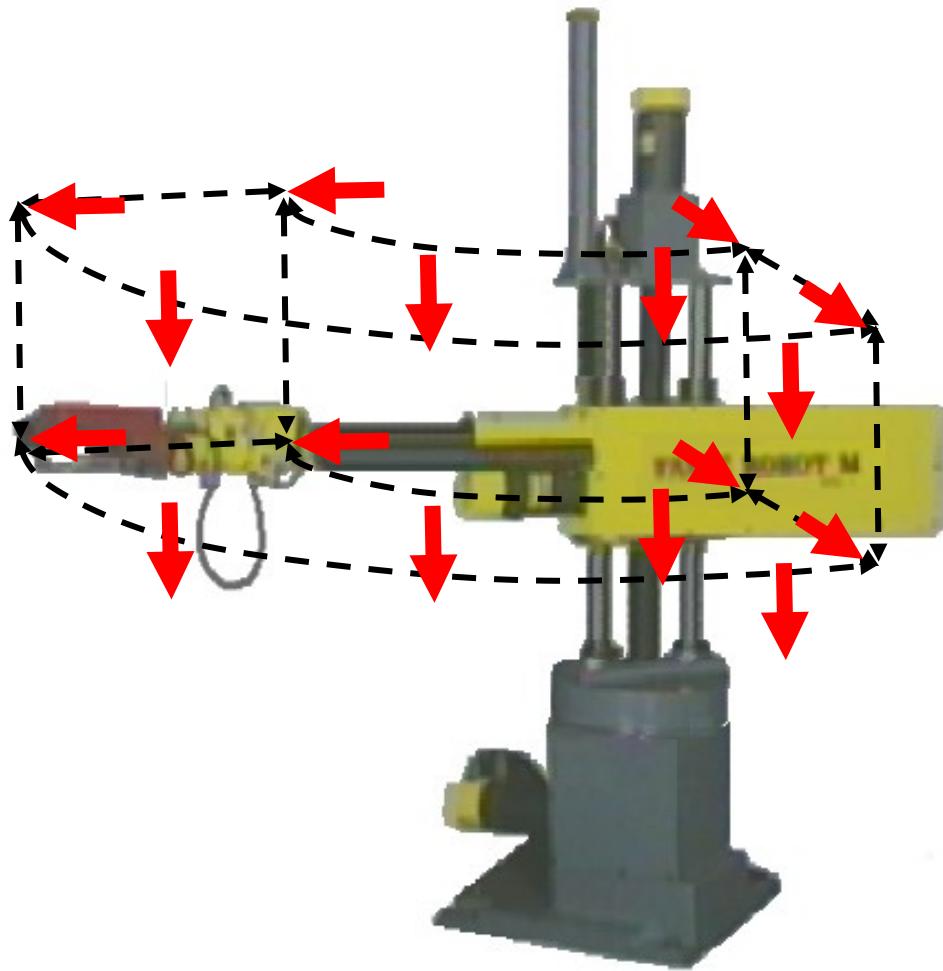
Solutie pentru reducerea spatiului ocupat





# Elemente de actionare pneumatice (cilindrii)

- Economice
- Fiabil (de incredere)
- Viteza de operare ridicata
- Operare cu forță constantă
- Rezistentă la suprasarcini
- Fara controlul vitezei
- Viteză de poziționare redusă
- Operare zgomotoasă



Exemplu de manipulator pneumatic si starile lui mecanice (pozitiile finale ale cilindrilor)

# **Elemente de acționare**

1 – elemente de acționare pneumatice

Cilindrii

Motoare

2 – elemente de acționare hidraulice

Cilindrii

Motoare

3 – elemente de acționare electrice

Motoare de cc

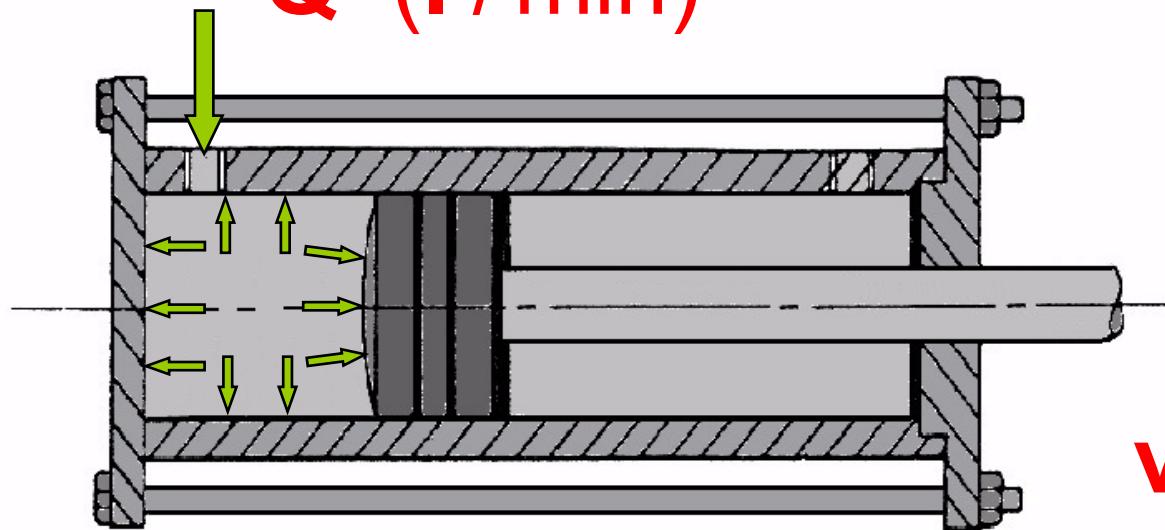
Motoare de ca

Motoare pas cu pas

## 2 – Element de actionare hidraulic (cilindru)

$\Delta v$  (cm<sup>3</sup>)

$Q$  (l/min)

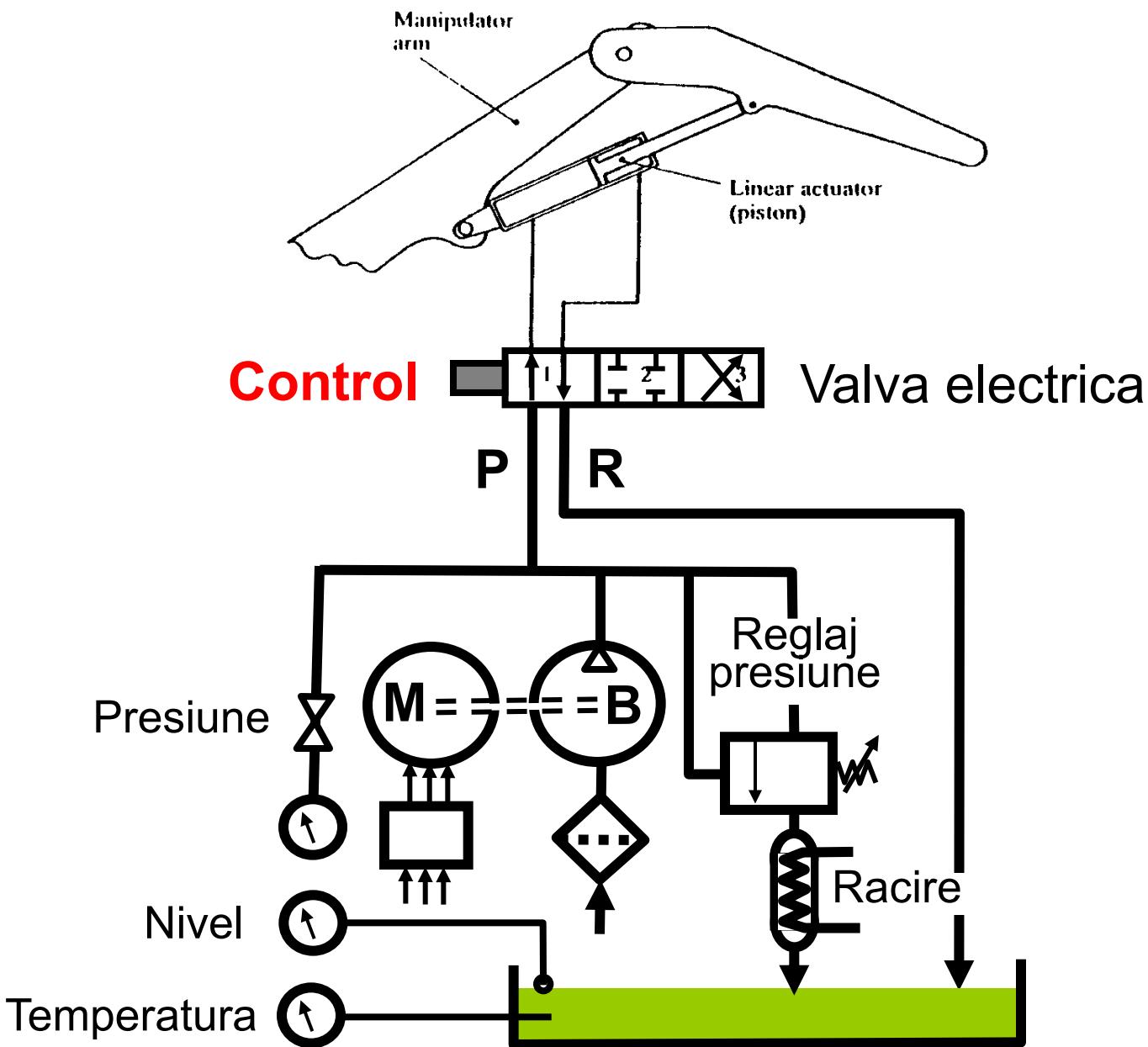


$\Delta l$   
(cm)  
 $v$  (cm/seg.)

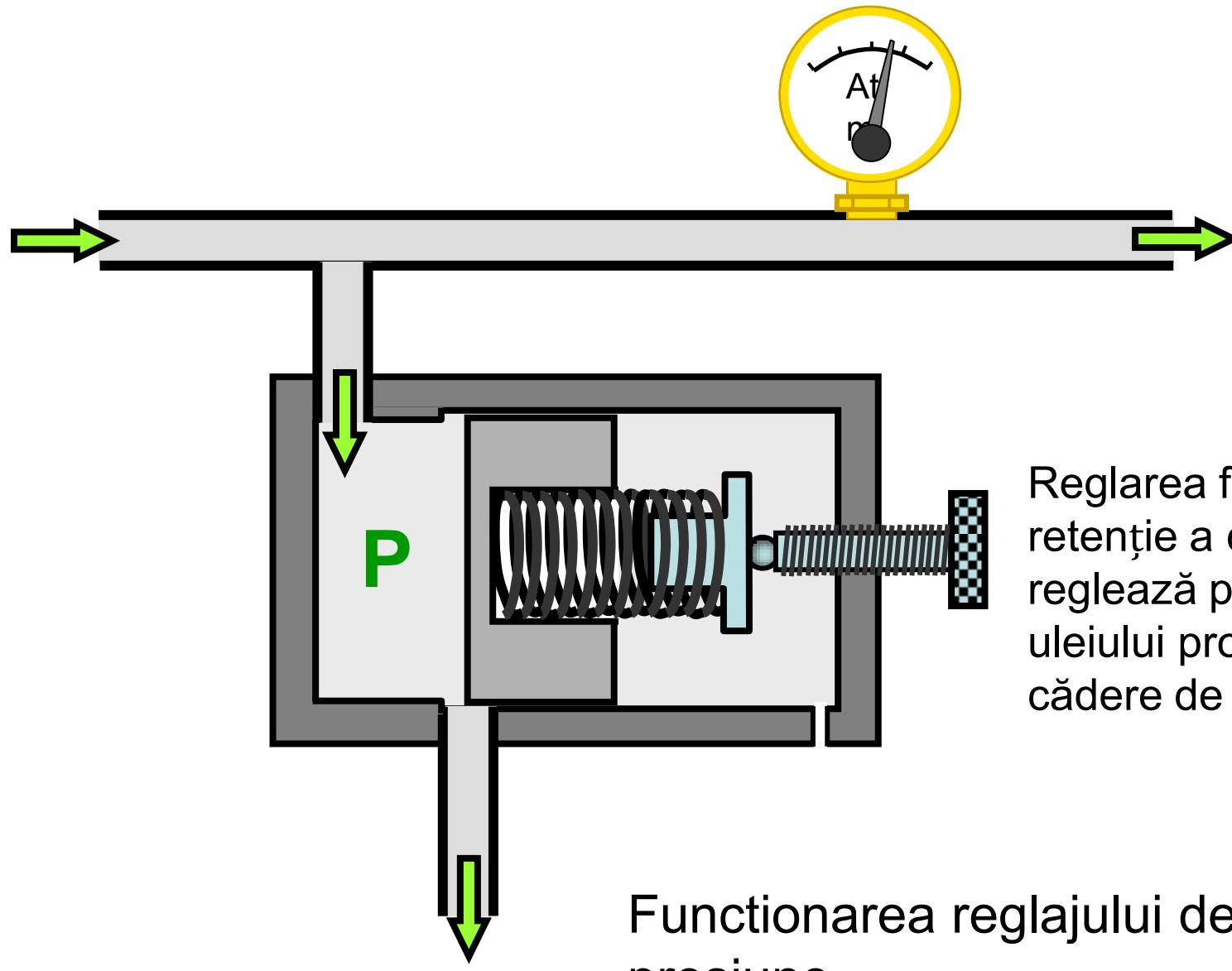
Sursa de energie: ulei presurizat intre 20 si 300 bari.

$$F = P * S \text{ Daca } P \uparrow\uparrow \rightarrow F \rightarrow \infty$$

- Control asupra pozitiei
- Control asupra vitezei

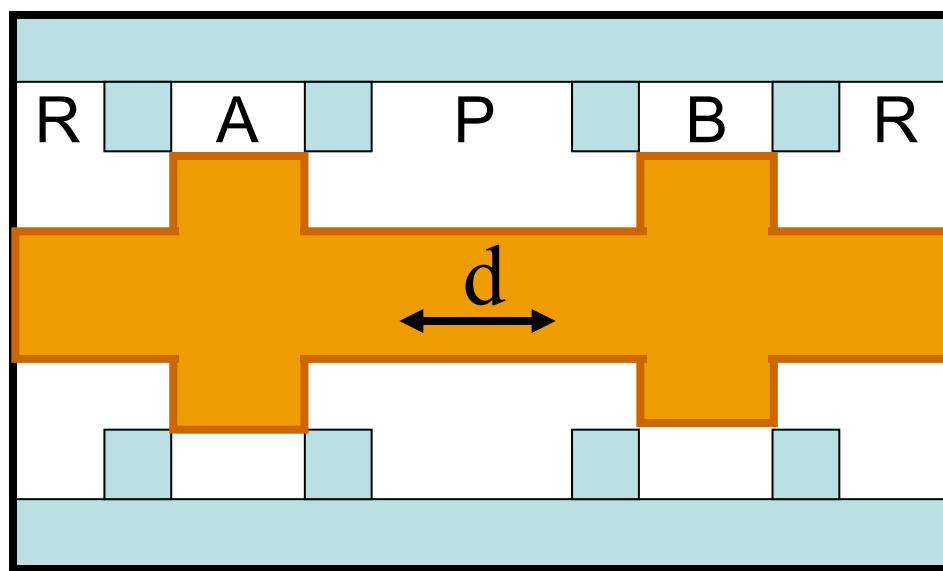
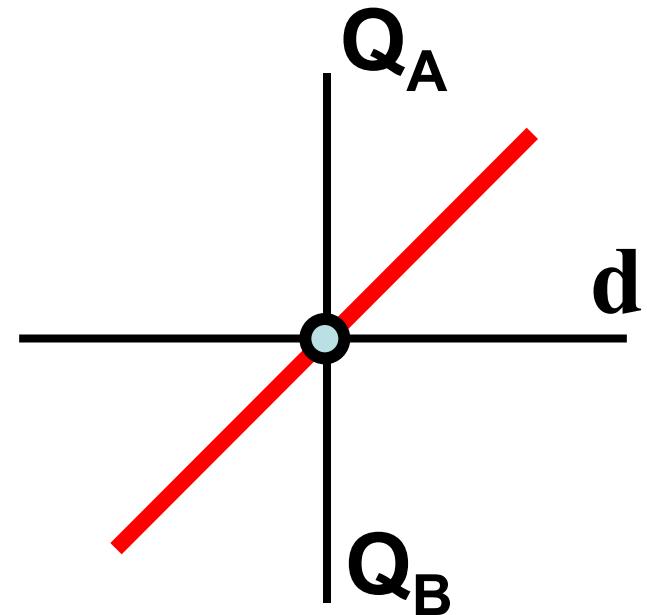
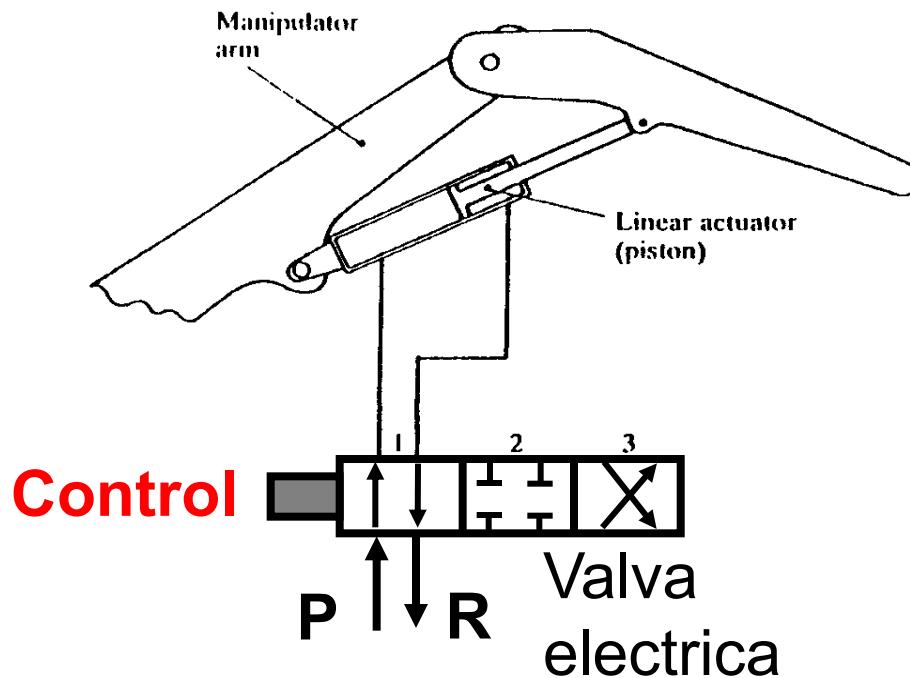


Elementele esențiale ale circuitului hidraulic

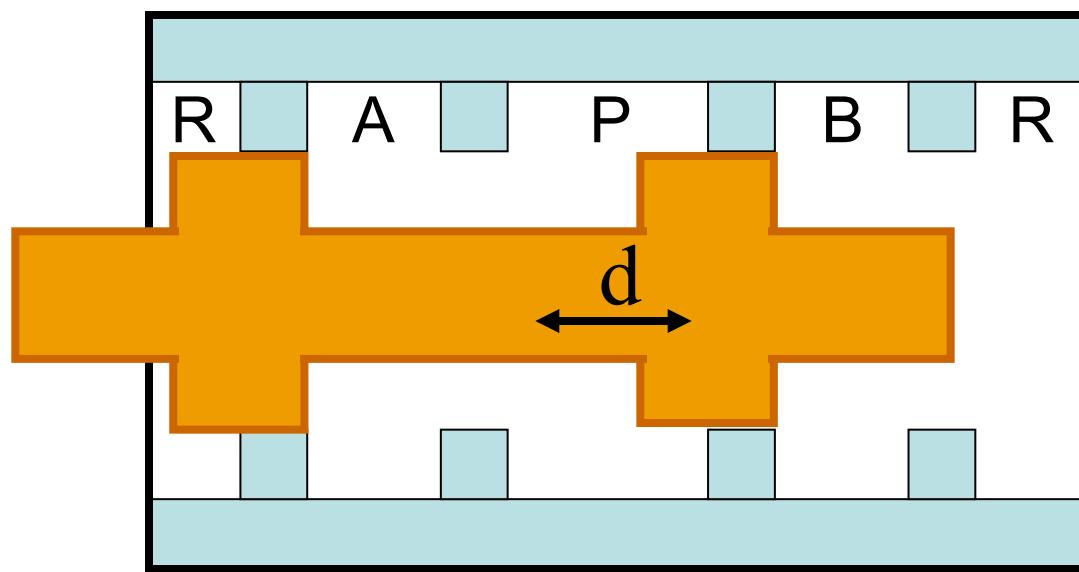
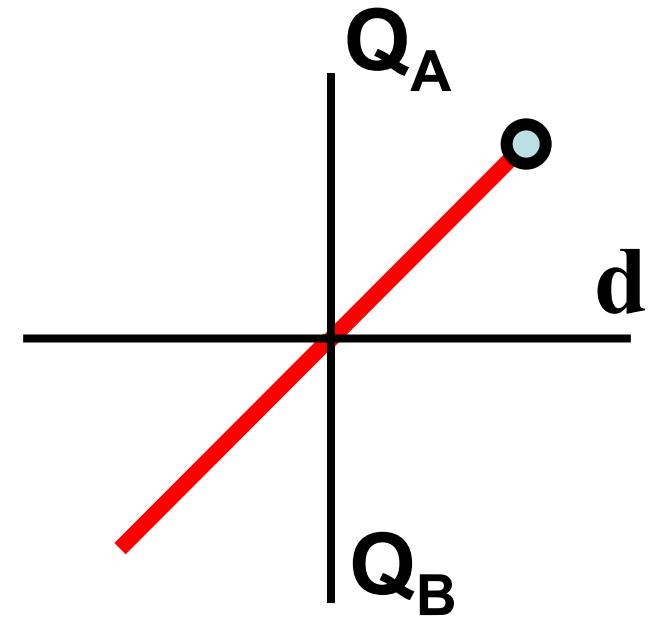
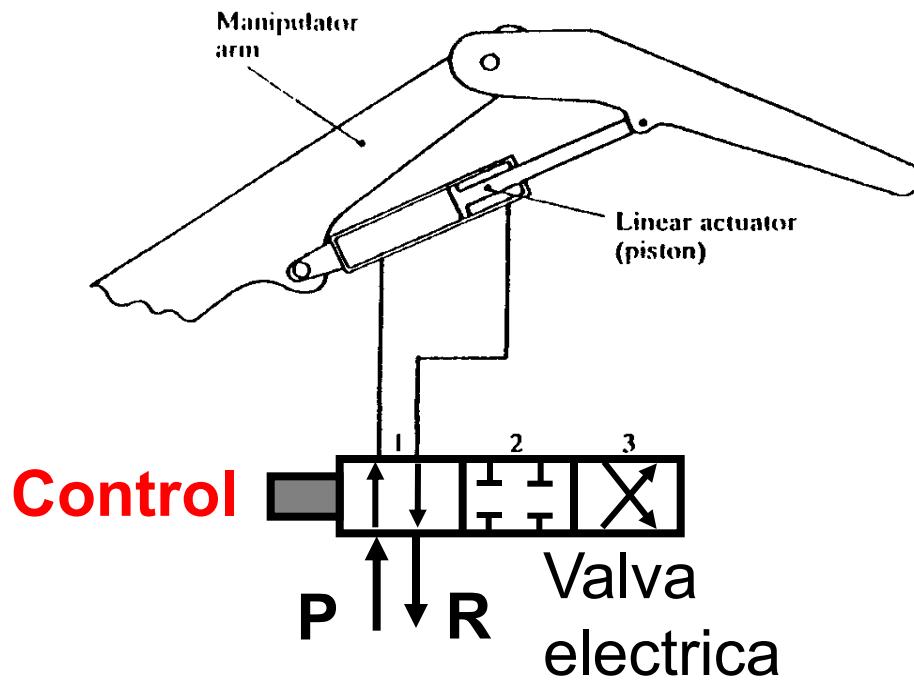


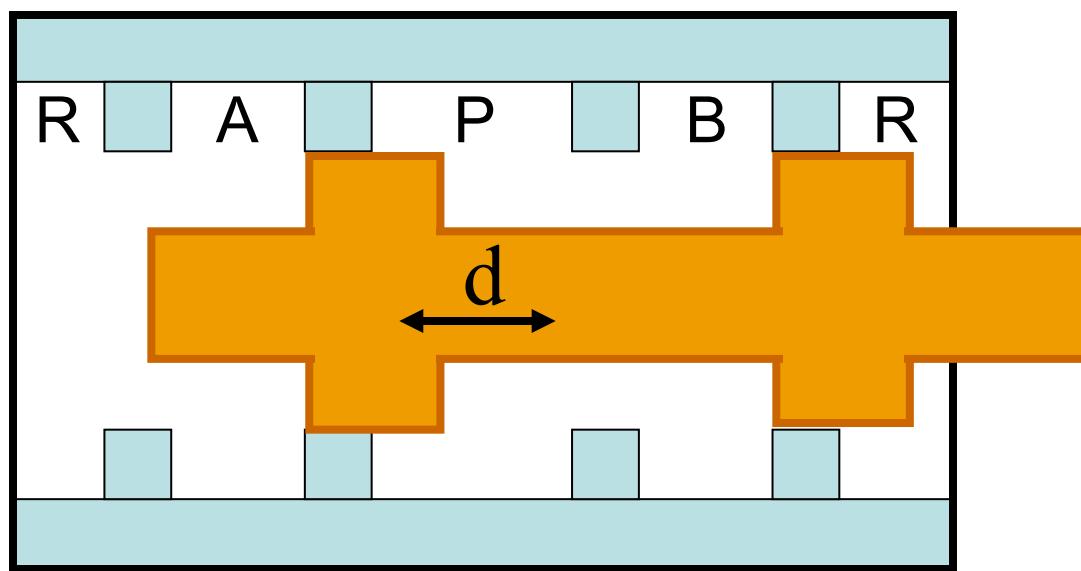
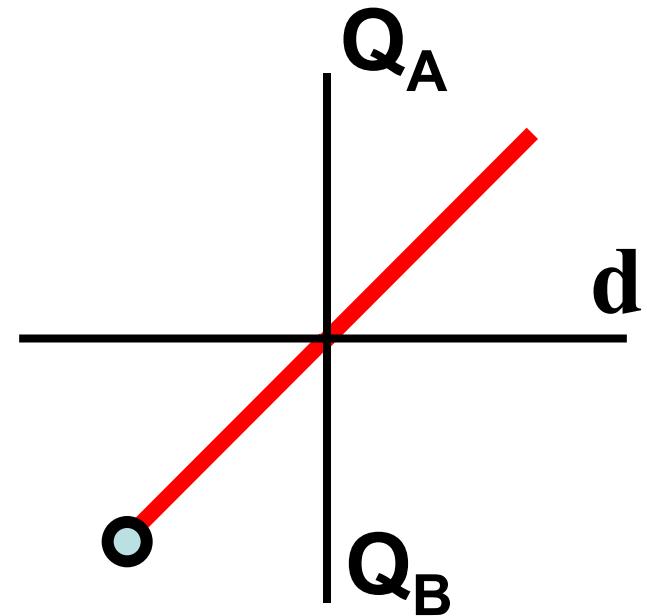
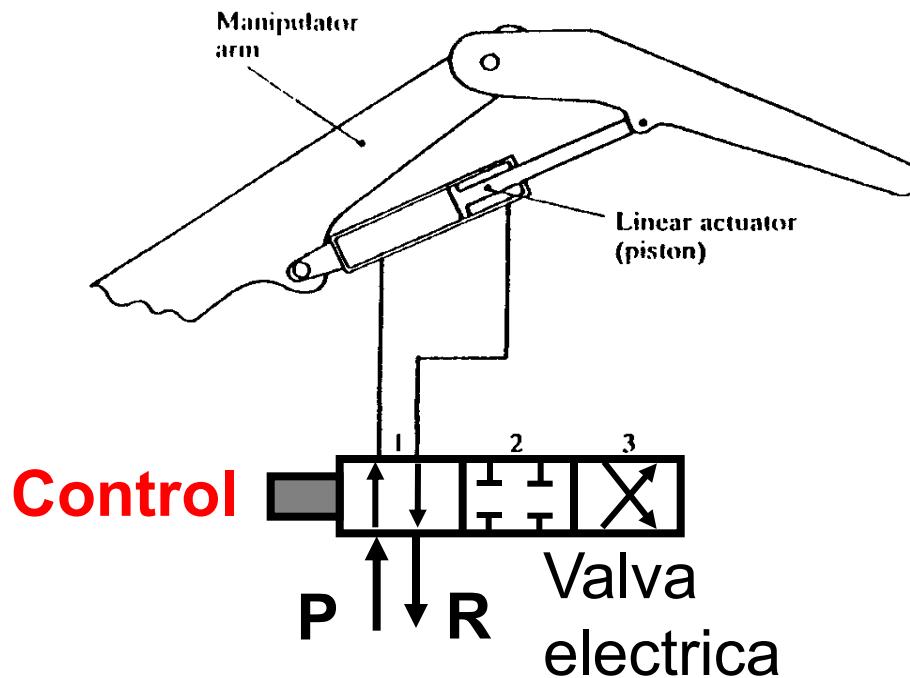
Reglarea forței de retenție a cilindrilor reglează presiunea uleiului producând o cădere de presiune.

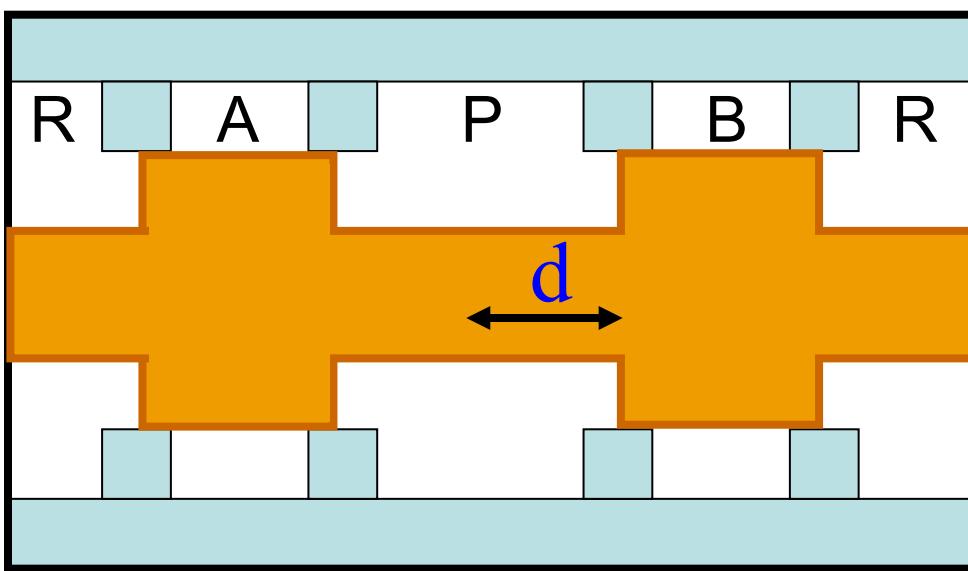
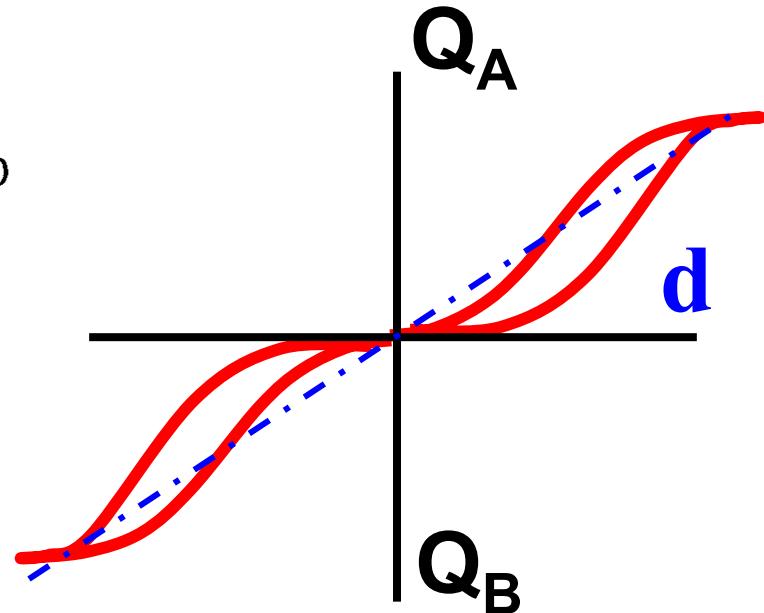
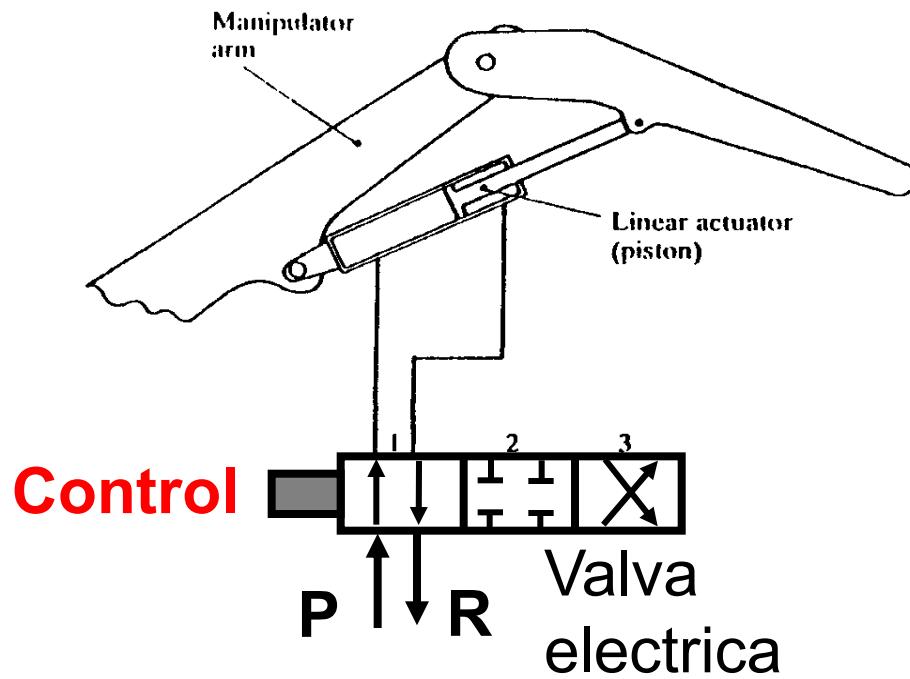
Functionarea reglajului de presiune



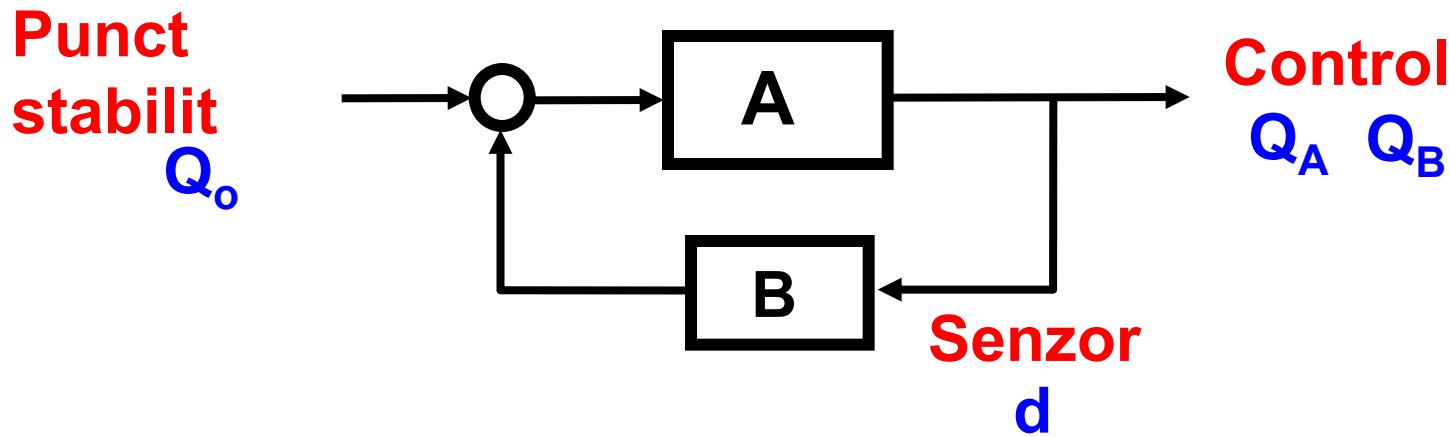
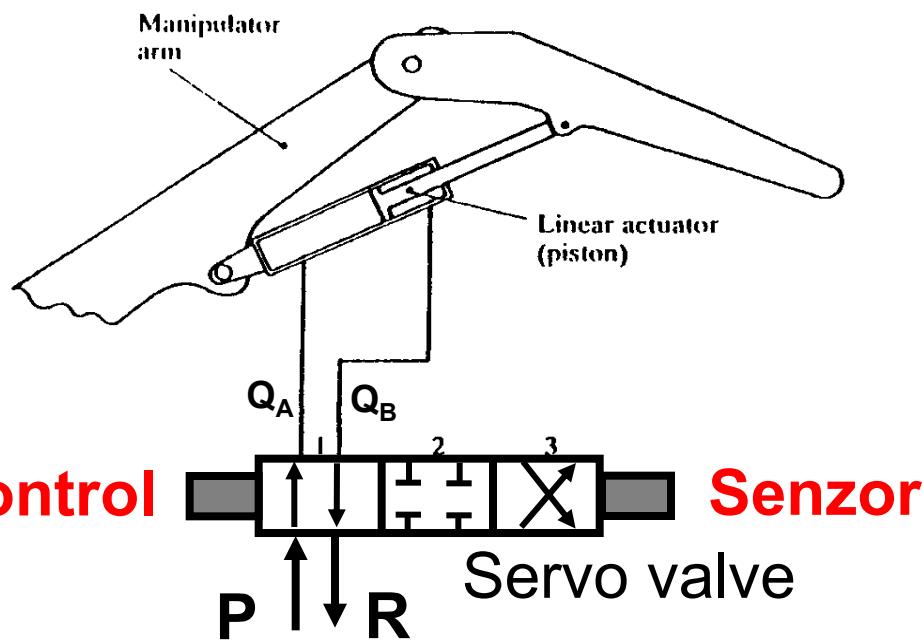
Caracteristica ideală







Caracteristica reala



**Utilizarea unui senzor de poziție  $d$  face posibilă controlul unui servo de poziție și, astfel, histerezisul este redus la minim. Zona moartă este de asemenea minimizată.**

# ACTUATORS

1 – Pneumatic actuators

Cylinders

Motors

2 – Hydraulic actuators

Cylinders

Motors

3 – Electrical actuators

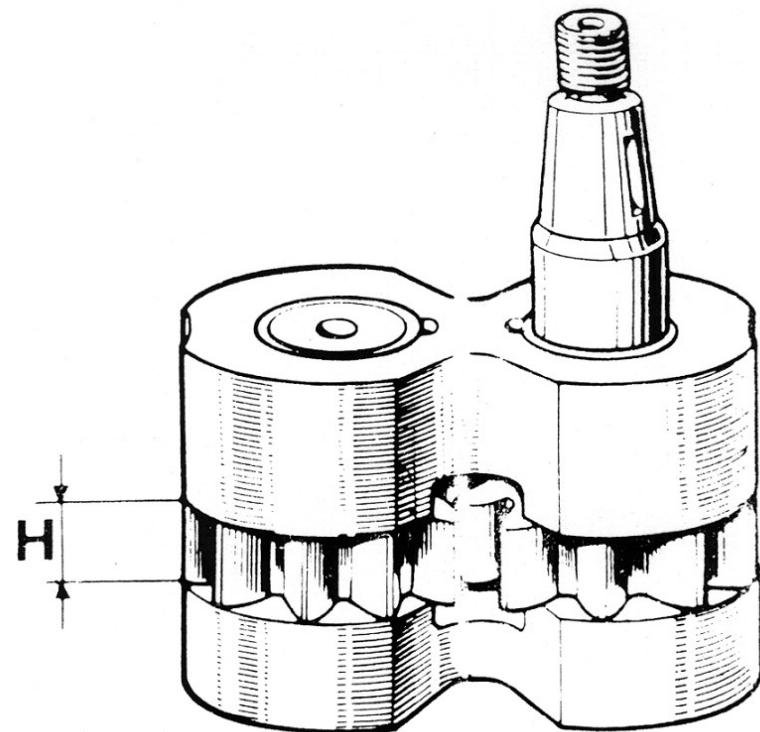
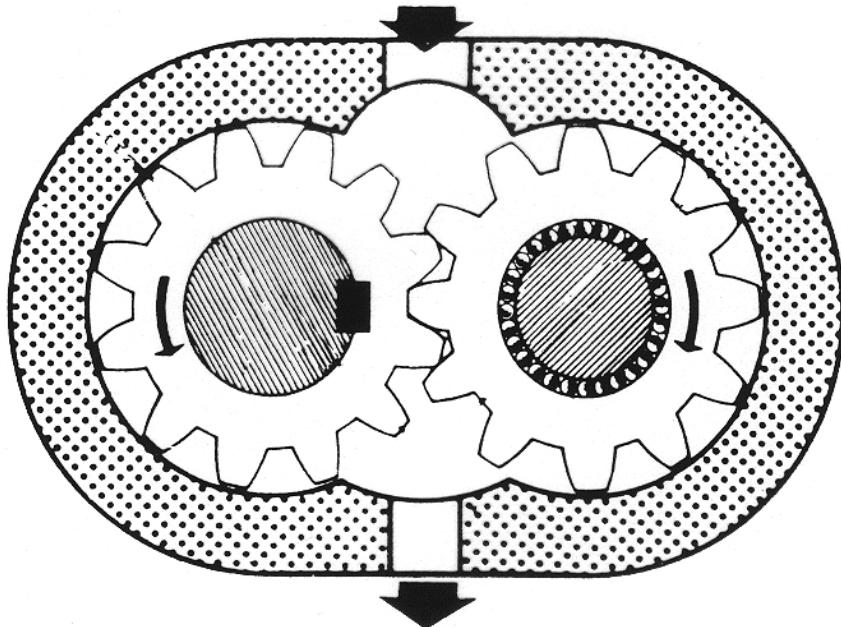
Dc motors.

Ac motors

Steeper motors.

# Pompe-motoare hidraulice

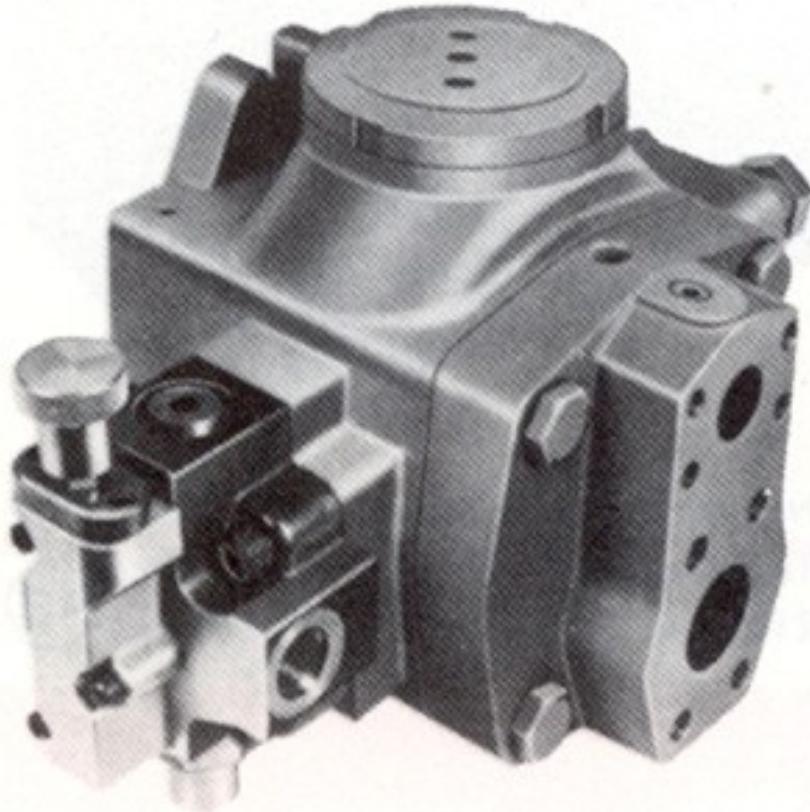
( tipuri)



Fix caudal

# **Pompe-motoare hidraulice**

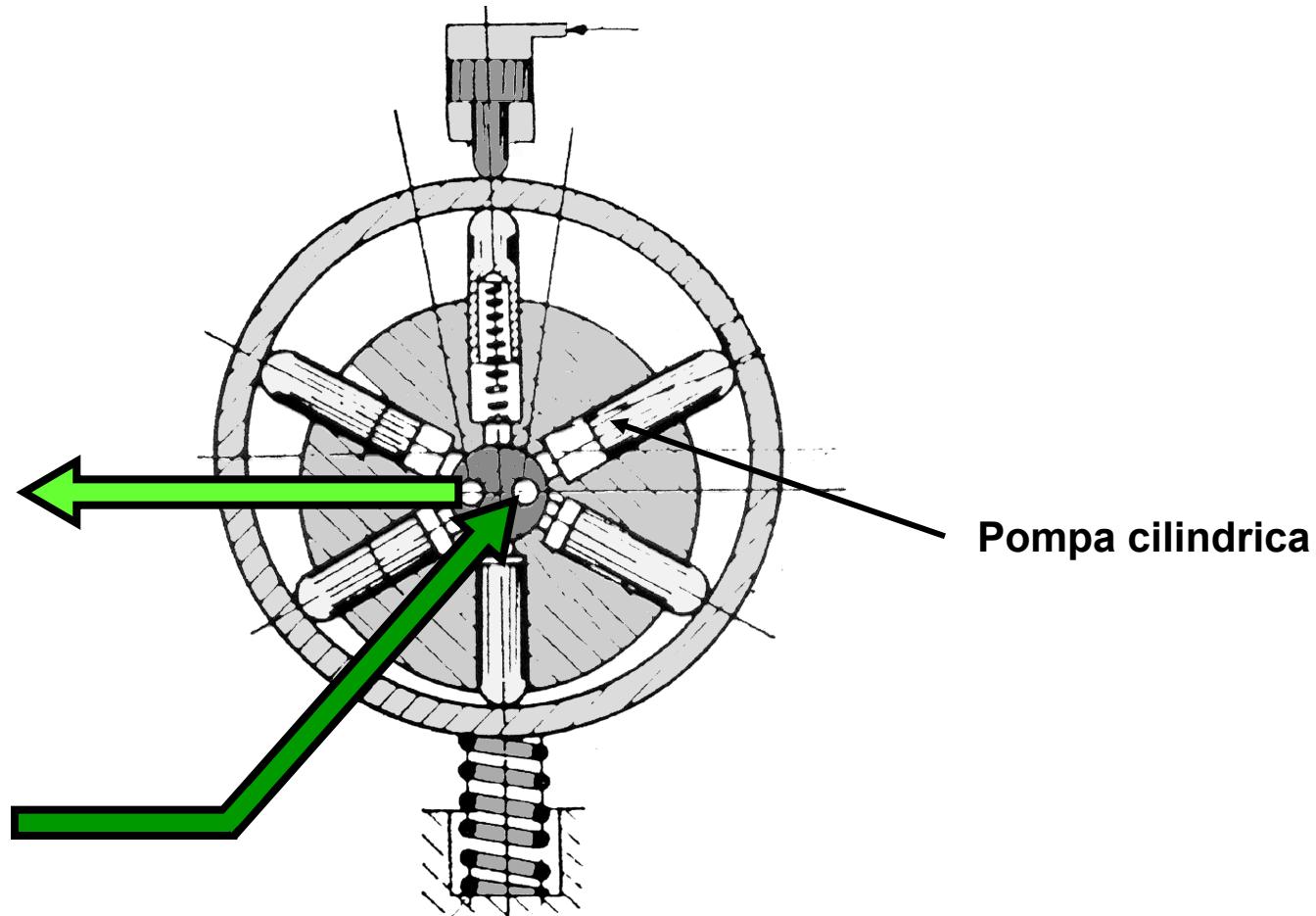
**( tipuri)**



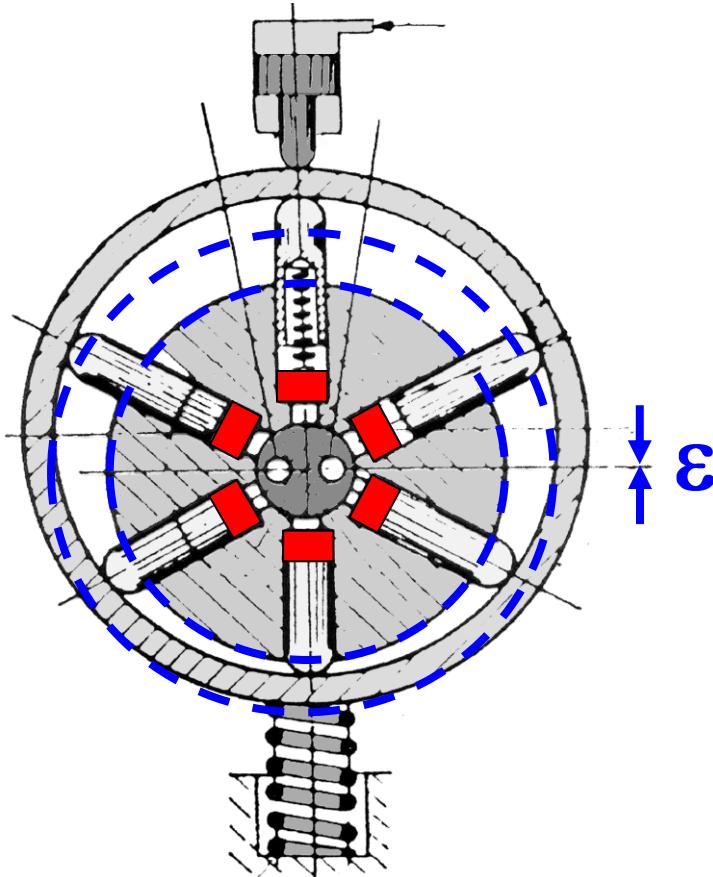
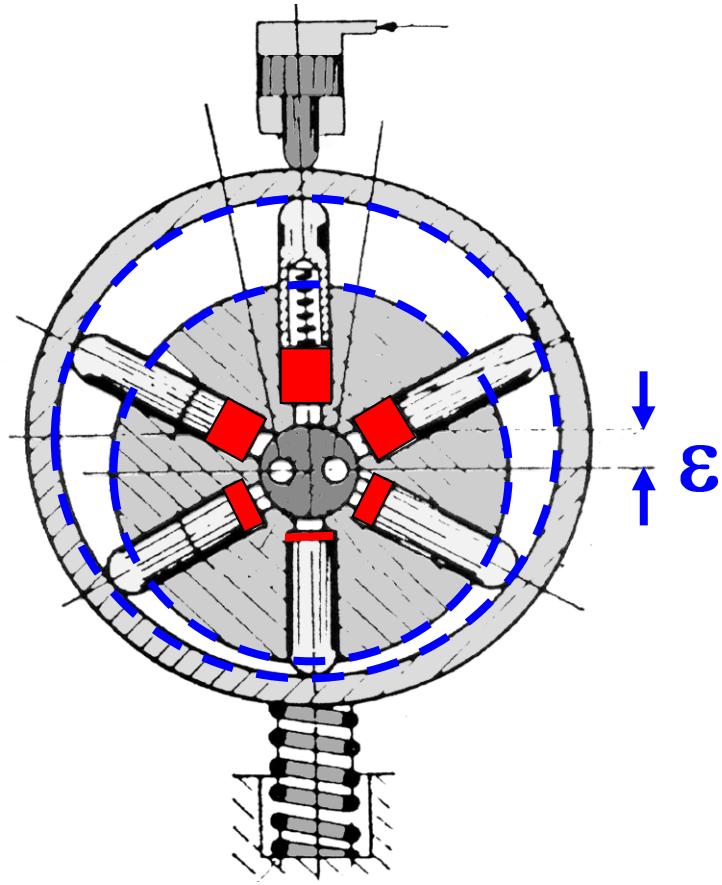
**Caudala fixa**

# **Pompa hidraulica**

( model cu pistoane radiale)



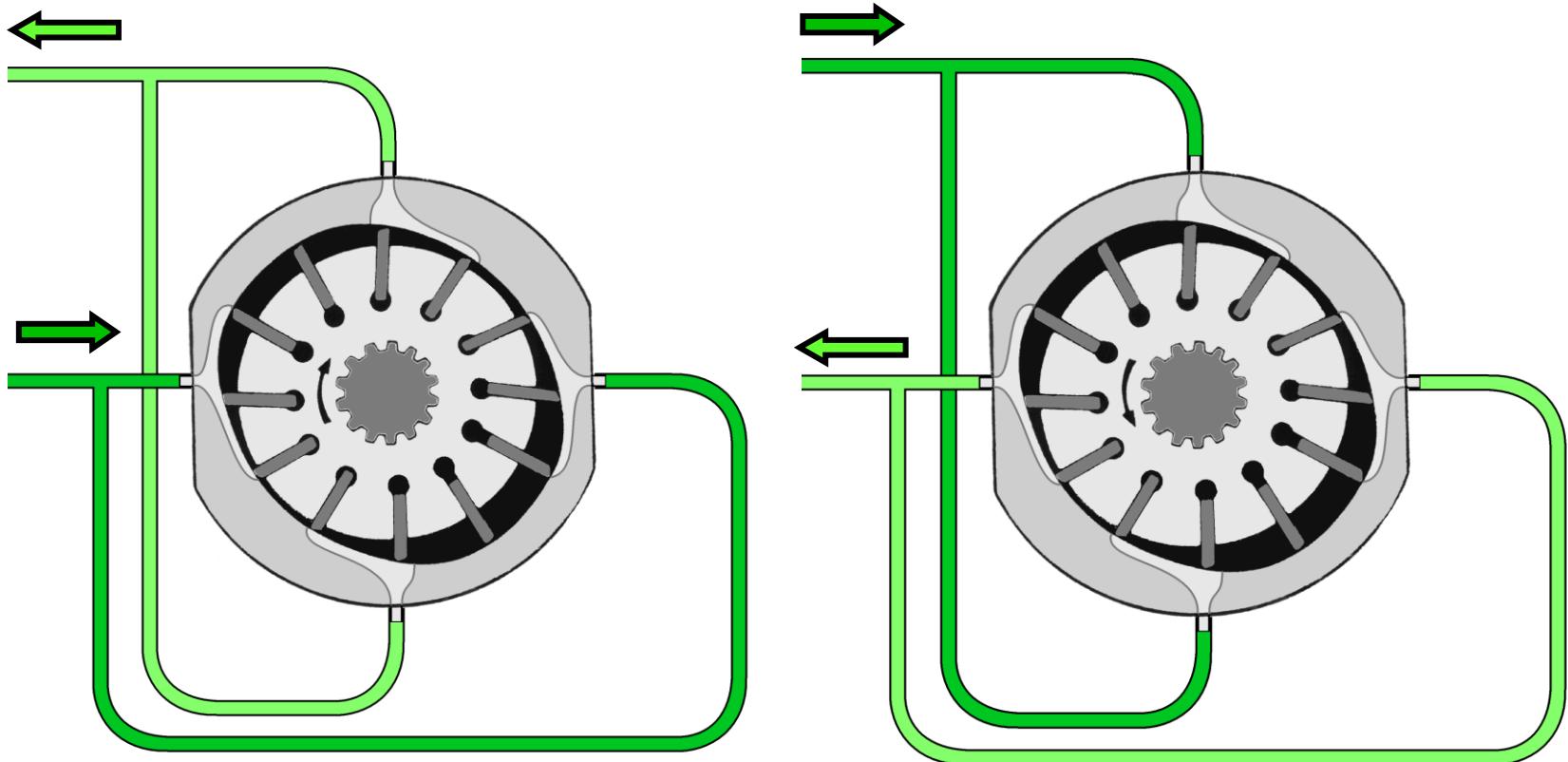
**Variatie caudala**



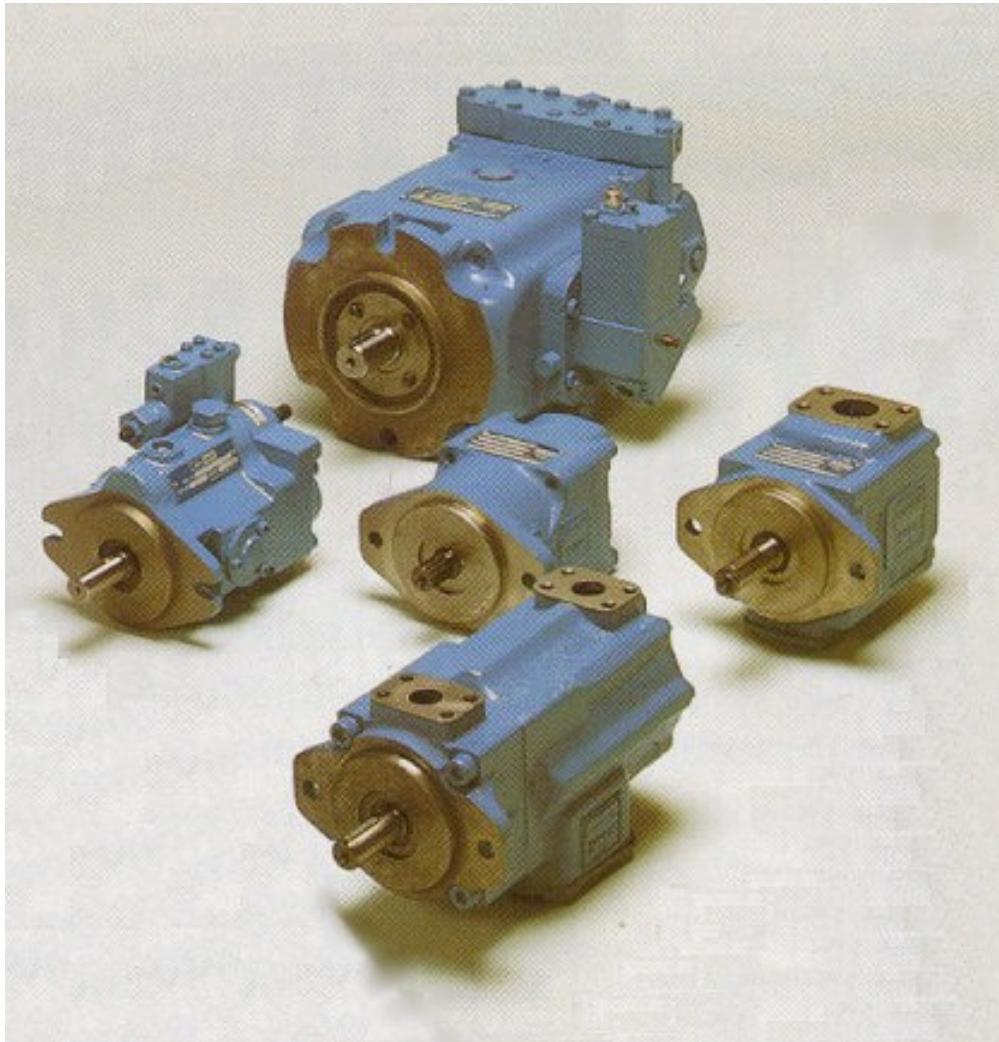
Variatia ca functie a excentricitatii  $\epsilon$

# Pompe-motoare hidraulice

( cu lame)



# Pompe-motoare hidraulice



# Elementele de actionare hidraulice

- Economice
- Fiabile (de încredere)
- Capabile de a lucra cu sarcini grele
- Rezistente la suprasarcini
- Viteză de lucru redusă
- Operare cu zgomot
- Posibile pierderi de ulei

# *Miscarea robotilor I*

Locomoția se referă la modul în care corpul robotului se deplasează dintr-o locație într-o altă locație. Din latinescul locus (loc) și mișcare.

Cele mai tipice efectoare și actuatoare pentru roboții de sol sunt roțile și picioarele.

Majoritatea roboților trebuie să fie stabili pentru a funcționa corect

- Stabilitatea statică - un robot poate sta, poate fi static și stabil
  - Robotii bipezi nu sunt stabile din punct de vedere static, mai multe picioare imbunatatesc stabilitatea.
  - Majoritatea roboților cu roți sunt stabili.
- Mersul static stabil - robotul este stabil tot timpul
  - De exemplu, hexapod cu mers pe trepied
- Stabilitate dinamică - organismul trebuie să se echilibreze sau să se deplaseze activ; rămân stabili, roboții sunt numiți dinamici stabili
  - De exemplu, pendulul invers

# Miscarea – roboti cu roti

Unul dintre cei mai simpli roboți cu roți este robotul cu acționare diferențială

Are două roți acționate pe o axă comună

Poate folosi o roată (sau o bilă) pentru stabilitate

Este un robot nonholonomic Un robot omnidirecțional este un robot holonomic

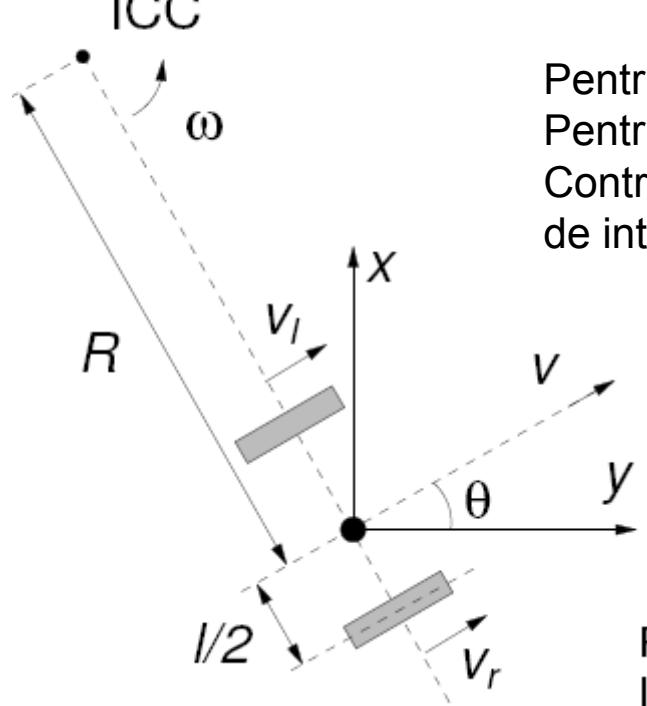
$v_l$  și  $v_r$  sunt viteze de-a lungul solului de roțile din stânga și din dreapta, respectiv

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{l}, \quad R = \frac{l}{2} \frac{v_l + v_r}{v_r - v_l}$$

Pentru  $v_l = v_r$ , robotul se deplasează drept înainte,  $R$  este infinit

Pentru  $v_l = -v_r$ , robotul se rotește într-un loc,  $R$  este zero

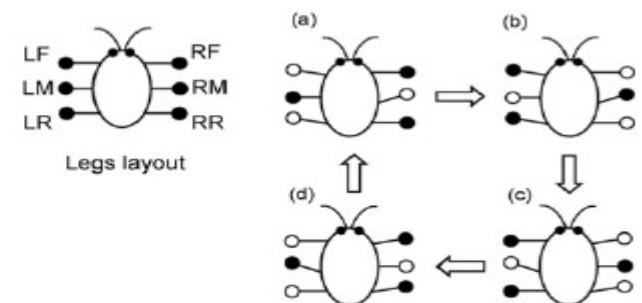
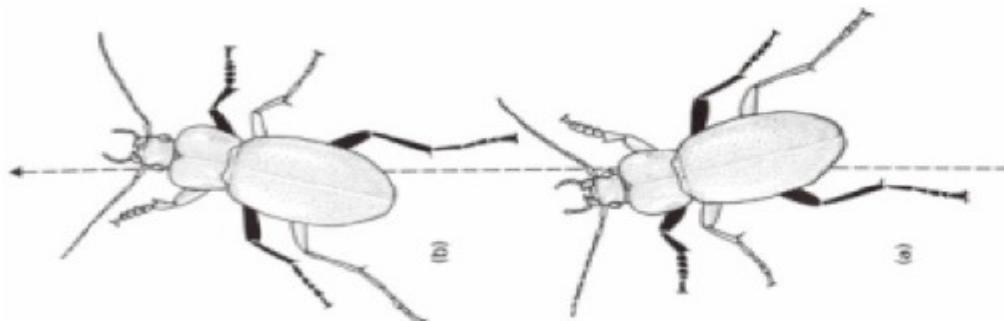
Controlul simplu al mișcării poate fi realizat dintr-o succesiune de întoarceri-miscare, cf unei scheme



Controlul mișcării ulterioare folosind urmarirea traseului cu controler de feedback pentru poziția robotului pe calea / traectoria dorita.

# Mișcarea – roboti cu picioare

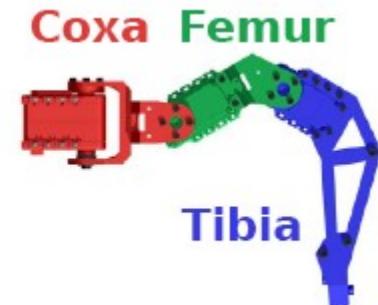
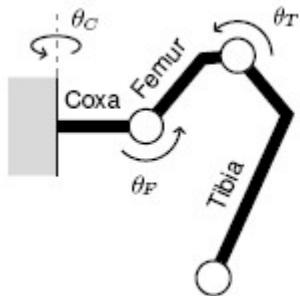
- Mersul este un mod în care se mișcă un robot cu picioare
- Mersul definește ordinea în care picioarele individuale se ridică și coboară și de asemenea, poziționarea piciorului pe pământ
- Proprietățile mersului sunt: stabilitate, viteză, eficiență energetică, robustete (modul în care mersul se poate recupera din unele eșecuri), simplitatea (cat de complex este să se genereze mersul)
- Un mers tipic pentru robotul de mers cu hexapod este “trepiedul” care este stabil pentru că de fiecare dată cel puțin trei picioare sunt pe pământ



# Mișcarea – roboti cu 6 picioare; hexapod

Se consideră un robot hexapod cu șase picioare identice fiecare cu 3 DOF

Fiecare picior este format din trei părți numite Coxa, Femur și Tibia



Mișcarea este o coordonare a fazelor de poziție și de balansare a picioarelor definite de mers, de exemplu, trepied.

Un pas este o combinație a mișcării picioarelor cu vârful piciorului pornit solul (în faza de poziție) și mișcarea picioarelor într-o direcție particulară (în faza de balansare) în cadrul unui ciclu de mers.

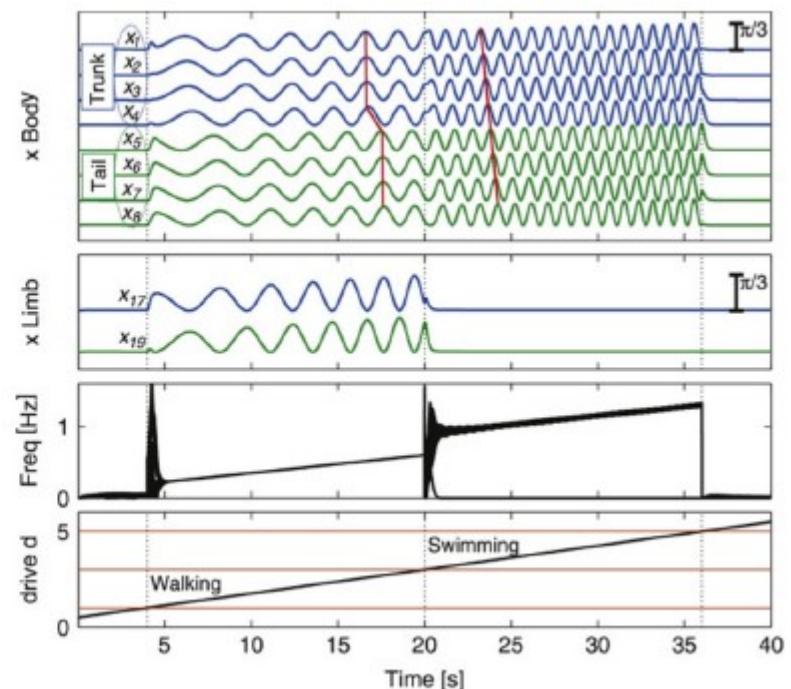
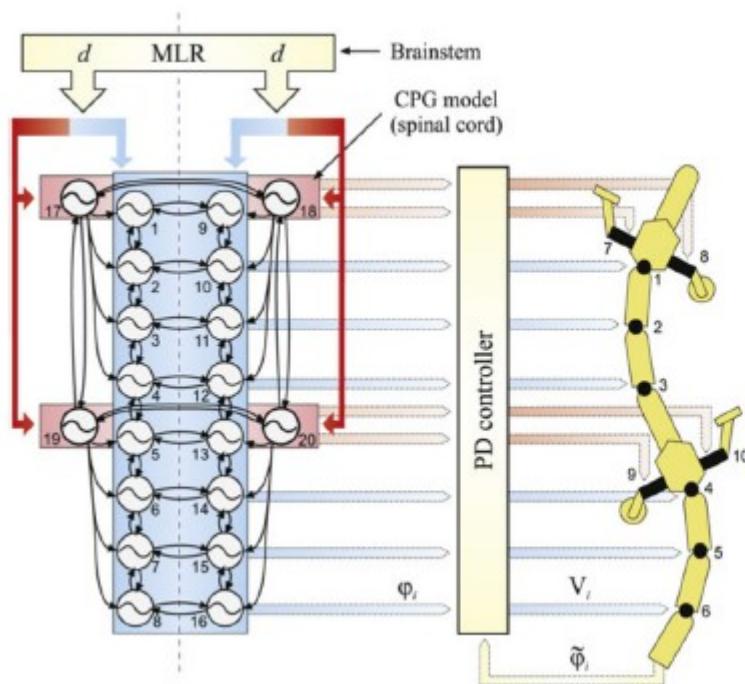
Se pot crea diverse stiluri de mers prin diferite secvențe de poziție și faze de balansare

$T_{\text{Pozitie}}, T_{\text{Balansare}}, T_{\text{Pas}} = T_{\text{Pozitie}} + T_{\text{Balansare}}$  definește factorul de utilizare

$\beta = T_{\text{pozitie}} / T_{\text{Pas}}$  ; Pentru mers trepied  $\beta = 0,5$

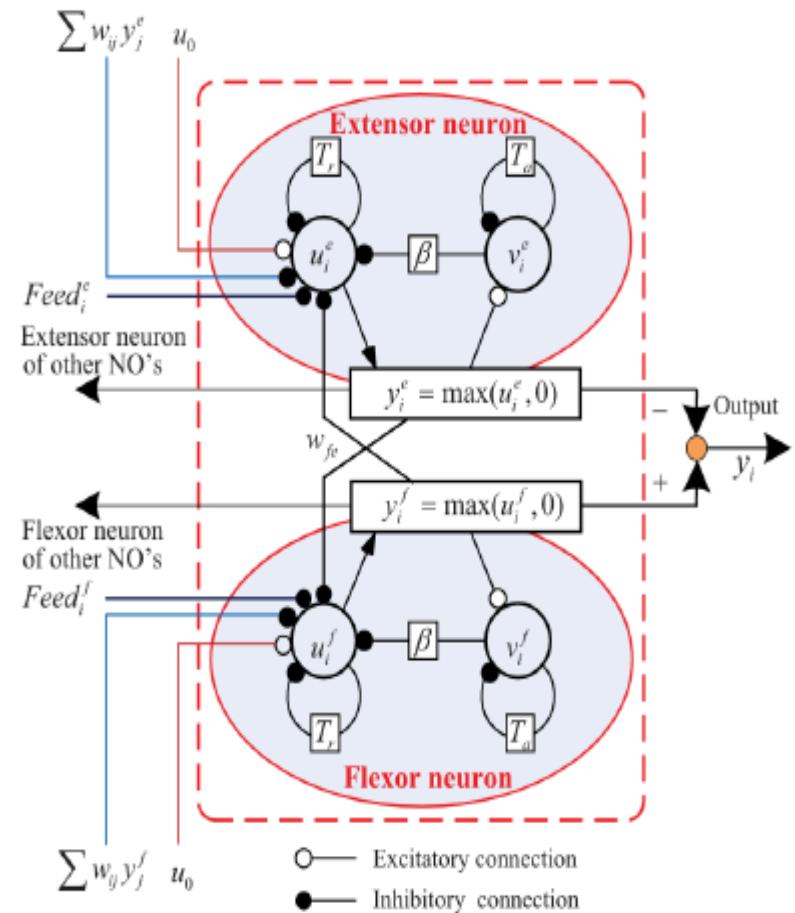
# Generator de tipare de secvențe pentru mers

- Generatoarele de model central (CPGs) - sunt circuite neuronale de produs tipare pentru diverse activități/ritmuri locomotorii pentru a controla o mișcare periodică a unei anumite părți a corpului
- CPG Salamander cu 20 oscilatoare cu fază și amplitudine controlate



# Exemplu de oscilator ritmic cu tipare de mers

- Unul dintre oscilatoarele utilizate pe scară largă este modelul oscilator Matsuoka
- Se bazează pe concepte biologice ale mușchilor extensori și flexori
- Modelele ritmice definesc traекторia punctului final al piciorului (vârful piciorului)
- Coordonatele vârfului piciorului pot să fie utilizate pentru calcularea unghiurilor îmbinării folosind cinemica inversă



Matsuoka, K. (1985). Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation. Biological Cybernetics 52, 367—376

# Arhitecturi de control (ale miscarii)

- O singură regulă de control poate asigura un comportament simplu al robotului.
- Controlerul poate fi feed-forward (buclă deschisă) sau controlor de feedback cu senzor bazat pe vedere.
- Robotii ar trebui să facă mai mult decât doar să evite obstacolele.
- Întrebarea este „Cum se pot combina mai multe controlere?”
- Arhitectura de control este un set de principii și constrângeri directoare pentru organizarea sistemului de control al robotului.
- Linii directoare pentru dezvoltarea sistemului robotic pentru a se comporta după dorință
- Nu este necesar să se cunoască arhitecturile de control pentru o robotică simplă, demo-uri și sarcini usoare.
- Este de dorit să fim conștienți de arhitecturi pentru roboți complecsi.

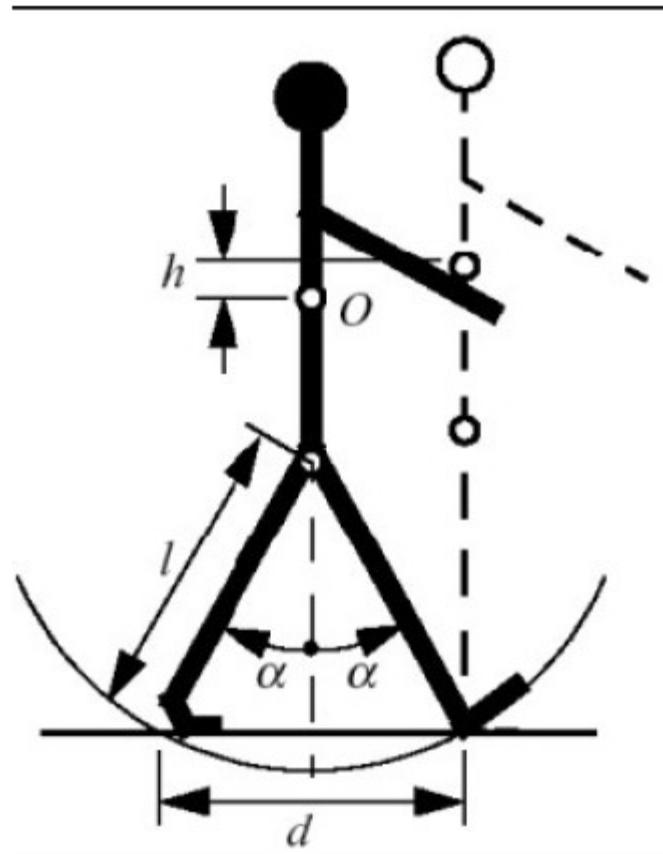
# *Mișcarea roboților II*

- Mișcarea (locomoția) robotului este denumirea colectivă a diferitelor metode pe care roboții le utilizează pentru a se mișca din loc în loc.
- Robotii cu roti sunt de obicei destul de eficient din punct de vedere energetic și simplu de controlat. Cu toate acestea, alte forme de locomoție pot fi mai potrivite din mai multe motive, de exemplu traversarea terenului accidentat, precum și mișcarea și interacțiunea în mediile umane.
- Mai mult, studierea roboților bipezi și asemănători insectelor poate avea un impact benefic asupra mecanicii.
- Un obiectiv major în acest domeniu este dezvoltarea capacitaților pentru roboți să decidă în mod autonom cum, când și unde să se miște. Cu toate acestea, coordonarea numeroase îmbinări de roboți pentru probleme simple, cum ar fi negocierea scărilor, este dificilă.
- Milcarea robotică autonomă este un obstacol tehnologic major pentru multe domenii de robotică, cum ar fi androizii (exemplu Asimo de la Honda).

# Mecanisme de mișcare (locomoție) regăsite în natură

Type of motion	Resistance to motion	Basic kinematics of motion
Flow in a Channel	Hydrodynamic forces	Eddies
Crawl	Friction forces	Longitudinal vibration
Sliding	Friction forces	Transverse vibration
Running	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum
Jumping	Loss of kinetic energy	Oscillatory movement of a multi-link pendulum
Walking	Gravitational forces	Rolling of a polygon (see figure 2.2)

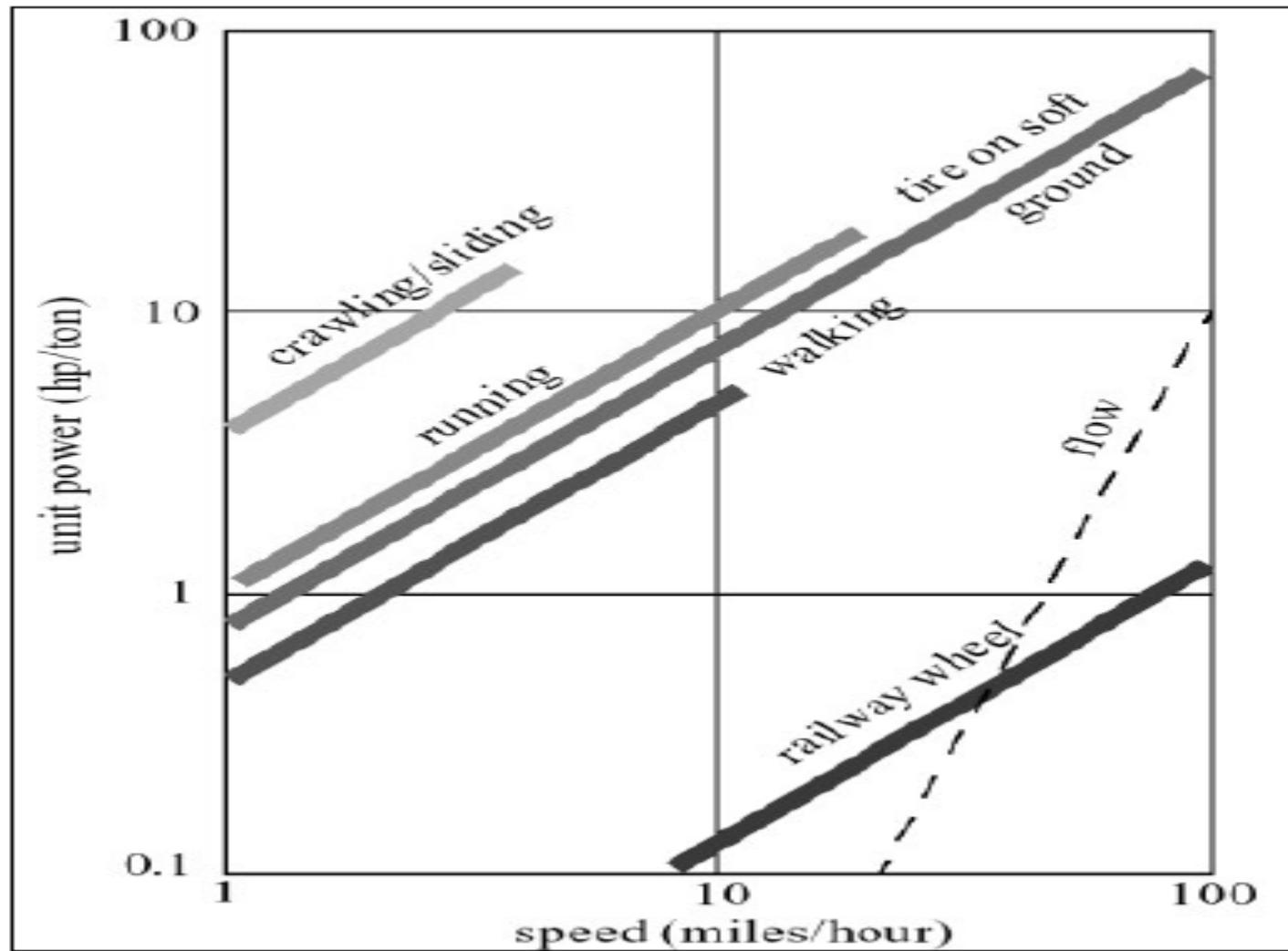
# Apropierea mersului uman prin poligonul rulant



# Stabilitatea

- Pentru fiecare concept de locomoție, nu contează dacă este vorba de roți, picioare sau un concept diferit, există trei probleme de bază: stabilitatea, caracteristicile contactului la sol și tipul de mediu
- Principalele atrbute ale stabilității sunt numărul și geometria punctelor de contact, centrul de greutate al roboților, dacă robotul este stabil sau dinamic stabil și înclinația terenului.
- Caracteristicile contactului la sol depind de tipul punctului de contact (în cazul locomoției cu picioare, aceasta este amprenta), unghiul de contact cu solul și frecarea dintre robot și suprafață.

# Consumul de energie a mecanismelor de locomoție



# Mișcarea (locomoția) cu picioare

- Un robot cu picioare este potrivit pentru terenurile accidentate; este capabil să urce trepte, să traverseze goluri la fel de mari ca pasul său și să meargă pe un teren extrem de dur unde, din cauza denivelarilor solului, utilizarea roților nu ar fi posibilă.
- Pentru a face un robot cu picioare mobile, fiecare picior trebuie să aibă cel puțin două grade de libertate (DOF). Pentru fiecare DOF este nevoie de o îmbinare, care este de obicei alimentată de un servomotor.
- Din acest motiv, un robot cu patru picioare are nevoie de cel puțin opt servomotoare pentru a călători.

# Mișcarea (locomoția) cu picioare

- Stabilitatea statică este dată, atunci când centrul de masă este complet în poligonul de susținere și zona poligonului este mai mare decât zero, prin urmare, stabilitatea statică necesită cel puțin trei puncte de contact la sol.
- Dar adăugarea de grade de libertate provoacă, de asemenea, unele dezavantaje, deoarece pentru mișcarea îmbinărilor suplimentare sunt necesare mai multe servomotoare, acest lucru crește consumul de energie și greutatea robotului. În plus, controlul robotului devine mai complex, deoarece mai multe motoare trebuie controlate și actionate în același timp.

# Mișcarea (locomoția) cu picioare

- Dacă robotul are mai mult de un picior, există problema coordonării picioarelor pentru locomoție. Numărul total de secvențe posibile în care un robot poate călători depinde de numărul de picioare pe care îl are. Mersul este o secvență periodică de evenimente de ridicare și eliberare pentru fiecare picior. Dacă un robot are  $k$  picioare, numărul de eventuale eventuale  $N$  este, conform

$$N=(2k-1)!$$

În cazul unei mașini de mers bipede ( $k = 2$ ) numărul de evenimente posibile este

$$N=(2k-1)! = (2*2-1)! = 3! = 6$$

# Mișcarea (locomoția) cu picioare

- Deci, există șase evenimente diferite, acestea sunt
- 1. Ridicați piciorul stâng
- 2. Eliberați piciorul stâng
- 3. Ridicați piciorul drept
- 4. Eliberați piciorul drept
- 5. Ridicați ambele picioare între ele
- 6. Eliberați ambele picioare împreună

În cazul  $k = 6$  picioare există deja 39916800 evenimente posibile, în acest sens, controlul unui robot cu șase picioare este, din cauza numărului mare de evenimente posibile, mai complex decât controlarea unui robot cu două picioare. Însă roboții cu mai puține picioare au alte probleme; una dintre cele mai complexe probleme este stabilitatea menționată anterior. În următoarele configurații diferite ale picioarelor, sunt prezentate avantajele / dezavantajele acestora și exemple de roboți.

# Mișcarea (locomoția) cu picioare

- Un picior este desigur numărul minim de picioare pe care le poate avea un robot cu picioare. Un număr mai mic de picioare reduce masa corporală a robotului și nu este necesară coordonarea picioarelor.
- Locomoția cu un picior necesită doar un singur punct de contact la sol; acest lucru face ca robotul să poată călători pe terenul cel mai dur. Ca exemplu, robotul este capabil să depășească un obstacol, cum ar fi un gol care este mai mare decât pasul său, vorbind despre un început de alergare.
- Un robot cu mai multe picioare, care nu poate rula, este capabil să treacă doar de goluri la fel de mari. Dar unicul punct de contact la sol generează principala problemă pentru roboții cu un singur picior - stabilitatea. Stabilitatea statică este imposibilă chiar și atunci când robotul este staționat, deoarece poligonul de sprijin este redus la un singur punct.
- Așadar, roboții cu un picior trebuie să fie stabili din punct de vedere dinamic, ceea ce înseamnă că robotul trebuie să se echilibreze activ, fie schimbându-și centrul de greutate, fie imprimând forțe corective. Deci un robot “într-un picior” trebuie să se afle în mișcare permanentă.

# Mișcarea (locomoția) cu picioare

- Robotii de mers pe jos au devenit foarte populari în ultimii zece ani; două dintre cele mai cunoscute exemple sunt Qrio de la Sony și Asimo de la Honda. Qrio are o greutate de 7 kg și o înălțime de 58 cm, fiecare picior are șase grade de libertate; Asimo are o greutate de 210 kg, o înălțime de 1,82 cm și o viteză maximă de mers de 2 km / h, fiecare picior are șase grade de libertate.

Qrio



Asimo



# Mișcarea (locomoția) cu picioare

- Roboți cu două picioare sunt deja capabili să meargă, să alerge, să sară, să danseze și să călătorească în sus și în jos pe scări, dar stabilitatea este încă o problemă pentru roboții bipedali, deoarece trebuie să fie dinamici stabili. Nu există un algoritm general care să rezolve problema stabilității dinamice pentru roboții bipedali; abordările frecvent utilizate sunt bazate pe punctul de moment zero (ZMP). Exemple de roboți care utilizează această abordare sunt Qrio și Asimo
- Ideea rudimentală a acestei abordări este menținerea echilibrului prin planificarea poziționării amprentei. ZMP (Punctul de Moment Zero) este punctul în care robotul trebuie să se bazeze pentru a-și păstra echilibrul. Când robotul ar trebui să înainteze, trebuie mai întâi să calculeze ZMP și apoi trebuie să calce piciorul corespunzător exact în poziția calculată.
- Punctul de Moment Zero (ZMP) este adesea descris în robotică drept punctul de pe pământ unde toate momentele sunt egale cu zero. ZMP poate fi calculat cu o ecuație

# Mișcarea (locomoția) cu picioare

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i(z + g)x_i - \sum_i m_i x z_i - \sum_i I_{iy}\theta_{iy}}{\sum_i m_i(z + g)}$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i(z + g)y_i - \sum_i m_i y z_i - \sum_i I_{ix}\theta_{ix}}{\sum_i m_i(z + g)}$$

unde  $(x_{ZMP}, y_{ZMP}, 0)$  sunt coordonatele ZMP în sistemul de coordonate carteziene,  $(x_i, y_i, z_i)$  este centrul de masă al legăturii (segmentului) i,  $m_i$  este masa legăturii (segmentului) i și  $g$  este accelerația gravitațională.  $I_x$  și  $I_y$  sunt componente ale momentului de inerție,  $\theta_{ix}$  și  $\theta_{iy}$  sunt viteza unghiulară în jurul axelor x și y (luată ca punct fata de centrul de masă al legăturii i).

# Mișcarea (locomoția) cu picioare

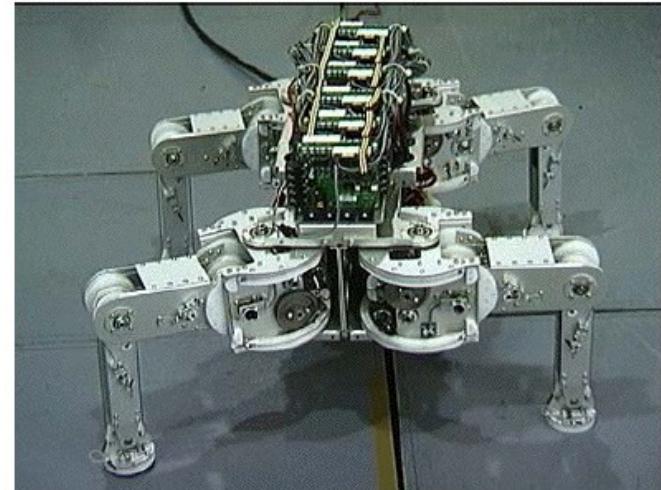
- Un beneficiu al unei mișcării cu două picioare este faptul că greutatea totală a robotului este redusă datorită numărului mai mic de picioare (un robot cu șase picioare are mult mai multă masă a picioarelor și din această cauza mai multă masa corporala), dar acest avantaj creează o altă problemă. Fiecare picior trebuie să aibă o capacitate suficientă pentru a susține întreaga greutate a robotului, în cazul a patru sau șase picioare, greutatea corpului robotului este distribuită pe mai multe picioare.
- O caracteristică importantă a roboților bipedi este forma lor antropomorfă, ei pot fi construiți în dimensiuni asemănătoare omului, ceea ce îi face predestinați cercetării în interacțiunea dintre roboți umani.

# Mișcarea (locomoția) cu picioare

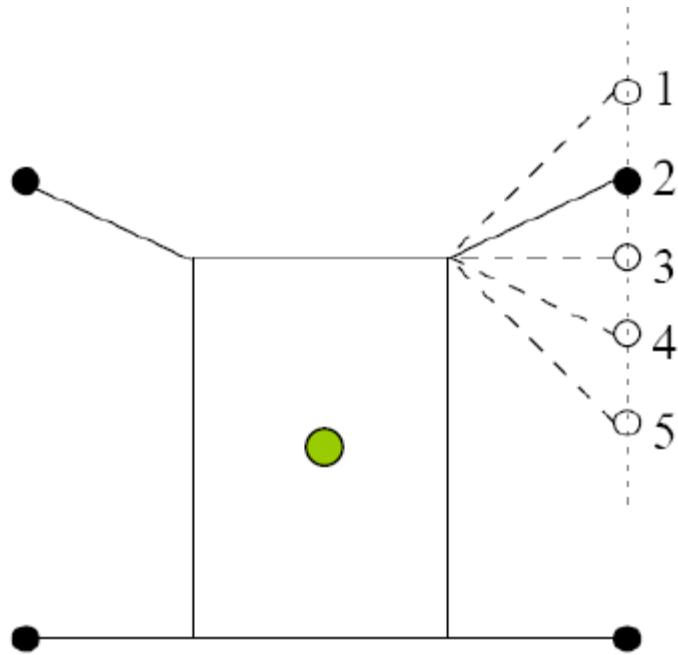
Unul dintre cei mai faimoși roboti cu patru picioare este Aibo Sony. Unele dintre cele mai interesante caracteristici ale lui Aibo sunt un microfon stereo, care îi permite să capteze sunetele din jur, un senzor pe cap care să observe o persoană care se uită la el, luminile ochilor (acestea se aprind în albastru, verde sau roșu) pentru a indica starea emoțională a lui Aibo , o cameră color pentru a căuta obiecte și a le recunoaște prin culoare și mișcare, iar difuzeoarele pentru a emite sunete. Unii roboți cu patru picioare sunt, de asemenea, bine adaptați pentru cercetarea interacțiunii robotilor umani, dacă au o formă animală (cum ar fi Aibo). Oamenii îi pot trata ca pe un animal de companie și ar putea dezvolta o relație emoțională cu ei.

Un alt exemplu de robot patruped este Titan VIII, care a fost dezvoltat la Tokyo Institute of Technology. Titan VIII are o greutate de 9 kg, o înălțime de 0,25 m și fiecare picior are șase grade de libertate.

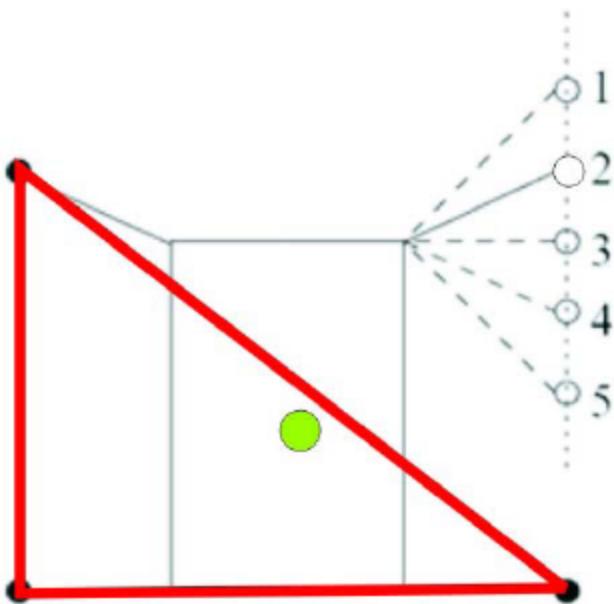
# Mișcarea (locomoția) cu picioare



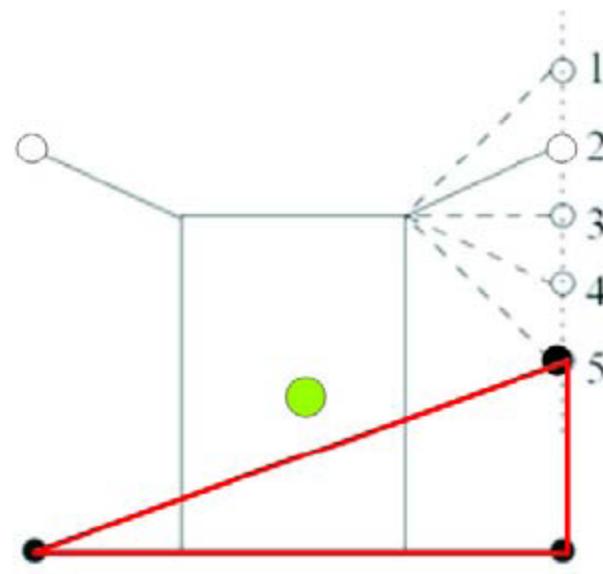
# Mișcarea (locomoția) cu picioare



# Mișcarea (locomoția) cu picioare



Configuratie stabila



Configuratie instabila

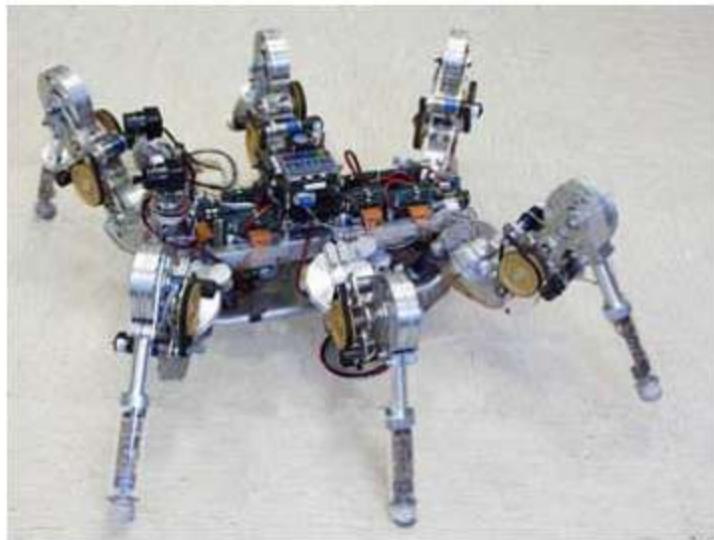
O modalitate de a găsi pasi stabili static, se poate face prin reducerea mai întâi a numărului total de configurații, prin eliminarea tuturor configurațiilor care sunt instabile

# *Mișcarea roboților III*

# Deplasarea (locomoția) cu picioare

- Locomotia cu șase picioare este cel mai popular concept de locomoție cu picioare, din cauza capacitatii de mers stabil.
- Cel mai folosit mers stabil static este mersul trepiedului, unde de fiecare dată se deplasează împreună cele două picioare exterioare pe o parte și piciorul interior al celeilalte părți.
- Datorită posibilității unor treceri stabile statice, complexitatea controlului este redusă pe de o parte, deoarece nu există niciun fel de control al stabilității în general, dar pe de altă parte, cele mai multe roboți cu șase picioare au trei grade de libertate și cele șase picioare trebuie să fie controlate, astfel încât coordonarea picioarelor devine mai complexă.
- Roboții cu șase picioare sunt adesea inspirați din natură, două exemple de astfel de roboți sunt Lauron și Genghis.

# Deplasarea (locomoția) cu picioare



- Lauron (Forschungszentrum Informatik, group IDS in Karlsruhe)
  - Genghis (MIT)

# Deplasarea (locomoția) cu picioare

- O abordare pentru a reduce complexitatea controlului este descentralizarea controlului robotului.
- Studiile asupra sistemului nervos la animale cu șase picioare au arătat că majoritatea animalelor cu șase picioare controlează mișcarea picioarelor local și nu prin creier.
- Un exemplu adesea folosit pentru roboți cu șase picioare este insecta. Lauron III este un exemplu de robot cu șase picioare. Proiectul Lauron a început în 1993, Lauron III este robotul actual care a fost dezvoltat în 2001 și este încă avansat de Forschungszentrum Informatik, grupul IDS din Karlsruhe.
- Lauron III are o lungime de 0,5 metri, o înălțime de 0,3 metri, lățimea de 0,8 metri, o greutate de 18 kg și fiecare picior are trei grade de libertate. Fiecare picior este controlat de un microcontroler Siemens 80C176, toate picioarele sunt conectate între ele și cu un PC / 104 de bord (echipat cu un Pentium II 400 și un Linux în timp real) de un CAN-Bus.

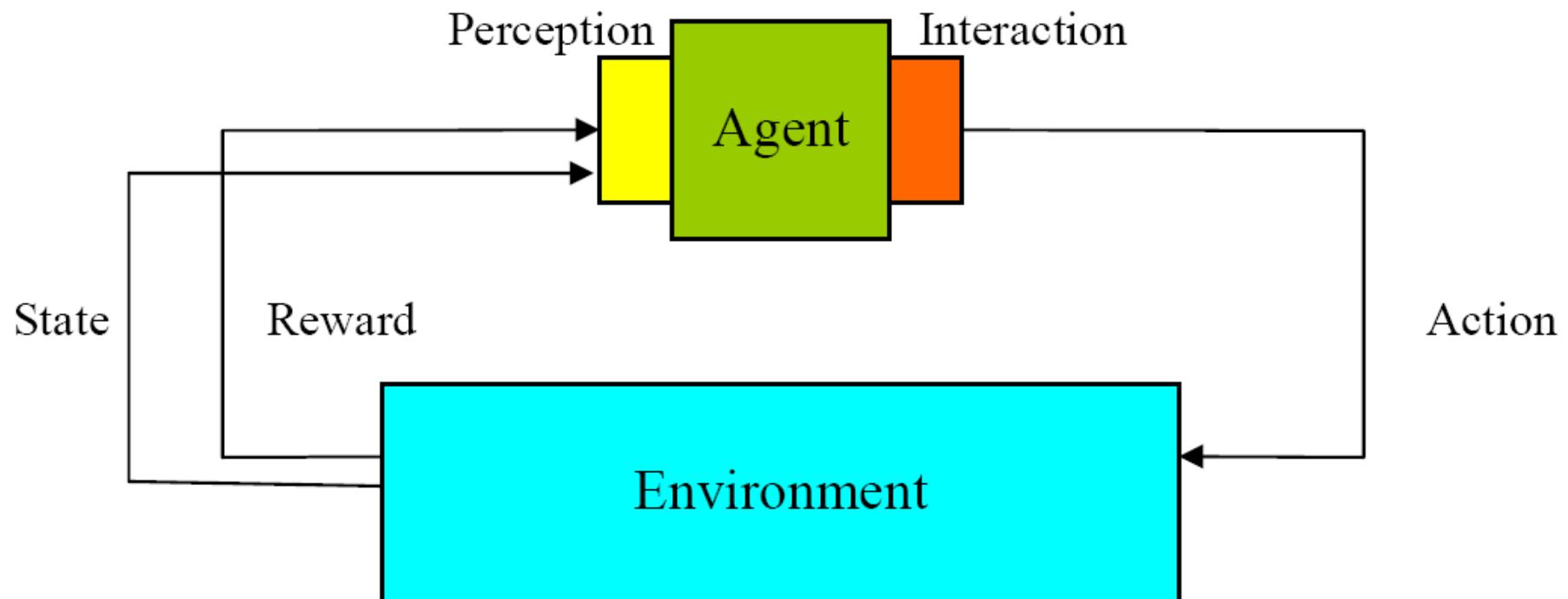
# Deplasarea (locomoția) cu picioare

- Software-ul de control al lui Lauron III este construit (precum arhitectura hardware) ierarhic. Software-ul este împărțit în module pentru diferite sarcini și este distribuit microcontrolerelor și PC / 104.
- Aceste module diferite sunt un regulator pentru fiecare îmbinare (articulatie - are ca intrare un unghi ), un controler pentru fiecare picior (direcționează unghiiile cu controlerele de îmbinare pentru a stabili amprenta la o poziție definită) și un regulator de mers (coordonează picioarele).
- Împărțirea sistemului de control global complex în subsisteme mai mici face ca dezvoltarea sistemului să fie mai ușoară și mai inteligibilă.
- Un alt avantaj este că subsistemele pot fi dezvoltate și testate independent, fără a schimba întregul sistem.

# Deplasarea (locomoția) cu picioare

- Problema „cum să faci un robot sa meargă pe picioare” poate fi rezolvată prin programarea robotului sub formă de automate finite, unde toate acțiunile de mers sunt definite înainte de a merge prin mediul înconjurător. Dezavantajul principal al acestei abordări este că robotul trebuie să fie programat din nou, atunci când mediul se schimbă, astfel încât robotul nu este capabil să meargă într-un mediu în schimbare dinamică.
- O altă abordare este utilizarea algoritmilor de învățare robustă, prin intermediul acestora robotul este capabil să învețe mersul singur.
- Obiectul învățării robuste este de a învăța ceva prin încercarea și interacțiunea erorii cu un mediu dinamic. Subiectul care vrea să învețe ceva se numește agent (în acest caz este desigur robotul). În modelul de învățare standard agentul este conectat la mediu prin percepție și interacțiune.

# Deplasarea (locomoția) cu picioare



Model de învățare robust

# Deplasarea (locomoția) cu picioare

- Agentul primește la momentele de timp discrete  $t = 0, 1, 2 \dots$  starea mediului ca intrare. Apoi agentul alege o acțiune dintr-un set posibil de acțiuni  $A(s_t)$  ca ieșire și mediul se schimbă într-un nou status  $s_{t+1}$ .
- Pentru a optimiza comportamentul agenților, agentul primește un semnal de siguranta  $r_{t+1} \in R$  după fiecare acțiune.  $R$  este setul de semnale de siguranta, de exemplu  $R = \{0, 1\}$ , unde 0 este o penalizare și 1 o recompensă.
- Aceste semnale indică agentul, atunci când intră într-o situație cunoscută, dacă decizia luată ultima dată a fost bună sau nu, deci poate acționa folosind aceeași acțiune ca și ultima dată sau poate încerca una diferită, dacă rezultatul nu a fost corespunzător.
- Scopul algoritmilor de învățare robustă este alegerea acțiunilor care cresc, pe termen lung, numarul valorilor semnalelor de siguranta bune. În acest fel, agentul va învăța să acționeze în mediu respectiv.

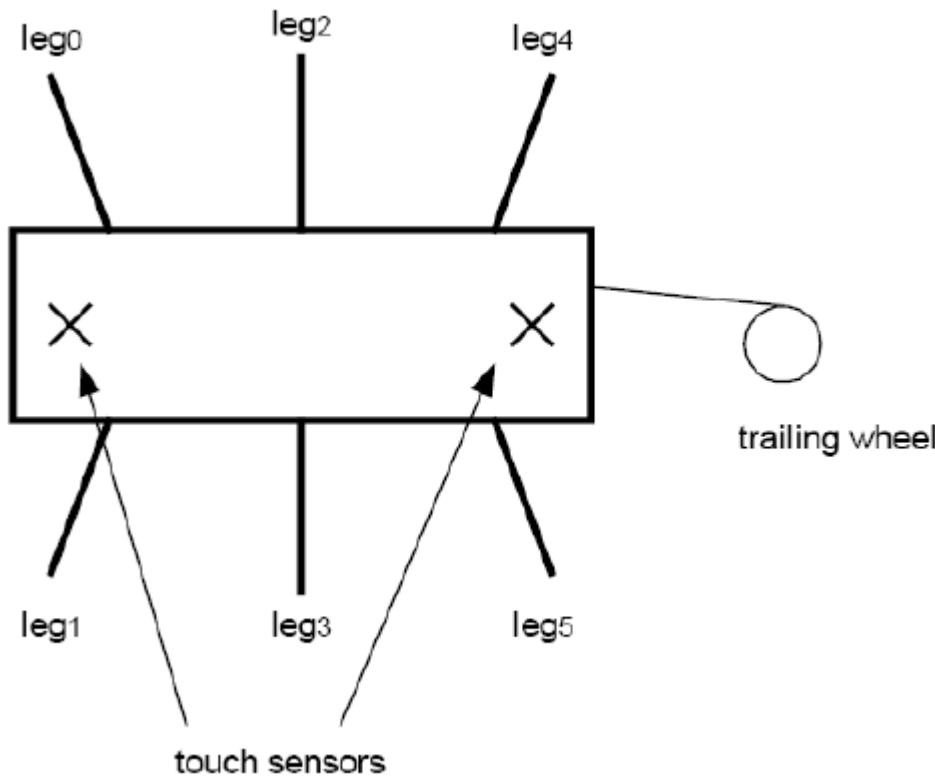
# Deplasarea (locomoția) cu picioare

- În cazul unui robot cu picioare robotul este agentul, mediul este mediul în care robotul ar trebui să parcurgă și intrarea semnalelor (inclusiv semnale de siguranta) este angajată cu senzorul (de exemplu, cameră foto, senzor tactil, etc.). “Recompensa” (confirmarea) poate fi dată atunci când robotul s-a mutat și poate fi acordată “pe deosebire” atunci când robotul s-a dezechilibrat.
- Un exemplu de robot cu șase picioare, care este capabil să învețe mersul cu un algoritm de învățare robust este Genghis, dezvoltat de Rodney A. Brooks la MIT.

# Deplasarea (locomoția) cu picioare

- Algoritmul de învățare a fost dezvoltat de Pattie Maes și Rodney A. Brooks în 1990. Genghis este capabil să învețe coordonarea picioarelor pentru a merge. Fiecare picior a lui Genghis are două comportamente elementare: balansare-picior-înainte și balansare-picior-înapoi (asta înseamnă că mișcarea elementară a picioarelor este dată și nu trebuie învățată); învățarea înseamnă în acest caz, că comportamentul potrivit trebuie să devină activ în momentul potrivit pentru a merge mai departe.
- Pentru a atinge acest scop se utilizează o metodă statistică, care calculează în ce stare și cât de des se termină o acțiune într-un rezultat pozitiv (când Genghis înaintează) sau rezultat negativ (când Genghis se prăbușește). Feedback-ul negativ este angajat de doi senzori tactili în partea de jos al robotului Genghis; acestea sunt activate, când unul sau ambiii senzori au contact la sol, în cazul în care Genghis se răstoarnă.
- Feedback-ul pozitiv este comis de fiecare dată când o roată de spate din spatele Ghengiului măsoară mișcarea înainte. În acest fel, Ghenghis este capabil să adopte o trecere stabilă statică precum treapta de trepied.

# Deplasarea (locomoția) cu picioare



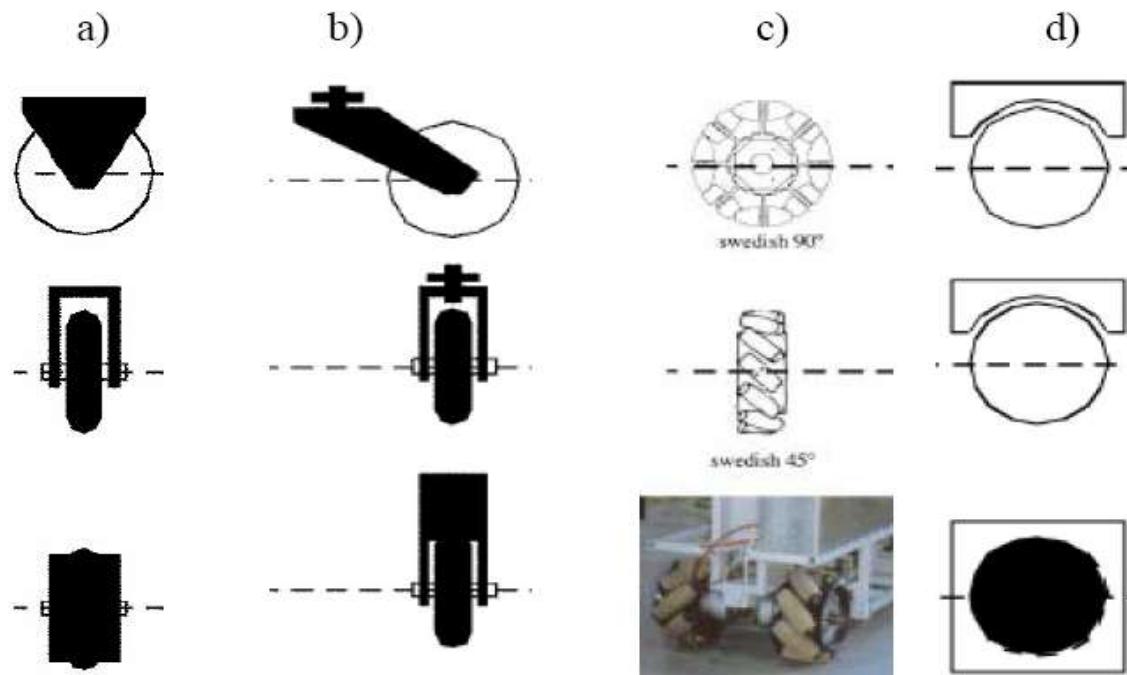
Reprezentarea schematică a senzorilor robotului Genghis

# Deplasarea (locomotia) cu roți

- Cel mai popular mecanism de locomoție la vehiculele fabricate de om este locomoția cu roți; deci nu este surprinzător faptul că este adesea folosit în robotica mobilă.
- Motivele pentru aceasta sunt implementarea mecanică ușoară a roții, nu este nevoie de controlul echilibrului dacă vehiculul are cel puțin trei sau, în unele cazuri două roți, și locomoția cu roți este relativ eficientă din punct de vedere al energiei, chiar și la viteză mare.
- Problemele roboților cu roți sunt diferite de problemele roboților cu picioare, stabilitatea nu este o problemă atât de profundă, cum este în locomoția cu picioare, dar există alte probleme.
- Cercetarea în robotica cu roți este focalizată pe tractiune și stabilitate pe teren accidentat, manevrabilitate și control.

# Deplasarea (locomotia) cu roți

- Punctul de plecare al luării în considerare al locomoției cu roți este roata în sine.
- În general, există patru clase majore de roți, aşa cum se arată în figura a) până la d).



Patru tipuri de roți de bază

# Deplasarea (locomotia) cu roți

- Figura a) prezintă roata standard cu două grade de libertate, acestea se rotesc în jurul osiei roții și în jurul contactului cu solul;
- Figura b) prezintă roata cu două grade de libertate, rotire în jurul osiei roții și a articulației de direcție;
- Figura c) prezintă roata suedeză de  $45^{\circ}$  și  $90^{\circ}$  sau roata omni, care are trei grade de libertate: rotație în jurul punctului de contact, în jurul osiei roții și în jurul rolelor;
- Figura d) prezintă bila sau roata sferică, această roată este omnidirecțională, dar este dificil de implementat din punct de vedere tehnic.

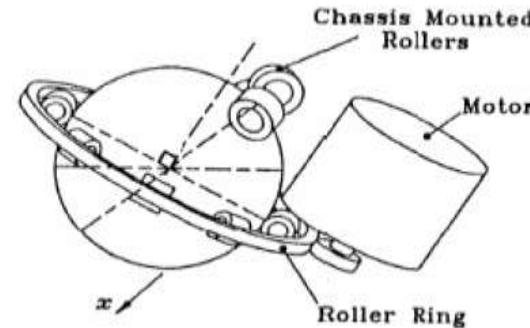
# Deplasarea (locomotia) cu roți

- Principalele avantaje ale rotii standard și ale roții cu doua grade de libertate sunt punerea în aplicare ușoară, capacitatea mare de încărcare și toleranța ridicată la neregulile de pe suprafața solului.
- Dar aceste roți nu sunt în mod omnidirectionale, pentru a face un vehicul care folosește aceste roți să fie orientat, roata (roțile) de direcție (depinde de configurația roții vehiculului) trebuie direcționată mai întâi de-a lungul unei axe verticale și deplasată în jurul unei axe orizontale.
- Deci, mai ales în cazul vehiculelor grele și atunci când nu se mișcă în timpul direcției, această metodă de direcție cauzează frecare și uzură ridicate în timpul direcției, deoarece roata este răsucită activ în jurul axei sale verticale, acest lucru crește consumul de energie și reduce precizia de poziționare a vehiculului.

# Deplasarea (locomotia) cu roți

- Roata suedeză funcționează ca o roată normală, dar are mici role pasive în jurul circumferinței.
- Aceste role oferă, de asemenea, o rezistență scăzută în altă direcție, în funcție de unghiul în care sunt aranjate rolele, astfel încât roata să poată rula fără probleme în orice direcție.
- Axa principală a roților servește ca singura articulație cu acțiune activă, dar este posibil să proiectăm cu aceste roți roboti omnidirecționali holonomici;
- Roata sferică este o adevărată roată omnidirectională. Există mai multe implementări ale roților sferice. Unul dintre acestea este mecanismul roții cu bilă, dezvoltat de West și Asada în 1997

Mecanismul rotii cu bila



# Deplasarea (locomotia) cu roți

- În proiectarea roții cu bilă, puterea de la un motor se transmite prin angrenaje la un inel de rolă activ și apoi la bilă, prin frecare între role și bila. Datorită rolelor, fixate la inelul cu role și la șasiu, bila este capabilă să se rostogolească pasiv în orice direcție. Un robot are nevoie de cel puțin trei roți sferice pentru a deveni mobil
- Atunci când proiectează un robot cu roți, dezvoltatorul are de ales mai multe aranjamente și tipuri de roți diferite. Combinarea de tip roată și aranjament este puternic legată și guvernează stabilitatea, manevrabilitatea și controlabilitatea robotului.

# Deplasarea (locomotia) cu roți

- Un exemplu de astfel de combinație este configurația roții Ackermann a unei mașini, cu două roți direcționale în față, două roți nedirectionale în spate; cel puțin două roți, conectate printr-o axă, sunt motorizate.
- Aproape fiecare autoturism folosește această configurație, deoarece maximizează controlabilitatea, stabilitatea și manevrabilitatea în același mediu comun: rețeaua de drum. În cazul roboților mobili nu există un singur mediu în care sunt proiectați toți roboții, diferenți roboți sunt proiectați pentru aplicații într-o mare varietate de situații.
- Dar nu există o configurație cu o singură roată care să maximizeze calitățile de control, stabilitate și manevrabilitate pentru fiecare mediu; în acest sens, sarcina proiectantului este de a găsi o configurație care să maximizeze aceste calități pentru robot. În continuare, cele trei probleme ale locomoției cu roți sunt analizate mai în profunzime.

# Deplasarea (locomotia) cu roți

- Probleme ale locomoției cu roți

## 1. Stabilitate

- Numărul minim de roți necesar pentru stabilitatea statică este de două. Un robot cu o tracțiune diferențială pe două roți poate obține stabilitate dacă centrul de masă este sub axul roții sau dacă există un al treilea punct de contact care atinge podeaua. Dar acestea sunt câteva cazuri speciale; în condiții normale, un robot cu roți are nevoie de cel puțin trei roți cu contact la sol pentru a obține stabilitatea statică, în plus, centrul de greutate trebuie să fie complet în poligonul de sprijin, format din cele trei roți cu contact la sol .

# Deplasarea (locomotia) cu roți

- Probleme ale locomoției cu roți

## 2. Manevrabilitatea

- Manevrabilitatea este o problemă foarte importantă pentru un robot cu roți care să-și rezolve sarcinile. Când un robot este capabil să se depleteze în orice direcție a planului de sol (x, y), este omnidirecțional. Acest nivel de mișcare necesită de obicei roți cu acțiune activă, care se pot deplasa în mai multe direcții, precum roțile suedeze sau sferice. În schimb, configurația de direcție Ackermann, folosită de mașini, nu este omnidirecțională. Vehiculele care utilizează această configurație au o rază de rotire mai mare decât vehiculul în sine, în plus, nu este capabil să se depleteze lateral (asta înseamnă în direcția axei), o astfel de mișcare necesită mai multe manevre de parcare constând în schimbări repetitive în direcția roții și înainte și înapoi circulație. Această metodă de direcție este foarte populară în robotica hobby, deoarece este relativ ieftin să folosești un kit de mașini de cursă cu telecomandă ca platformă robot care acceptă mobilitatea

# Deplasarea (locomotia) cu roți

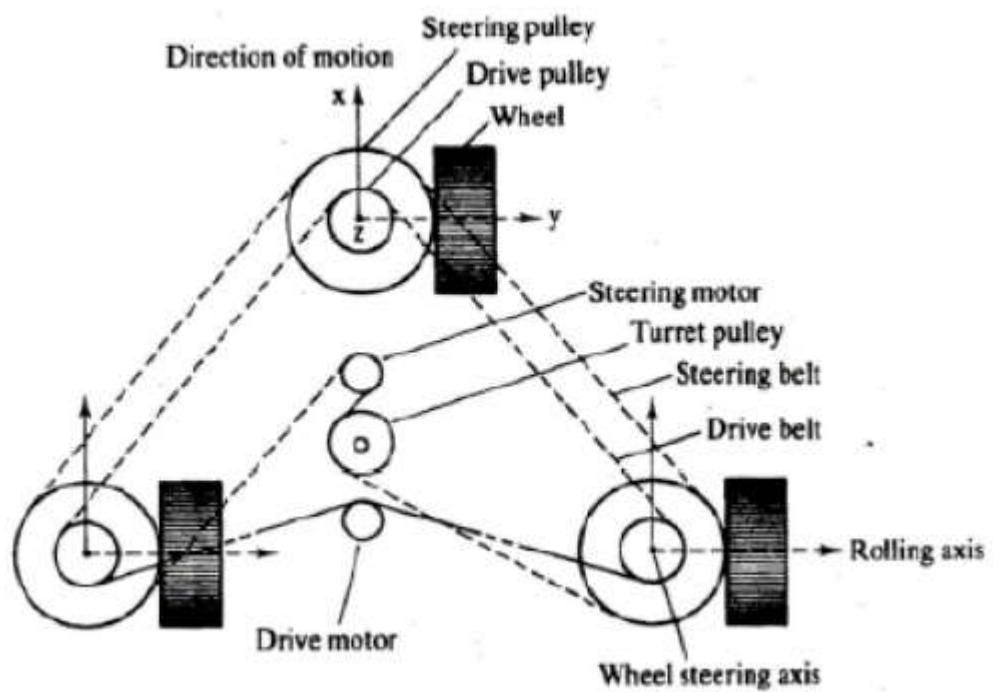
- Probleme ale locomoției cu roți

## 3. Controlabilitate

- Avantajul proiectelor omnidirectionale este manevrabilitatea ridicată a robotului, dar acest avantaj face mai dificilă controlul robotului. De exemplu, conducerea unui robot care folosește patru roți suedeze cu motor, precum robotul Carnegie Mellon Uranus, toate roțile trebuie să fie conduse cu aceeași viteză, pentru a se deplasa într-o linie perfect dreaptă. Chiar și mici erori în viteza roților vor provoca greșeli în direcția de călătorie dorită a robotului.
- În acest moment apare avantajul direcției Ackermann, deoarece controlul acestor vehicule este mult mai ușor. A conduce direct înainte înseamnă doar blocarea roților direcționate și conducerea roților motorizate. Acestea sunt conectate printr-o axă, astfel încât viteza roților motrice este întotdeauna aceeași prin acționarea unui singur motor.
- După aceste considerente, se poate spune că în general există o corelație inversă între controlabilitate și manevrabilitate. Dacă vehiculul este ușor de controlat, atunci este mai puțin manevrabil; dacă este foarte manevrabil, controlul este mai dificil

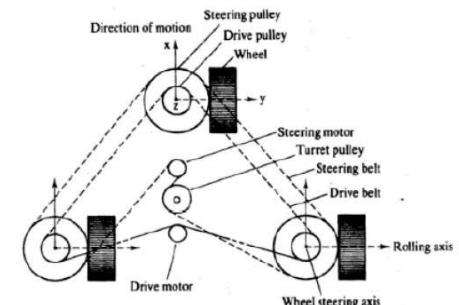
# Exemple de configurații ale roților

- Câteva exemple diferite de configurații ale roților.
- Primul exemplu este unitatea de sincronizare care este adesea folosită pentru robotii interni. Acest mecanism este format din trei roți direcționate dispuse într-un triunghi. Toate roțile sunt acționate și conectate printr-o singură curea, care este acționată de un singur motor, astfel, un singur motor stabilește viteza tuturor roților.



# Exemple de configurații ale roților

- O a doua curea, care este acționată de un motor suplimentar și este conectată și la roți, este utilizată pentru a roti fiecare roată în jurul axei sale verticale individuale. În acest fel, robotul poate fi condus și condus relativ simplu, controlând doar două motoare. Un dezavantaj al acestei metode este că toate roțile sunt direcționate în raport cu șasiul roboților împreună, astfel încât nu există nici o modalitate de reorientare a șasiului direct.
- În consecință, robotul nu este cu adevărat omnidirectional, deoarece nu este capabil să se rotească în jurul axei sale verticale. O altă problemă depinde de drumul estimat, deoarece de fiecare dată când motorul de acționare se angajează, roata care este cea mai apropiată de motor începe să se rotească înainte de cea mai îndepărtată roată, acest lucru provoacă mici modificări în orientarea șasiului, care se acumulează la o mare eroare de orientare atunci când există mai multe modificări ale turăției motorului.

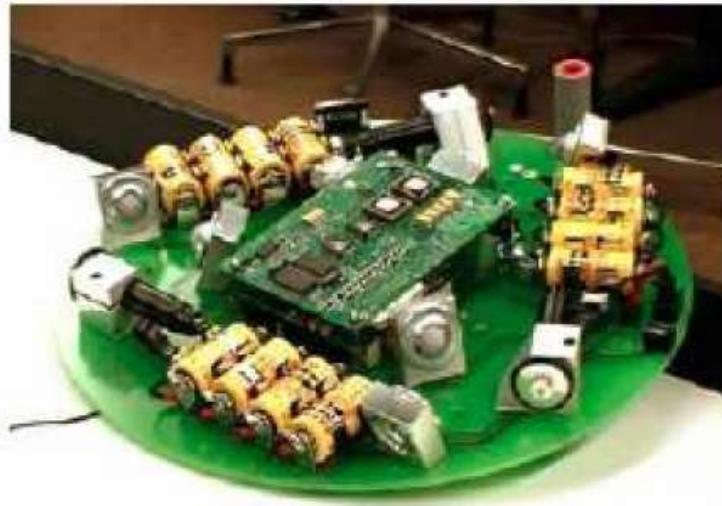
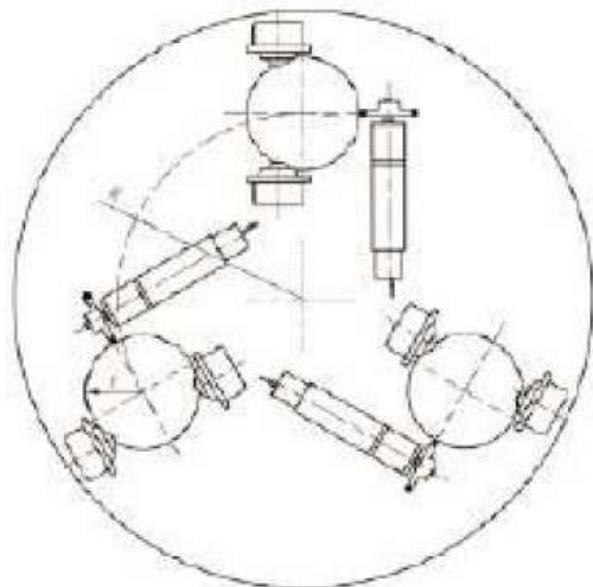


# Exemple de configurații ale roților

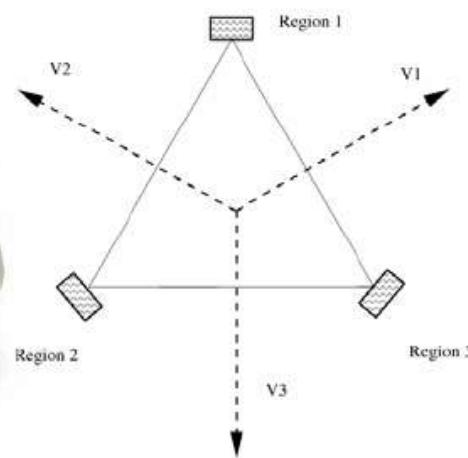
- Vehiculele reale omnidirectionale pot fi construite folosind roti suedeze sau roți sferice. Dacă robotul este capabil să se deplaseze într-o direcție arbitrară din orice poziție în orice moment, este de asemenea holonomic. Următoarele arată trei exemple de vehicule, care folosesc fie trei la 90°/45° roti suedeze sau trei roți sferice.
- Figura urmatoare arată robotul Tribolo care a fost dezvoltat de EPFL. Utilizează trei roți sferice, fiecare roată este condusă de un motor și are trei puncte de contact către șasiu. Două dintre ele sunt rulmenți sferici, iar una dintre ele este o roată care este conectată la axa motorului.
- Pentru a roti robotul în jurul axei sale verticale, toate motoarele sunt acționate cu aceeași viteză; Pentru a conduce robotul drept înainte, un motor trebuie să fie oprit și două motoare trebuie să fie acționate, unul cu viteza  $v$  și celălalt cu viteză  $-v$ . Avantajele acestui concept sunt designul simplu și manevrabilitatea excelentă, dar este limitată la suprafața plană și este capabil doar să transporte sarcini mici.
- O altă abordare pentru a face un robot cu roți omnidirecțional este utilizarea a trei sau patru roți suedeze.
- Robotul Kovan, care a fost dezvoltat de Laboratorul de cercetare Kovan2, este un exemplu de robot care folosește trei roți suedeze de 90° alimentate activ.

# Exemple de configurații ale roților

Tribolo, care a fost proiectat la Institutul Elvețian de Tehnologie din Lausanne (EPFL)

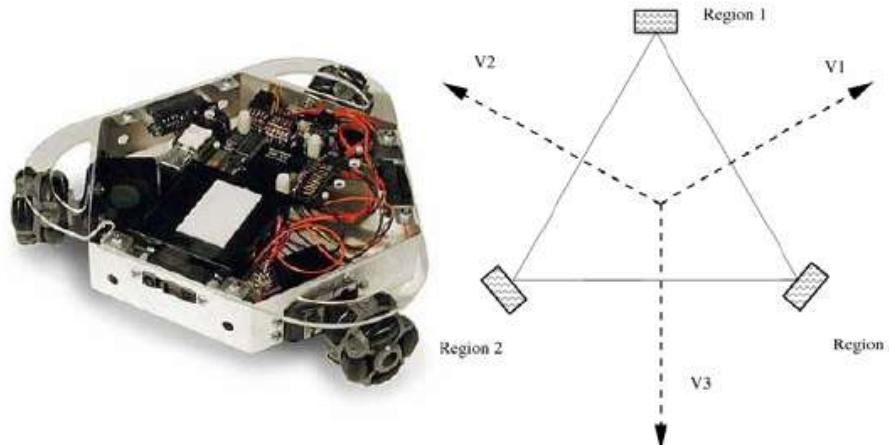


Robotul Kovan



# Exemple de configurații ale roților

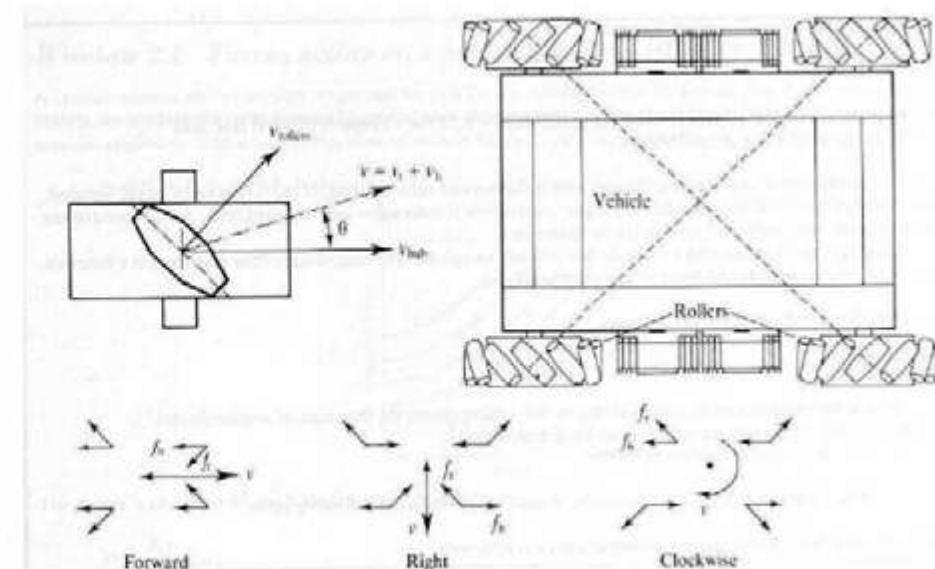
Robotul este capabil să se rotească pe loc conducând toate roțile cu aceeași viteză. În plus, este capabil să conducă în direcțiile indicate de săgețile  $v_1$ ,  $v_2$  și  $v_3$  din figura dreaptă. Pentru a face o mișcare liniară în direcția  $v_1$ , primul motor trebuie să se deplaseze cu viteza  $v$ , al treilea motor cu viteza  $-v$  și al doilea motor trebuie oprit, astfel încât a doua roată să se rostogolească liber pe rolele mici perpendiculare pe axa sa mișcare. Deci, direcția unui robot cu trei roți suzedee de  $90^\circ$  este strâns legată de direcția unui robot folosind trei roți omni.



Robotul Kovan

# Exemple de configurații ale roților

- Robotul Carnegie Mellon Uranus este un al treilea exemplu de robot omnidirectoinal.
- Acest robot folosește patru roți suedeze cu putere activă de  $45^\circ$ . Pentru a muta robotul drept înainte sau înapoi, toate roțile trebuie să se rotească cu aceeași viteză în aceeași direcție. Robotul este capabil să efectueze și o mișcare laterală. Pentru aceasta, perechea de roți diagonale trebuie să se rotească cu aceeași viteză în aceeași direcție ( $v$ ), iar cealaltă pereche de roți diagonale trebuie să se rotească cu aceeași viteză în direcția opusă ( $-v$ ). Mai mult, robotul este capabil să se rotească pe loc. Pentru a roti în sens orar roțile din partea stângă trebuie să se rotească cu viteza  $-v$  iar roțile din partea dreaptă cu viteza  $v$  (figura din dreapta).



# Alte concepte

- Locomoția cu roți și cu picioare sunt cele mai utilizate și investigate mecanisme de locomoție pentru robotii mobili.
- Există însă și alte concepte, două dintre ele sunt locomoție cu alunecare / patinare și o combinație de locomoție cu roți și picioare.
- Locomoția cu roți oferă unele dezavantaje, în special în cazul vehiculelor omnidirectionale care folosesc roți sferice sau suedeze, pe teren accidentat și liber, din cauza frecării de rulare din ce în ce mai mare care provoacă ineficiențe de putere; în plus, vehiculele care folosesc roți sunt capabile să traverseze denivelari mai mici decât diametrul roților vehiculelor.

# Miscarea (locomoție) prin alunecare / patinare

- Între vehiculele cu miscare cu alunecare / patinare care utilizează senile precum un tanc, un exemplu de robot care utilizează acest concept este robotul Nanokhod. Vehiculul este direcționat prin deplasarea șenilelor cu viteză diferită în aceeași direcție sau în sens invers.
- Utilizarea senilelor oferă o suprafață mult mai mare de contact la sol, astfel încât tractiunea vehiculelor pe suprafață liberă este mult mai bună decât tractiunea roților, în plus vehiculul este capabil să conducă pe un teren mai dur decât vehiculele cu roți (este de exemplu capabil să traverseze goluri mai mari). Datorită căilor de contact mari, vehiculele de acest gen își schimbă, de obicei, direcția prin patinare, unde o mare parte a vehiculului alunecă pe pământ, astfel încât vehiculul are nevoie de mult spațiu pentru a schimba orientarea șasiului. Mișcarea de patinare are câteva alte dezavantaje care sunt asociate cu metoda de direcție în sine și cu suprafața.

# Miscarea (locomoție) prin alunecare / patinare

- Atunci când suprafața este dură (de exemplu, un drum pietruit), vehiculul nu este capabil să alunece împotriva acestuia, acest lucru mărește frecarea în timpul deplasării și, prin aceasta, consumul de energie al vehiculului. Mai mult decât atât, schimbarea exactă a șasiului robotului în poziție și orientare este greu de prevăzut datorită mișcării de alunecare și schimbării frecării cu solul.



# Roți pășitoare

- Robotii cu picioare sunt capabili să urce scările și să călătorească pe teren accidentat, dar oferă unele ineficiențe pe suprafața plană, iar controlul roboților este dificil. Robotii cu roti sunt foarte eficienți din punct de vedere energetic pe suprafața dura, chiar și la viteza mare, dar majoritatea sunt cu siguranta capabili să urce trepte. O idee este o soluție hibridă care combină avantajele locomoției cu picioare și cu roți. Figura prezintă “creveții”, care a fost dezvoltat de EPFL – École polytechnique fédérale de Lausanne, un robot care folosește „roți de mers” pentru locomoție.
- “Creveții” au șase roți motorizate și este capabil să urce obstacole care sunt de două ori mai mari decât diametrul roții sale.



# Roți pășitoare

- “Creveții” au cate o roată directoare în față și în spate și două roți dispuse într-un boghiu pe fiecare parte (patru în total). Direcția se realizează prin sincronizarea direcției roții din față și din spate și a diferenței de viteză a roților din boghiu.
- Această metodă de direcție permite manevre de înaltă precizie cu o mișcare de alunecare minimă a celor patru roți din boghiu.
- Una dintre cele mai interesante caracteristici ale “creveților” este că este capabil să depășească obstacolele în mod pasiv, ceea ce înseamnă că robotul nu are senzori pentru a detecta un obstacol, structura mecanică a robotului este capabilă să adapteze profilul terenului.

# Bibliografie

- [1] S.Roland, *Introduction to autonomous mobile robots*, , pp. 12-45, 2004
- [2] M. Hardt, M. Stelzer, O. von Stryk, *Modellierung und Simulation der Dynamik des Laufens bei Roboter, Tier und Mensch, Thema Forschung, Vol.2/2002, pp 56-63* ,2002
- [3] E. Cuevas, D. Zaldivar, R. Rojas, *Bipedal robot description, Technical Report B 04-19, Fachbereich Mathematik und Informatik, Institut für Informatik, Freie Universität Berlin*, 2004
- [4] M.H. Raibert, H. Brown, M. Chepponis, E. Hastings, J. Koechling, K.N. Murphy, S.S. Murthy, and A. Stentz, *Dynamically Stable Legged Locomotion, Progress Report: October 1982 - October 1983*, Robotics Institute of Carnegie Mellon University, pp. 1-11, 1983
- [5] <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/robots.html>
- [6] <http://www.sony.net/SonyInfo/QRIO/technology/>
- [7] M. Vukobratovic, B. Borovac, *Zero Moment Point – Thirty five years of its life*, International Journal of Humanoid Robotics vol. 1, pp. 157–173, 2004
- [8] E. Cuevas, D. Zaldivar, R. Rojas , *Walking trajectory control of a biped robot, Technical report*, Freie Universität Berlin, 2004
- [9] [http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/Spring\\_Flamingo/Spring\\_Flamingo.html](http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/Spring_Flamingo/Spring_Flamingo.html)
- [10] <http://www.sony.net/Products/aibo/>
- [11] C. Queiroz, N. Gonçalves, P. Menezes, *A Study on Static Gaits for a Four Legged Robot*, International Conference CONTROL'2000, 2000, Cambridge, UK
- [12] S. Cordes, K. Berns, *A Flexible Hardware Architecture for the Adaptive Control of Mobile Robots*, 3rd Symposium on Intelligent Robotic Systems '95, 1995
- [13] L.P. Kaelbling, L.M. Littman and A.W. Moore, *Reinforcement learning: a survey*, *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 4, pp. 237–285, 1996
- [14] P.Maes, R. A. Brooks, *Learning to Coordinate Behaviors, 8th National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 796-802, Boston, 1990
- [15] [www.kovan.ceng.metu.edu.tr/index](http://www.kovan.ceng.metu.edu.tr/index)
- [16] R. Kurazume, K. Yoneda , *Forward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle*, *International Conference on Robotics and Automation, 2001*, pp. 3172 - 3180
- [17] H. Yu, S. Dubowsky, A. Skwarsky, *Omni-Directional mobility using active split offset castors*, *Journal of mechanical design*, vol. 126, pp. 822-829
- [18] M. Wada, H.H. Asada, *Design and control of a variable footprint mechanism for holonomic omnidirectional vehicles and its application to wheelchairs, Robotics and Automation, Volume: 15*, pp. 978-989
- [19] <http://asl.epfl.ch/index.html?content=research/systems/Shrimp/shrimp.php>
- [20] <http://asimo.honda.com/>
- [21] <http://asl.epfl.ch/research/systems/Shrimp/shrimp.php>
- [22] <http://asl.epfl.ch/research/projects/FieldAndSpace/images/nanokhod.jpg>

# Curs 9

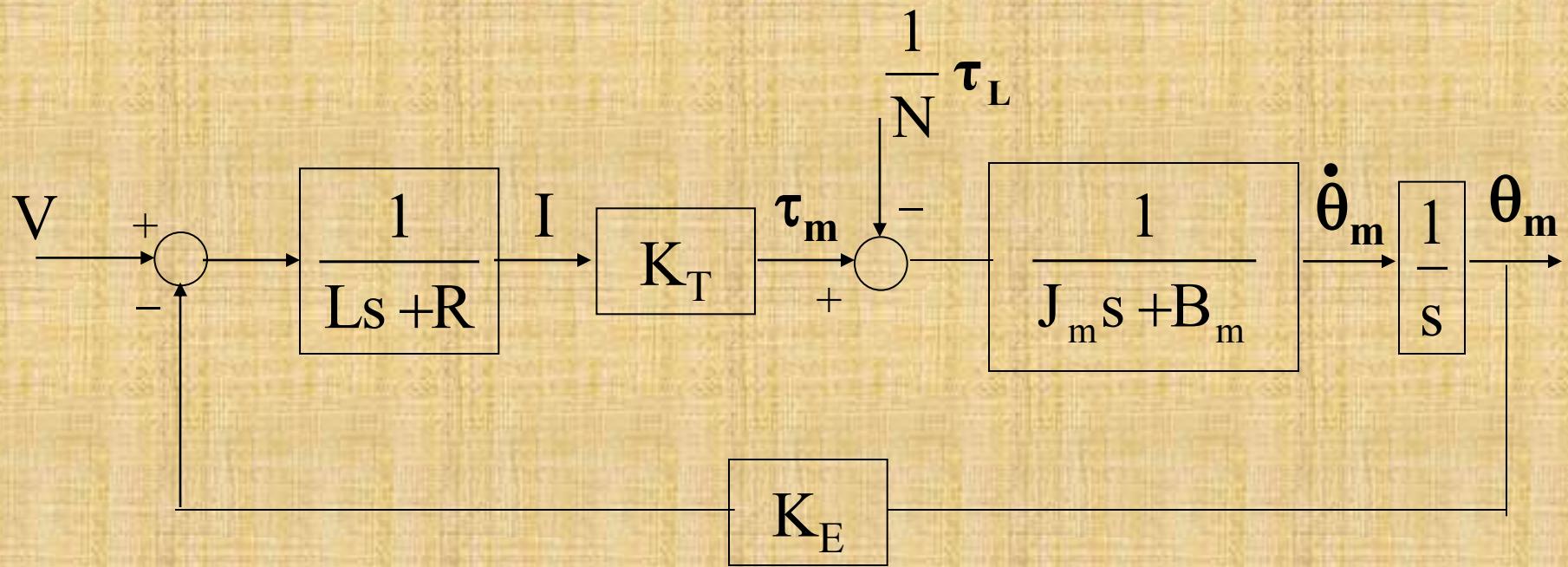
**Controlul poziției robotului**

# Controlul articulatiei independente

- fiecare servomotor (de exemplu motor) este controlat independent

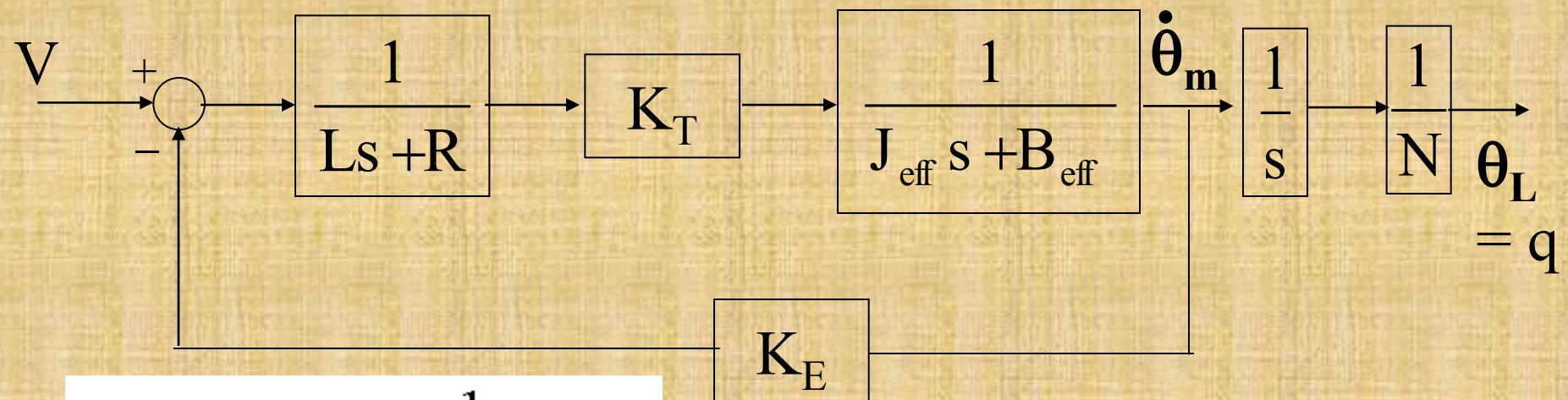
Din dinamica actuatorului

$$\tau_L = Dq + H(q, \dot{q}) + B_L \ddot{q}$$



# Controlul articulatiei independente

- ținând cont de sarcina de inertie ( $J_L$  sau  $D$  parte din model dinamic) & amortizarea la sarcină :



$$J_{eff} = J_m + \frac{1}{N^2} J_L$$

$$B_{eff} = B_m + \frac{1}{N^2} B_L$$

# Controlul articulatiei independente

Notă: Termeni de cuplare (Centrifugă + Coriolis)  
sunt neglijabile

$$\frac{L}{R} \rightarrow \phi \quad \left( \frac{L}{R} \right), \text{ mai mic decat } \frac{J_{\text{eff}}}{B_{\text{eff}}})$$



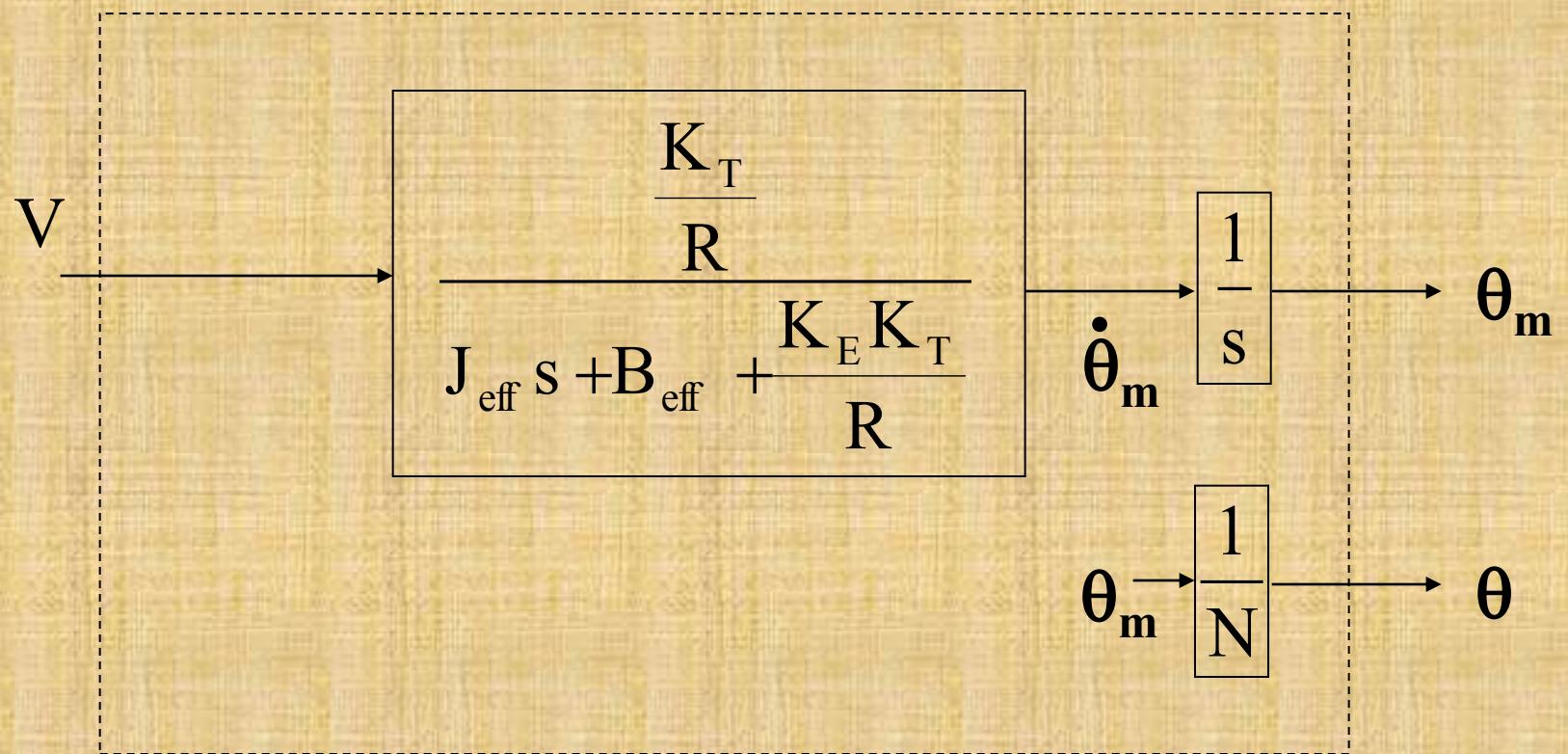
$$\boxed{\frac{1}{L_s + R}}$$

$K_T$   $\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow$   
devine

$$\boxed{\frac{K_T}{R}}$$

# Controlul articulatiei independente

Sistemul rezultat devine: ecuația liniară diferențială de ordinul 2 pentru fiecare îmbinare / actuator.

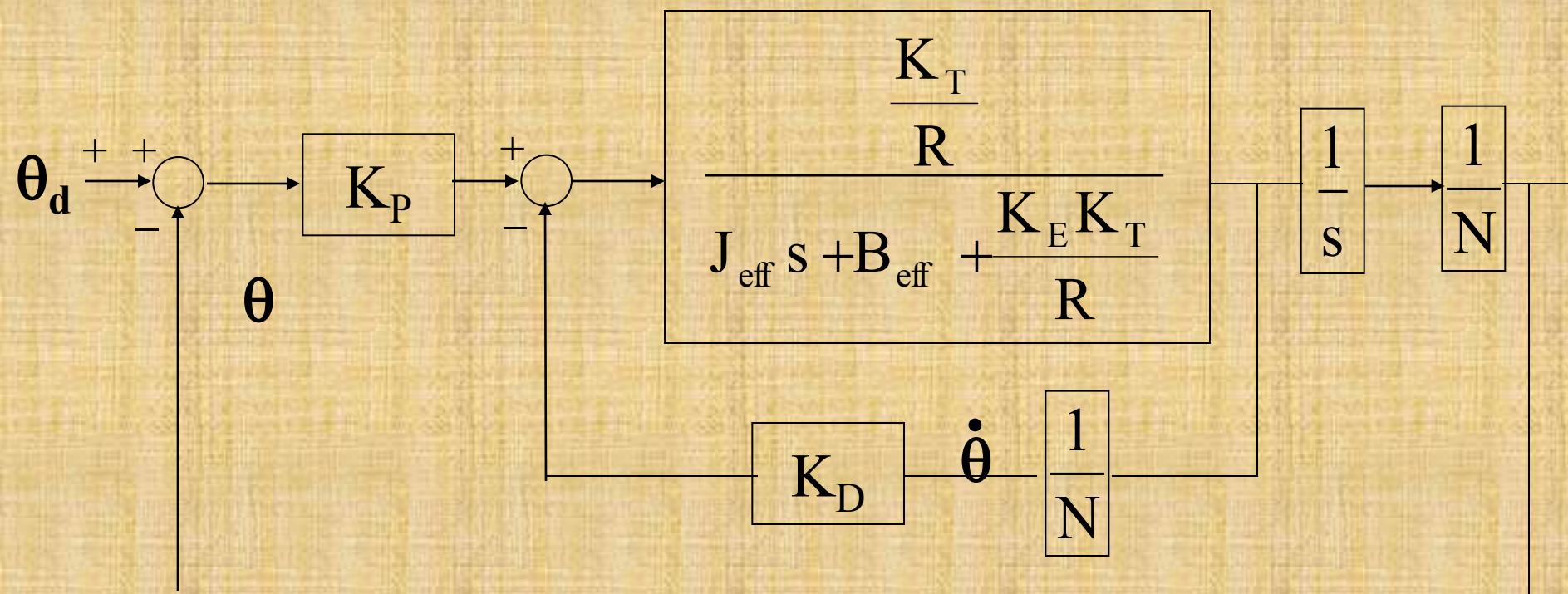


# Controlul articulatiei independente

## Compensator PD

$$V = K_P(\theta_d - \theta) - K_D s\theta$$

in domeniul Laplace



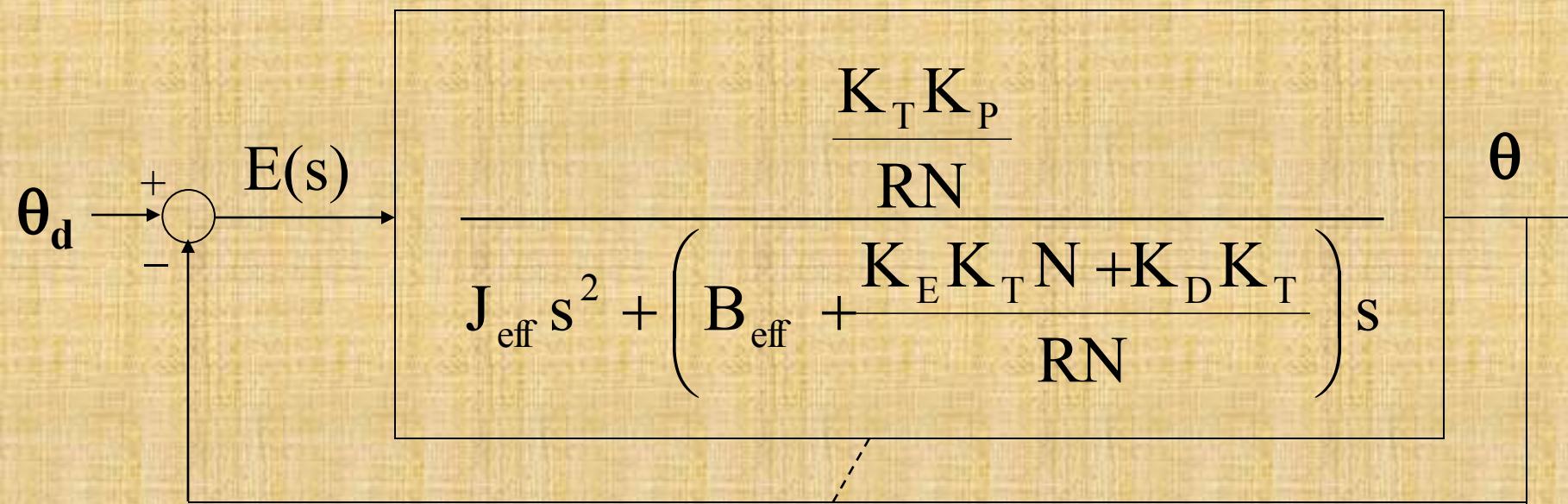
# Controlul articulatiei independente

Functia de transfer globala  $K_P$

$$\frac{\theta(s)}{\theta_d(s)} = \frac{\frac{K_P K_T}{RN}}{J_{eff} s^2 + \left( B_{eff} + \frac{K_E K_T N + K_D K_T}{RN} \right) s + \frac{K_P K_T}{RN}}$$

# Controlul articulatiei independente

Erori in stare stationara?



$$E(s) = \frac{\theta_d(s)}{1 + \left[ \dots \right]}$$

# Controlul articulatiei independente

$$\lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = e_{ss}$$

Eroare in regim stabilizat

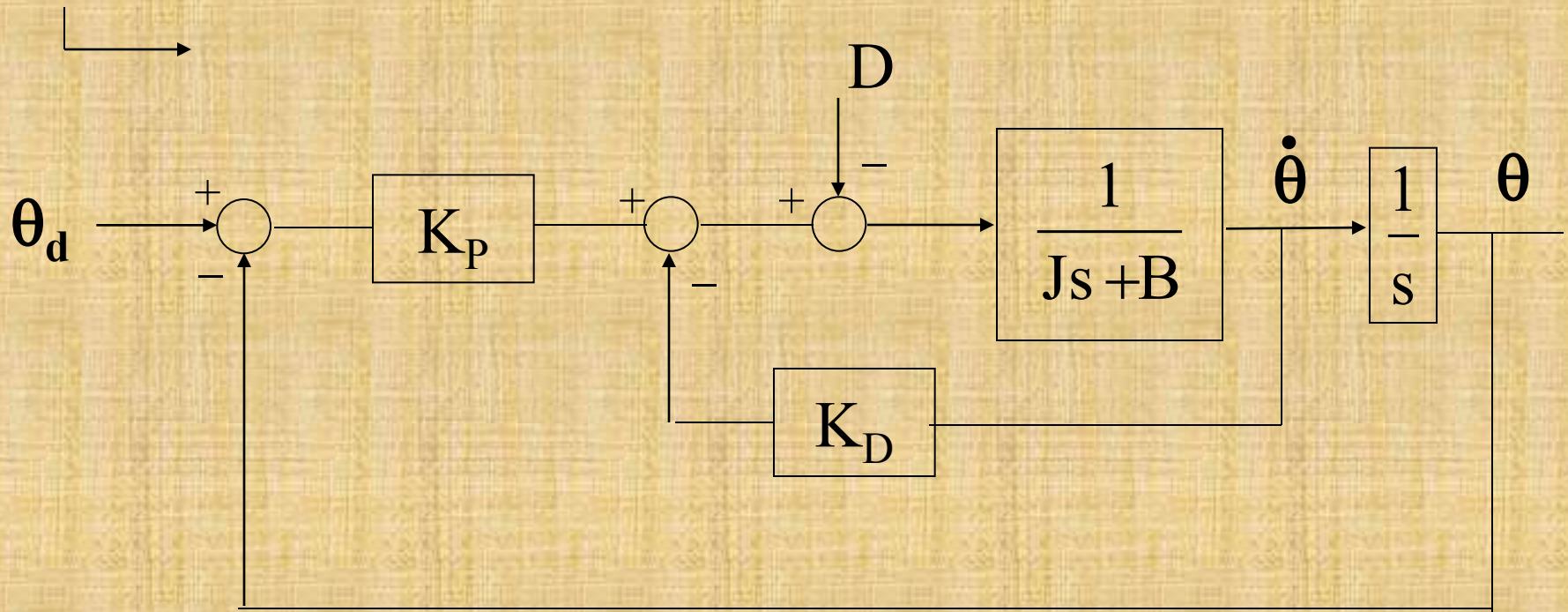
Pentru intrare de tip treapta,  $\theta_d(s) = \frac{\theta_d}{s}$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s \frac{\theta_d}{s}}{1 + \left[ \dots \right]}$$

$$= \frac{\theta_d}{1 + \infty} = 0$$

# Controlul articulatiei independente

Dar, in realitate, sunt perturbatii



# Controlul articulatiei independente

$$\theta(s) = \frac{(K_D s + K_P) \theta_d(s) - s D(s)}{J s^2 + (B + K_D) s + K_P}$$

$$\begin{aligned} E(s) &= \theta_d(s) - \theta(s) \\ &= \frac{[J s^2 + (B + K_D) s] \theta_d(s) + D(s)}{J s^2 + (B + K_D) s + K_P} \end{aligned}$$

# Controlul articulatiei independente

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

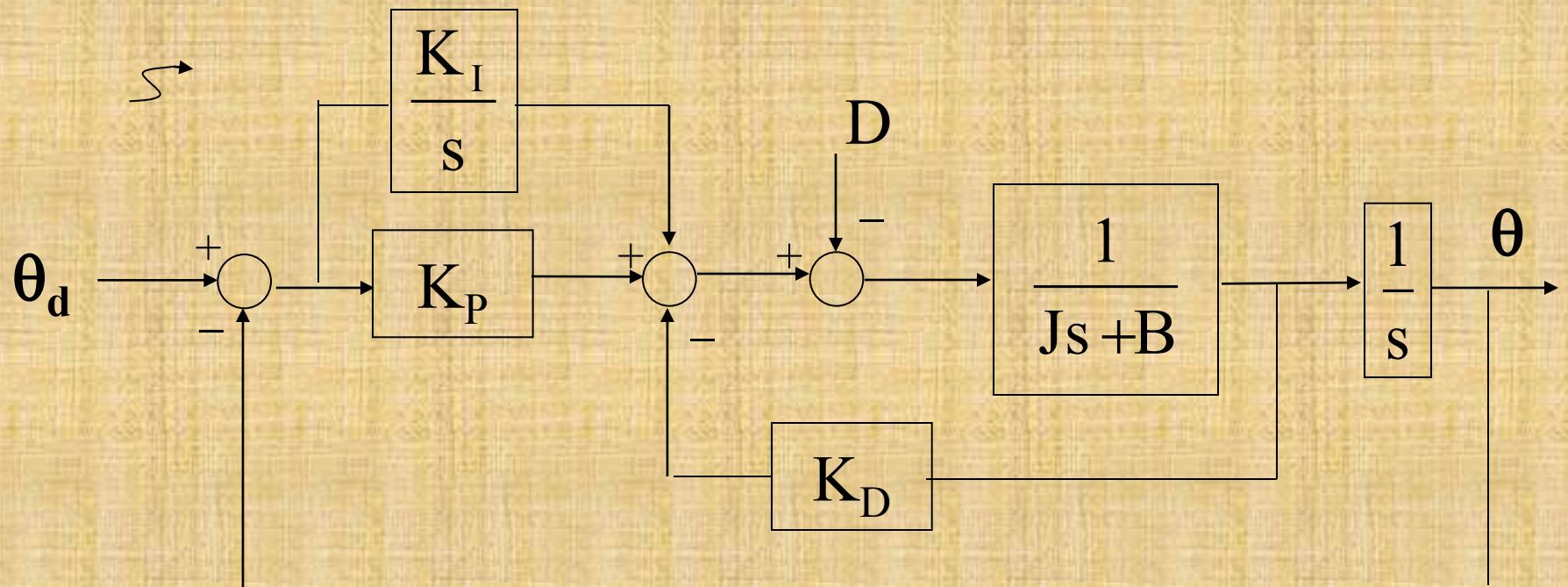
Pentru intrare treapta  $\theta_d(s) = \frac{\theta_d}{s}$   
perturbatie treapta  $D(s) = \frac{D}{s}$

$$e_{ss} = \frac{0 \cdot \theta_d + D}{K_p} = \frac{D}{K_p} \neq 0$$

# Controlul articulatiei independente

Adaugarea controlului integrator => compensator PID

$$V(s) = K_P (\theta_d - \theta) + \frac{K_I}{s} (\theta_d - \theta) - K_D s \theta$$



# Controlul articulatiei independente

$$\theta(s) = \frac{(K_D s^2 + K_P s + K_I) \theta_d(s) - s D(s)}{J s^3 + (B + K_D) s^2 + K_P s + K_I} \curvearrowright \text{ordinul } 3$$

$$E(s) = \theta_d(s) - \theta(s) = \frac{[J s^3 + B s^2] \theta_d(s) + s D(s)}{J s^3 + (B + K_D) s^2 + K_P s + K_I}$$

Pt intrare treapta+ perturbatie treapta,  $\theta_d(s) = \frac{\Theta_d}{s}$ ,  $D(s) = \frac{D}{s}$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = 0$$

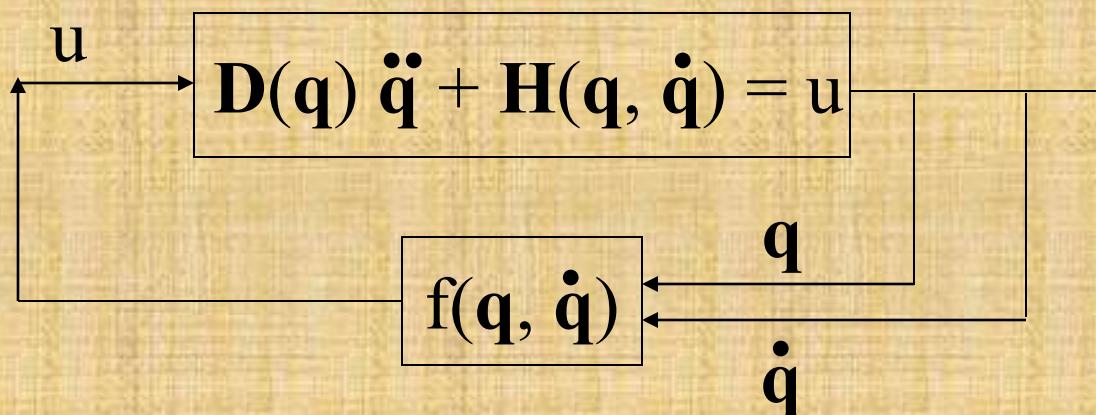
Eroare in regim stabilizat 0

# Controlul dinamicii inverse

sau metoda cuplului calculat

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{u} \quad (1) \quad (\text{Planificat pentru control})$$

Ideea dinamicii inverse este de a căuta o lege de control al feedback-ului non-liniar  $\mathbf{u} = f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  (2) care atunci când este substituit în (1) rezultă un sistem liniar cu buclă închisă.



# Controlul dinamicii inverse

Pentru sistemele generale neliniare, o astfel de lege de control (2) poate fi destul de dificilă sau imposibil de găsit. Totuși, pentru sistemele de manipulare, problema este ușoara

Se alege

$$u = D(q)v + H(q, \dot{q}) \quad (3)$$

deoarece  $D(q)$  este inversabil

$$\begin{aligned} D(q)\ddot{q} &= D(q)v \\ \ddot{q} &= D(q)^{-1}D(q)v \\ \ddot{q} &= v \end{aligned} \quad (4)$$

unde  $v$  reprezintă o nouă intrare în sistem, care este aleasa

Nota: (4) este posibilă numai pentru că  $D(q)$  este întotdeauna inversabilă

# Controlul dinamicii inverse

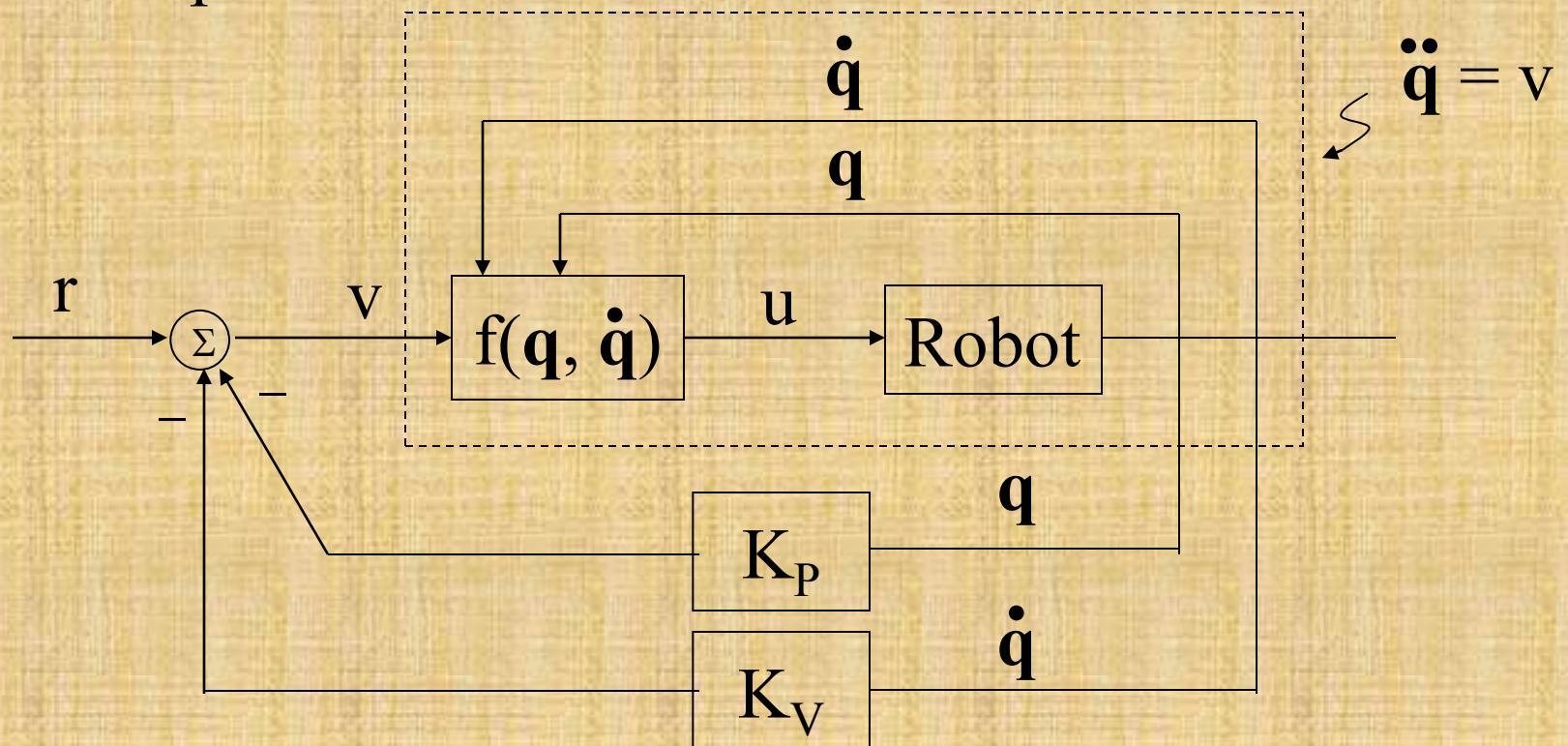
- De reținut că sistemul liniar (4) este un sistem de n integratoare duble necuplate
- Noul sistem cu intrare  $v$  este liniar și necuplat
- Legea controlului, (3), se numește „controlul dinamicii inverse” numit și „cuplu calculat”
- Aceasta înseamnă că fiecare intrare  $v_k$  poate fi proiectată pentru controlul unui sistem liniar
- Mai mult, dacă  $v_k$  este setat ca funcție de  $q_k$  și derivatele lui  $v_k$  va afecta  $q_k$  independent de mișcarea altor legături (articulații)

# Controlul dinamicii inverse

- Se alege

$$V = -K_V \dot{q} - K_P q + r \quad (5)$$

unde  $K_V$  &  $K_P$  sunt matricele diagonale de castig de viteza si pozitie



# Controlul dinamicii inverse

Sistemul în bucla inchisă este

$$\ddot{\mathbf{q}} + K_V \dot{\mathbf{q}} + K_P \mathbf{q} = \mathbf{r} \quad (6)$$

Dacă se alege introducerea unei referințe

$$\mathbf{r}(t) = \ddot{\mathbf{q}}_d(t) + K_V \dot{\mathbf{q}}_d(t) + K_P \mathbf{q}_d(t) \quad (7)$$

Atunci:

$$\ddot{\mathbf{q}} + K_V \mathbf{q} + K_P \mathbf{q} = \ddot{\mathbf{q}}_d(t) + K_V \dot{\mathbf{q}}_d(t) + K_P \mathbf{q}_d(t)$$

sau

$$\ddot{\mathbf{e}}(t) + K_V \dot{\mathbf{e}}(t) + K_P \mathbf{e}(t) = 0 \quad (8)$$

unde  $\mathbf{e}(t) = \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t)$  eroare de urmarire

# Controlul dinamicii inverse

$$\left. \begin{array}{l} s^2 + K_V s + K_P = 0 \\ s_{1,2} = \frac{-K_V \pm \sqrt{K_V^2 - 4K_P}}{2} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \\ s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \end{array}$$

Pentru răspuns critic amortizat

$$K_V^2 = 4K_P \quad \Leftrightarrow \quad \xi = 1$$

$$\frac{-K_V}{2} = -\omega_n \quad K_V^2 = 4\omega_n^2 = 4K_P$$

$$K_V = 2\omega_n \quad K_P = \omega_n^2$$

# Controlul dinamicii inverse

.: Critic amortizat                  =>                  alegerea pentru matricile de câștig sunt :

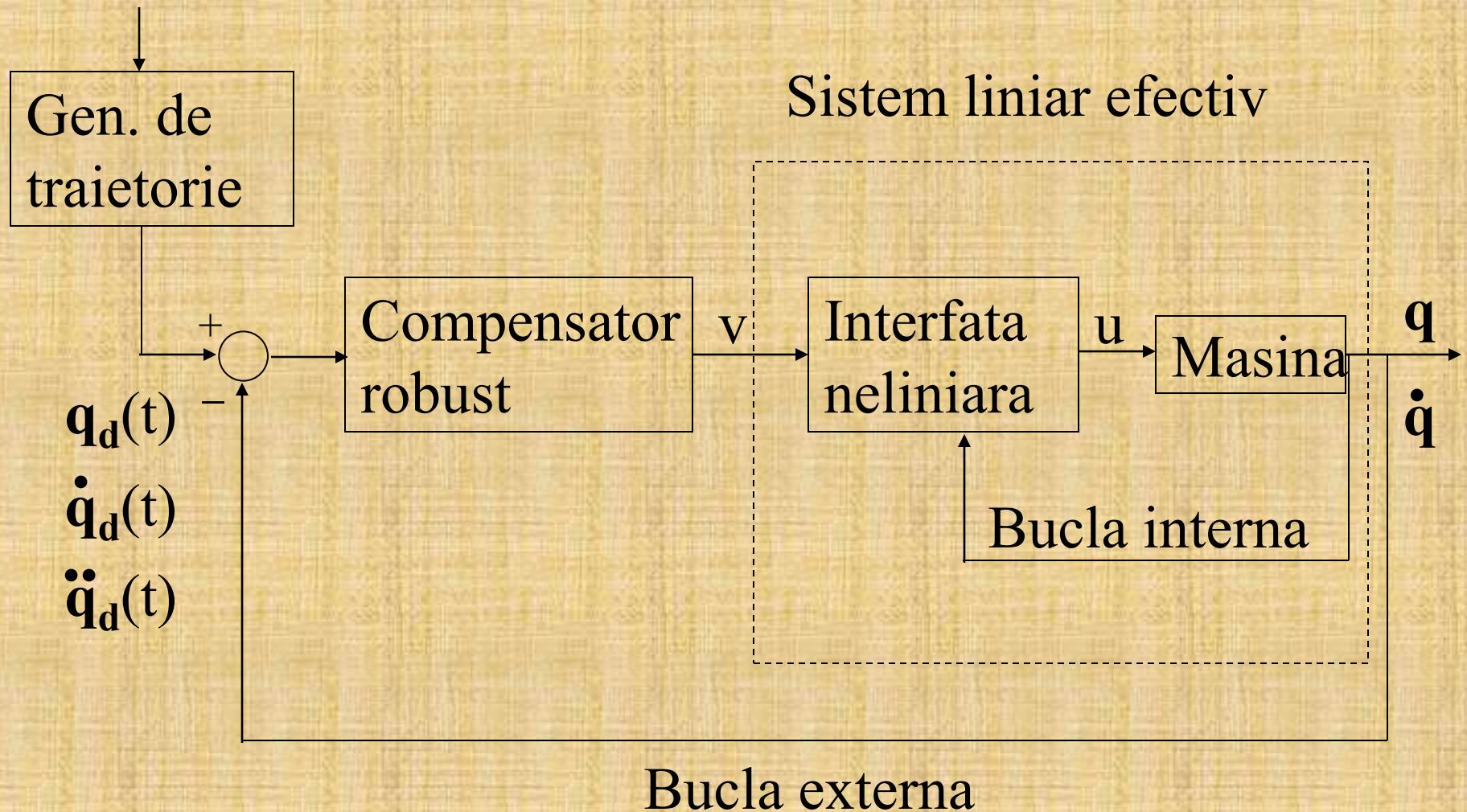
$$K_V = \text{diag} [2\omega_{n_1}, 2\omega_{n_2}, \dots, 2\omega_{n_n}]$$

$$K_P = \text{diag} [\omega_{n_1}^2, \omega_{n_2}^2, \dots, \omega_{n_n}^2] \quad (9)$$

- Calculul legii de control (4) [cuplul calculat] este intensiv din punct de vedere al calculului  
[Pentru Puma 6-DOF, necesită ~ 10 pagini de operatii]  
=> implementarea hardware, deoarece legea de control trebuie calculată on-line (în timp real)

# Controlul dinamicii inverse

- Noțiunea de CONTROL INNER-LOOP / OUTER-LOOP



# Controlul dinamicii inverse

- interfata neliniara cu intrarile  $v$ ,  $q$  and  $\dot{q}$  & iesirea  $u$ , poate fi implementata fizic
- Perioada tipică a eșantionarii este de  $10 \times$  mai rapid decât lățimea de bandă a sistemului.

# Probleme de implementare și robustete

- Modelul exact este necunoscut
  - erori ale parametrilor (încărcătură efectiva)
  - dinamica fara model
- Prea complexa la nivel de calcul,  
simplificarea modelului dinamic

Legea controlului (mai realist)

$$u = \overset{\circ}{D}(q) v + h(q, \dot{q})$$

$$\overset{\circ}{D} \not\equiv D$$

$$\overset{\circ}{h} \not\equiv h$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta D = \overset{\circ}{D} - D \\ \Delta h = \overset{\circ}{h} - h \end{array} \right\} \text{erori}$$

# Probleme de implementare și robustete

Atunci

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{D}}\mathbf{v} + \mathbf{h} &= \mathbf{D}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} \\ \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{D}^{-1}\dot{\mathbf{D}}\mathbf{v} + \mathbf{D}^{-1}\Delta\mathbf{h} \\ \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{v} + \underbrace{(\mathbf{D}^{-1}\dot{\mathbf{D}} - \mathbf{I})\mathbf{v} + \mathbf{D}^{-1}\Delta\mathbf{h}}_{\eta} \quad (10) \\ &\qquad\qquad\qquad \text{Comparat cu (4)}\end{aligned}$$

definind

$$\mathbf{E} = \mathbf{D}^{-1}\dot{\mathbf{D}} - \mathbf{I}$$

Si stabilind

$$\mathbf{v} = \ddot{\mathbf{q}}_d - K_V(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) - K_P(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) \quad (11)$$

# Probleme de implementare și robustete

$$\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}_d - K_V(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + K_P(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) + E_v + \mathbf{D}^{-1}\Delta h$$

sau

$$\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}}_d + K_V(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) + K_P(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) = E_v + \mathbf{D}^{-1}\Delta h$$

sau

$$\mathbf{e} + K_V \dot{\mathbf{e}} + K_P \mathbf{e} = \eta \quad (12)$$

unde

$\mathbf{e}$  este acum  $\mathbf{q} - \mathbf{q}_d$  eroare de urmarire

$\eta = E_v + \mathbf{D}^{-1}\Delta h$  incertitudinea

$\eta = E (\ddot{\mathbf{q}}_d - K_V \dot{\mathbf{e}} - K_P \mathbf{e}) + \mathbf{D}^{-1}\Delta h \quad (13)$

# Probleme de implementare și robustete

(12) este încă un sistem neliniar cuplat deoarece  $\eta$  este o funcție neliniară a lui  $e$

- stabil sau nu ?
- nu putem să crestem câștigurile suficient de mari și să pretindem stabilitate, deoarece  $\eta$  depinde și de  $v$ , dat de (11) și, prin urmare, poate ajunge la câștiguri și mai mari!

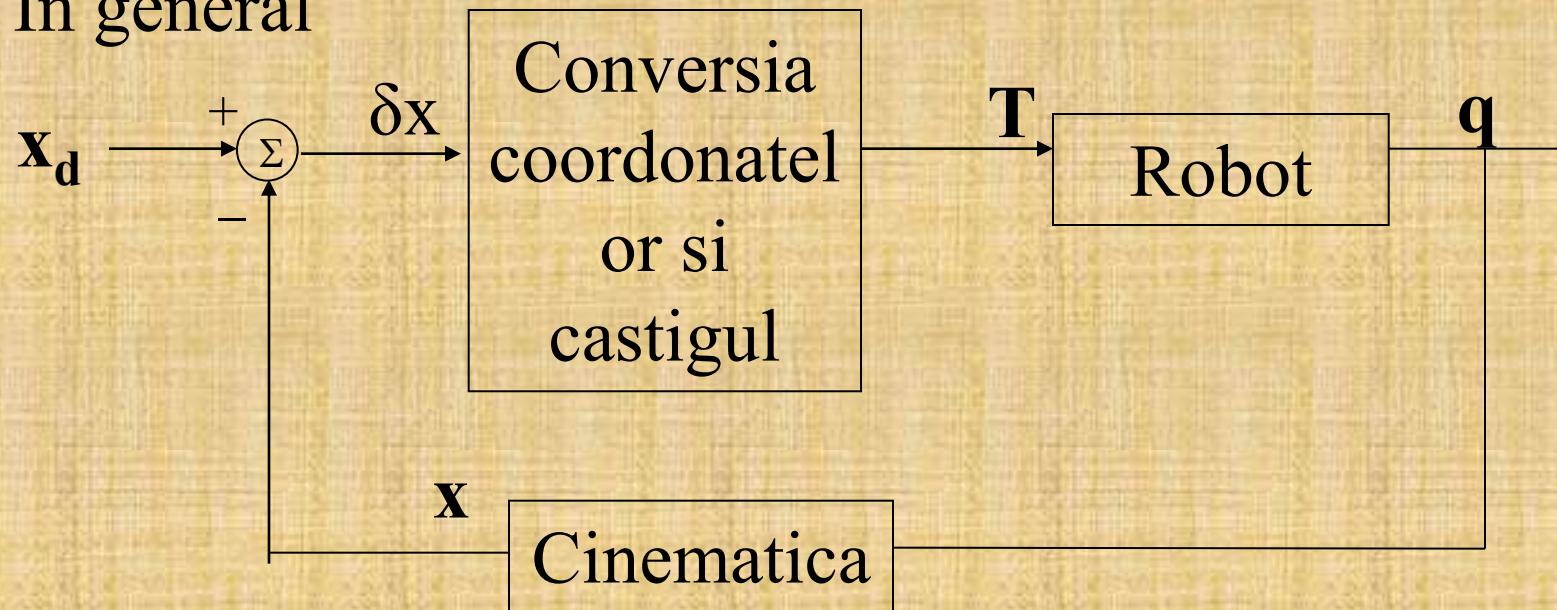
[sistemul devine]

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{v} + \boldsymbol{\eta}$$

# Scheme de control bazate pe sistemul cartezian

→ Scheme de control care se bazează pe determinarea erorilor în spațiul cartezian

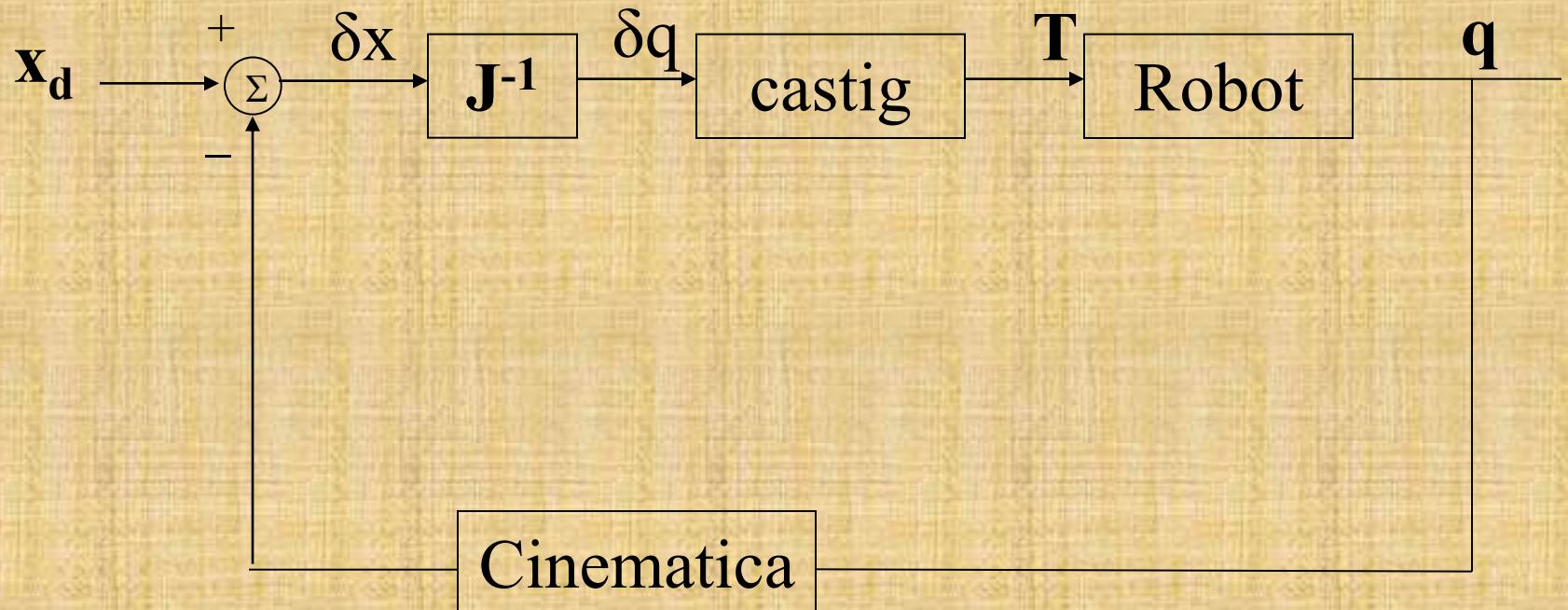
In general



- transformări cinematice efectuate în interiorul buclei de control
- feedback-ul vitezei nu este afişat, dar este uşor de adăugat

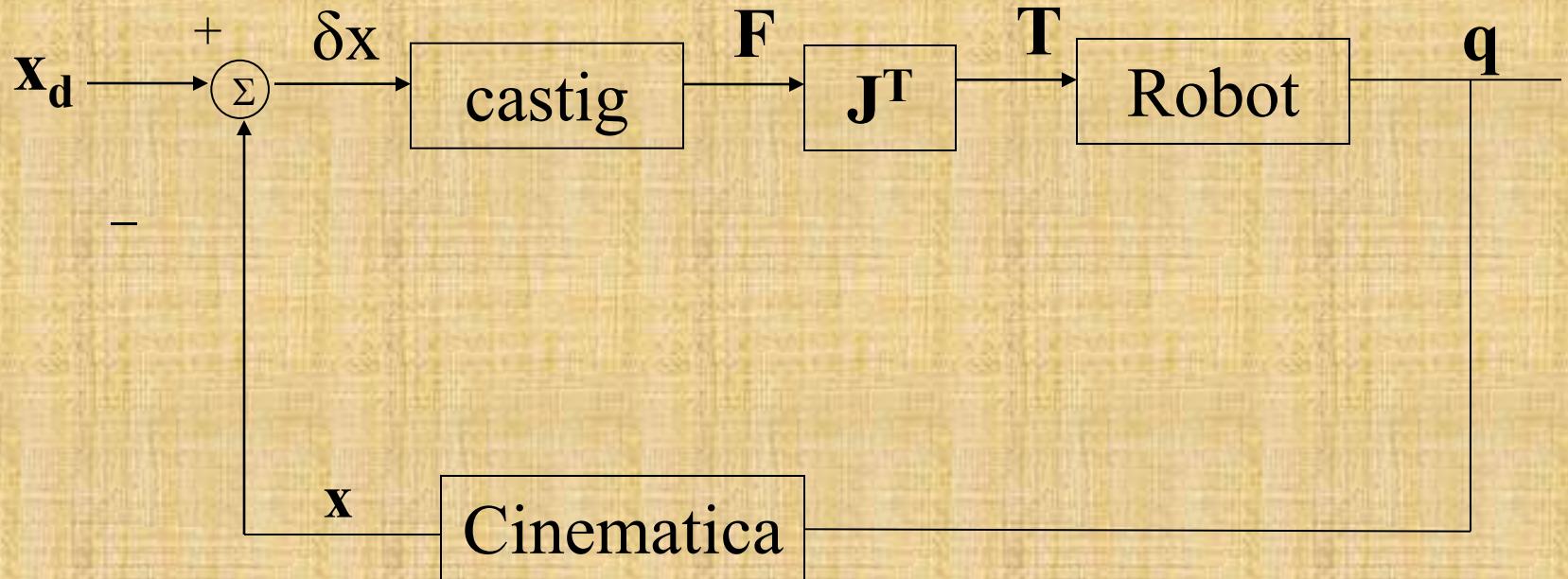
# Scheme de control bazate pe sistemul cartezian

Controler Jacobian invers



# Scheme de control bazate pe sistemul cartezian

Controler Jacobian transpus



$F$  dacă se aplică la E-E, ar împinge efectorul final într-o direcție care ar reduce eroarea carteziană  $\delta x$

# Dinamica manipulatorilor în spațiul cartezian

$$\tau = D(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \underbrace{b(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}_{\begin{array}{l} \text{Coriolis/} \\ \text{Centrifugal} \end{array}} + \underbrace{\mathbf{G}(\mathbf{q})}_{\begin{array}{l} \text{amortizare} \\ \text{prin frecare} \\ \text{gravitatie} \end{array}}$$

$$\tau = D(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + v(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad \text{in spatiul articulatiei}$$

(1)

# Dinamica manipulatorilor în spațiul cartezian

In spatiul cartesian,

$$\mathcal{F} = D_x(q) \ddot{x} + V_x(q, \dot{q}) + G_x(q) \quad (1A)$$

$\mathcal{F}$  este o forță fictivă care acționează în efectorul final al robotului care poate fi aplicată de actuatoare la articulații :

$$\tau = J^T(\theta) \mathcal{F} \quad (2)$$

unde  $J(\theta)$  este scris în același cadru ca și  $x$  &  $\mathcal{F}$

# Dinamica manipulatorilor în spațiul cartezian

Inmultind (1) cu  $(J^T)^{-1}$ ,

$$(J^T)^{-1}\tau = (J^T)^{-1}D(q) \ddot{q} + (J^T)^{-1}v(q, \dot{q}) + (J^T)^{-1}G(q)$$
$$F = (J^T)^{-1}( D(q) \ddot{q} + v(q, \dot{q}) + G(q, q) ) \quad (3)$$

dar

$$\dot{x} = J\dot{q}$$
$$\ddot{x} = J\ddot{q} + J\dot{q}$$
$$\ddot{q} = (J)^{-1}(x - J(\dot{q}) q) \quad (4)$$

# Dinamica manipulatorilor în spațiul cartezian

Inlocuind (4) în (3)

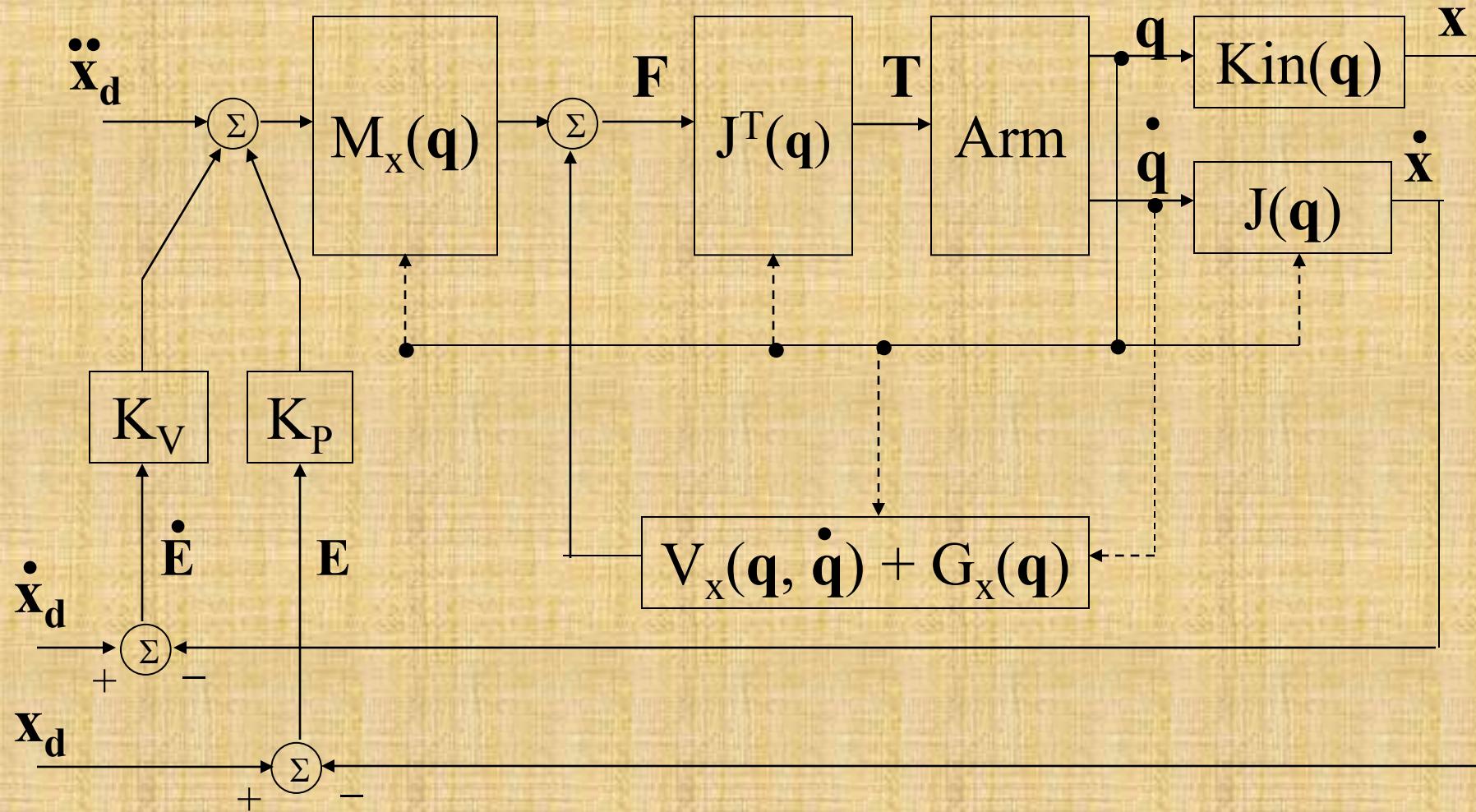
$$\begin{aligned}\mathcal{F} &= (\mathbf{J}^T)^{-1} [\mathbf{D}(\mathbf{q})[\mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1}] (\ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{j}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{v}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q})] \\ &= (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1} \ddot{\mathbf{x}} - (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1} \dot{\mathbf{j}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \\ &\quad + (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{v}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{q})\end{aligned}\tag{5}$$

Comparand (5) cu (1A)

$$\begin{aligned}\mathbf{D}_x(\mathbf{q}) &= (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1} \\ \mathbf{V}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= (\mathbf{J}^T)^{-1} [\mathbf{v}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{J}(\mathbf{q})^{-1} \dot{\mathbf{j}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}] \\ \mathbf{G}_x(\mathbf{q}) &= (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{q})\end{aligned}\tag{6}$$

# Controlul dinamicii inverse în spațiul cartezian

Schema de control bazată pe modelul cartezian

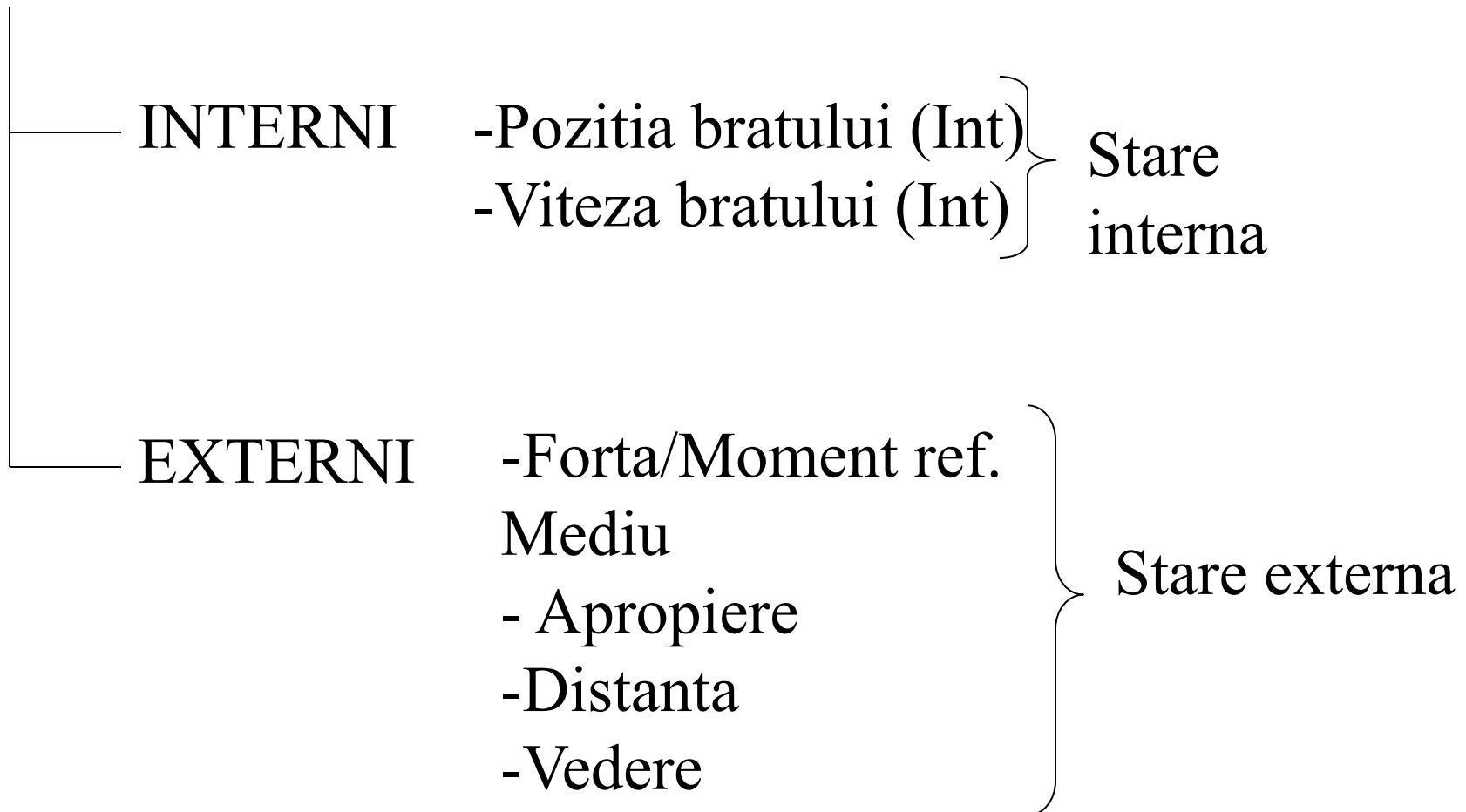


# **Simturile robotului**

I

# Simturile robotului

## SENZORI



# Simturile robotului

Senzori localizare articulatie

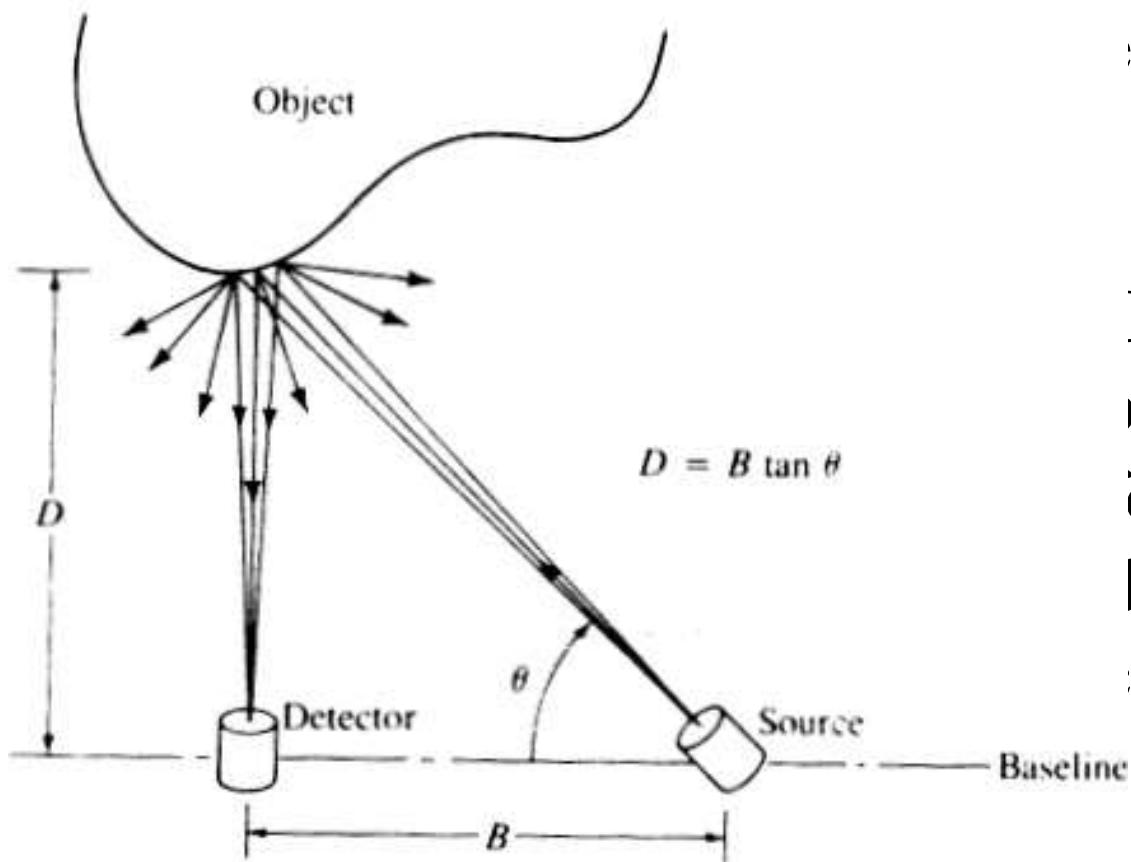
- Encoderi incrementali  
(au nevoie de referinta  
initiala- punct de plecare)
- Encoderi absoluti

Senzori pentru viteza articulatiilor

- Tahometre

# Percepția distanțelor

- Triangulație

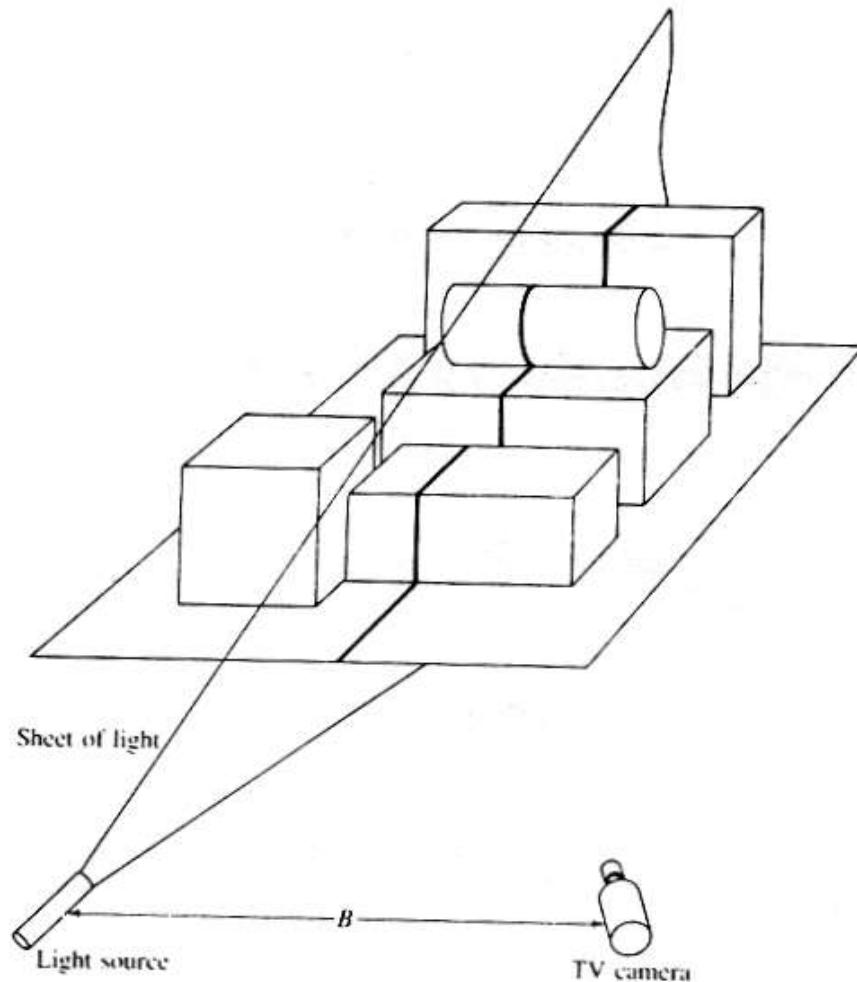


-Baleierea sursei (v  
ăste variabilă)  
B este cunoscut

Când detectorul vede  
un punctul luminos în  
ocalizare, v este  
eterminate și D  
calculata.

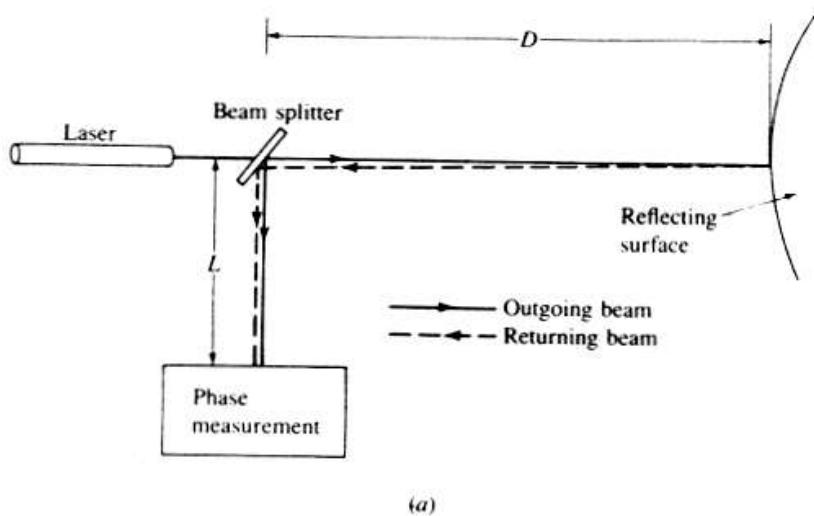
# Perceptia distantelor

- Iluminarea structurală

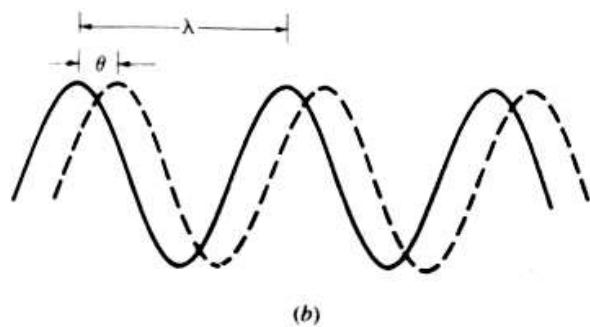


# Percepția distanțelor

- Gasirea intervalului de zbor



(a)



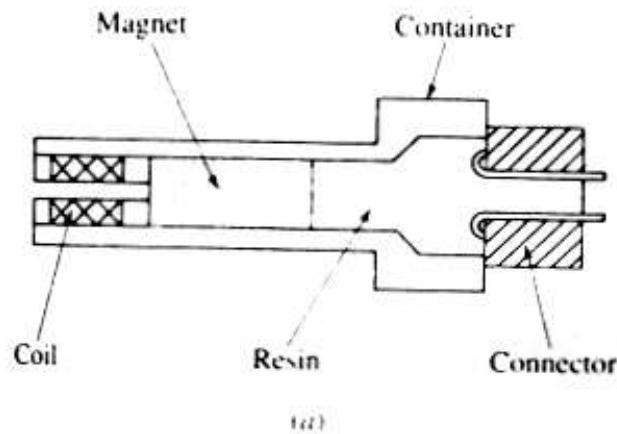
(b)

De asemenea, senzori cu ultrasunete.

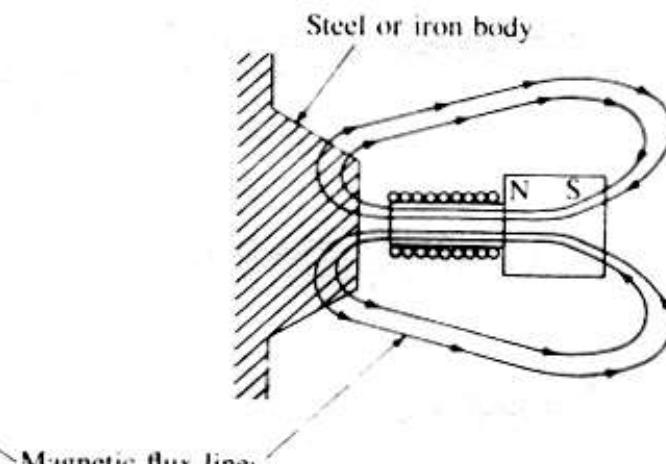
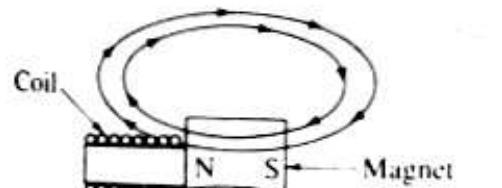
$D$  este o funcție a diferenței de fază.

# Sesizarea apropiierii

- senzori inductivi



schimbare in  
fluxul magnetic

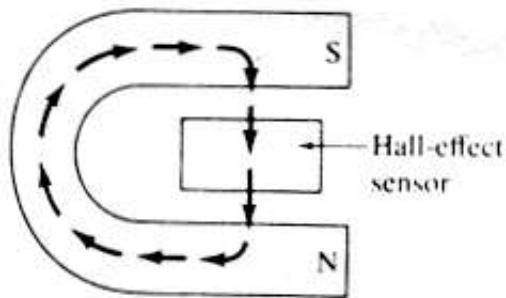


(b)

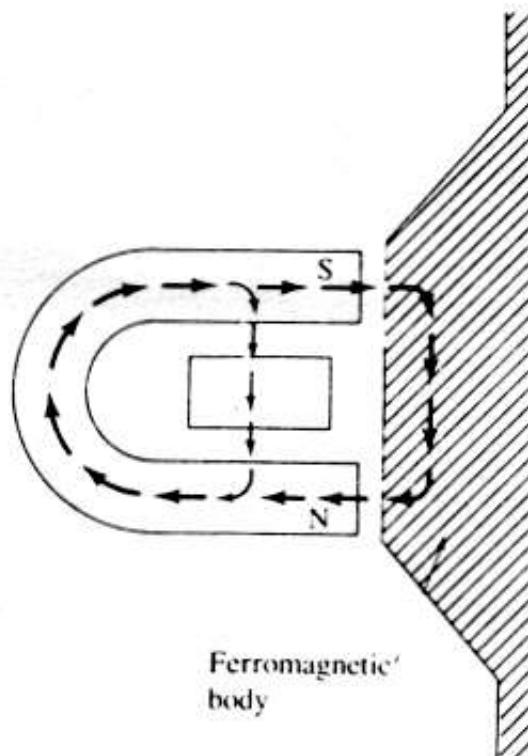
(c)

# Sesizarea apropiierii

- senzori cu efect Hall



(a)

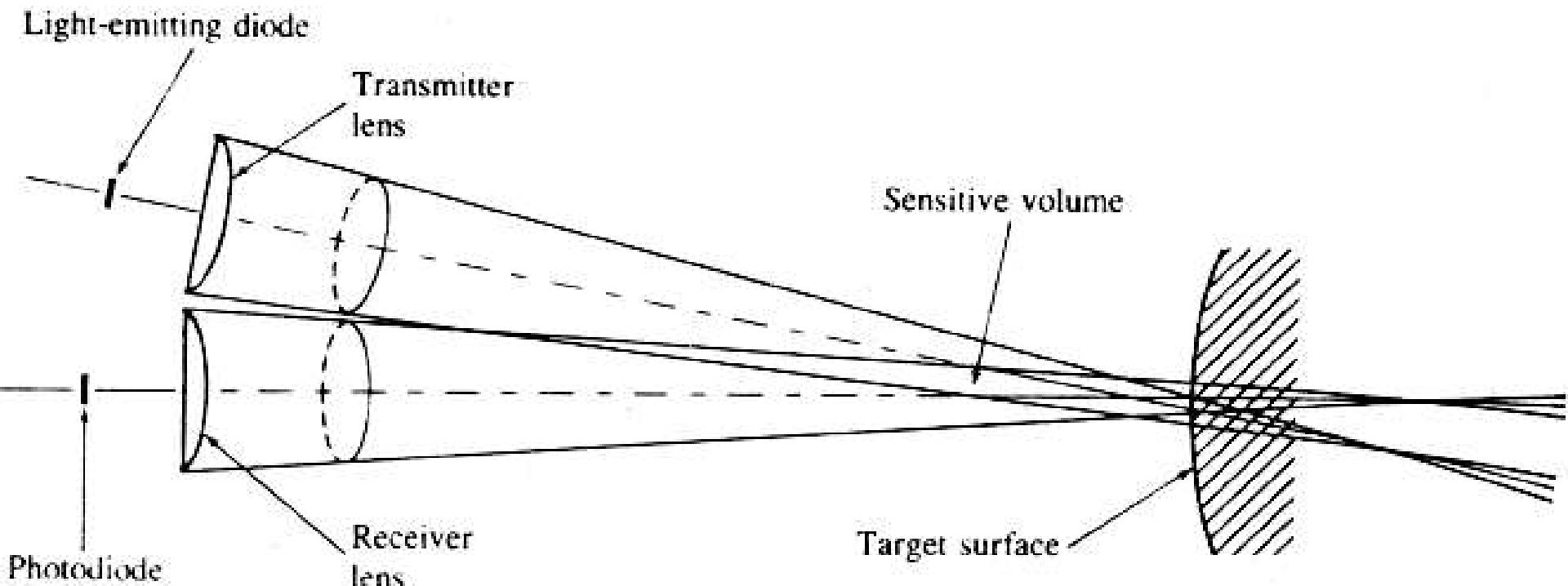


(b)

- Tensiune corelata cu câmpul magnetic din material.

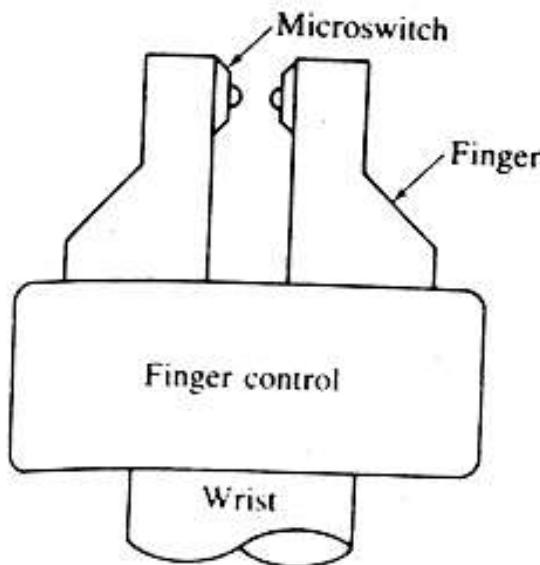
# Sesizarea apropiierii

- senzori optici

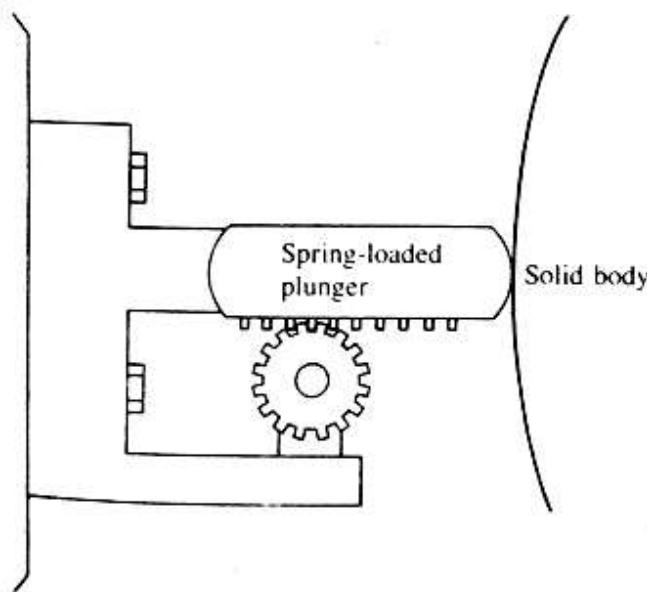


- senzori capacitivi
- senzori ultrasonici

# Senzori tactili

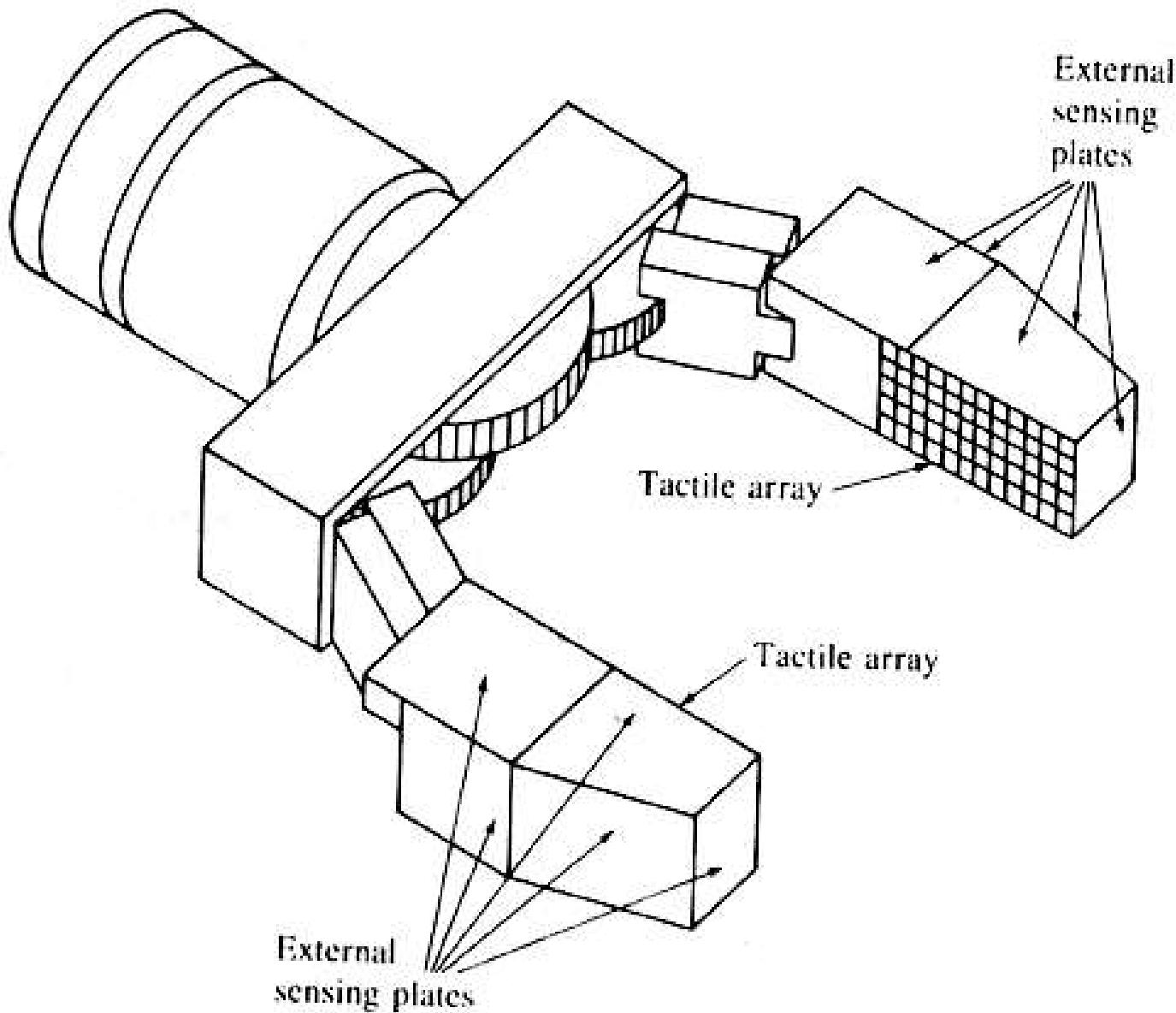


- numeric



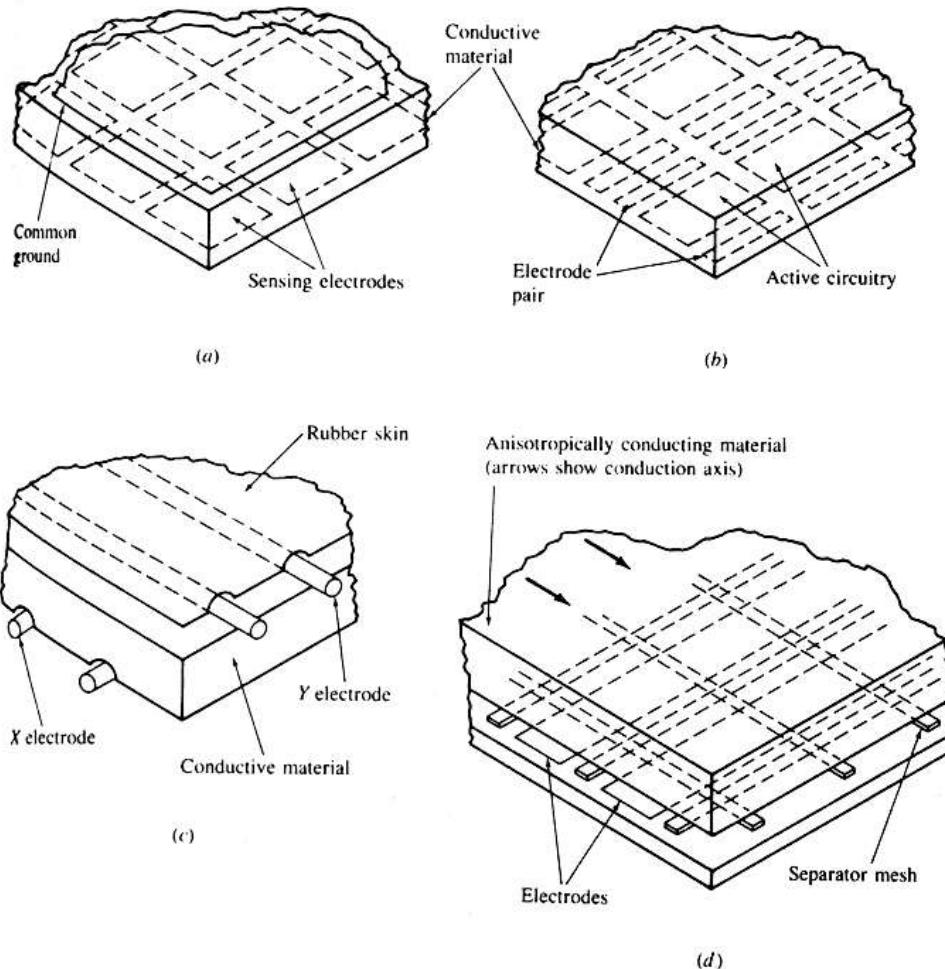
- analogic

# Senzori tactili



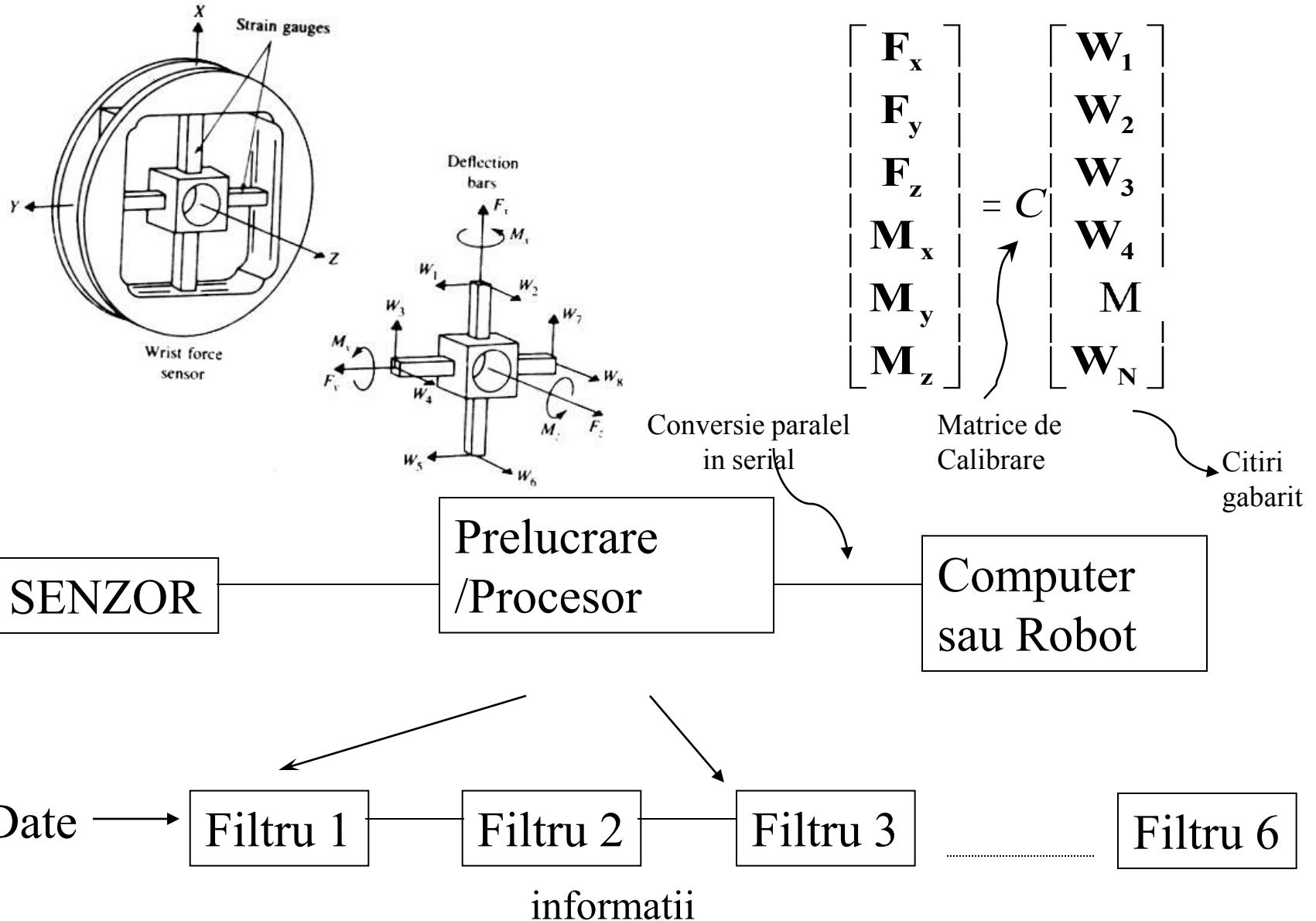
# Senzori tactili

## - Piele artificială

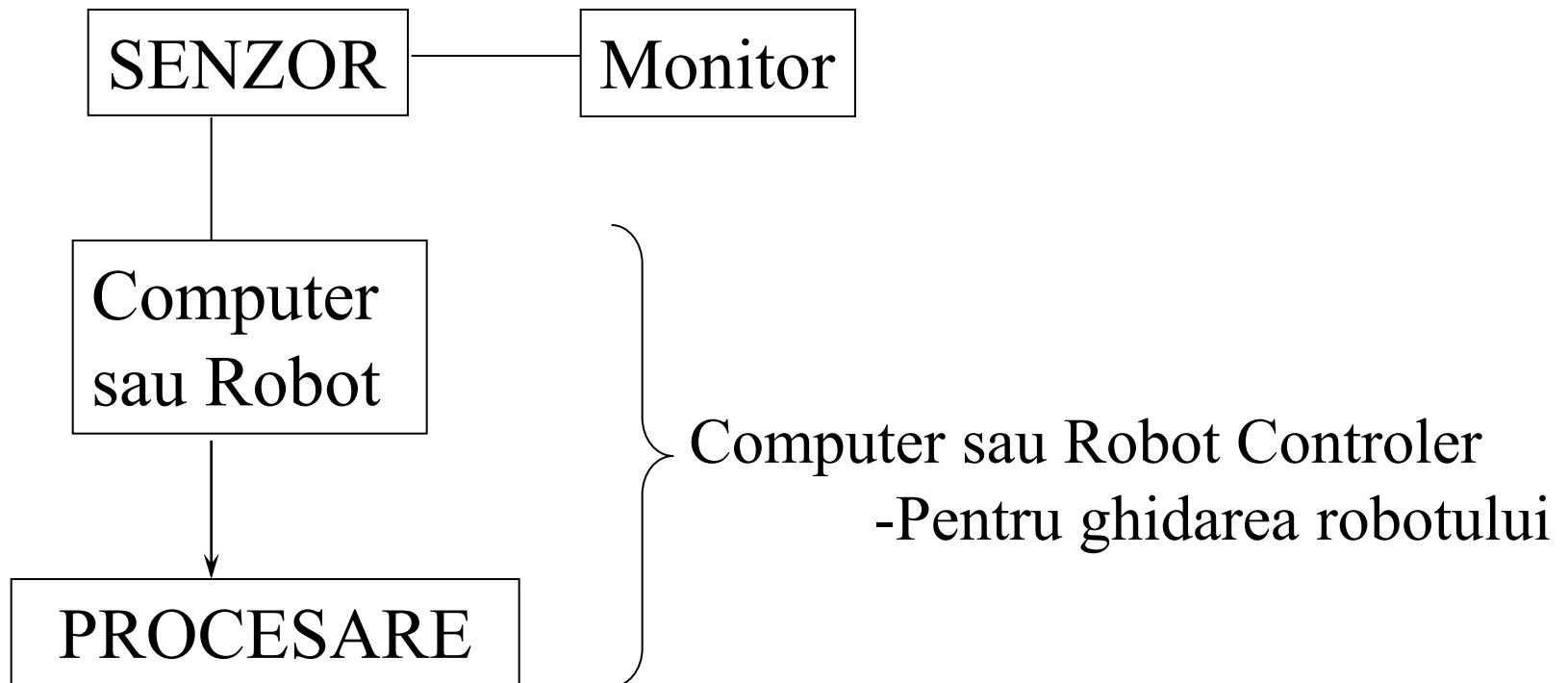


Toate se bazează pe schimbarea rezistenței.

# Senzori de forta/moment



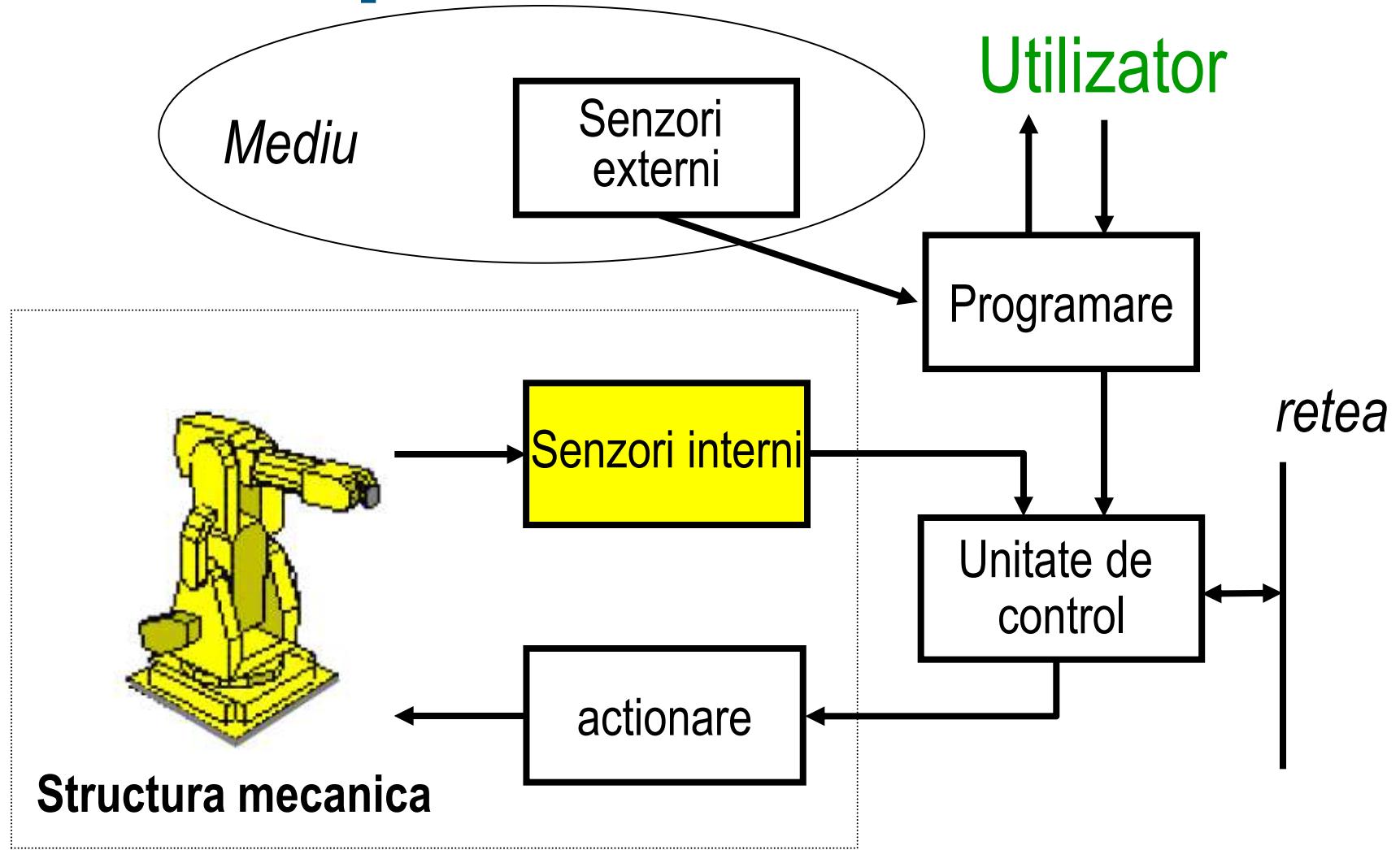
# Vedere robot



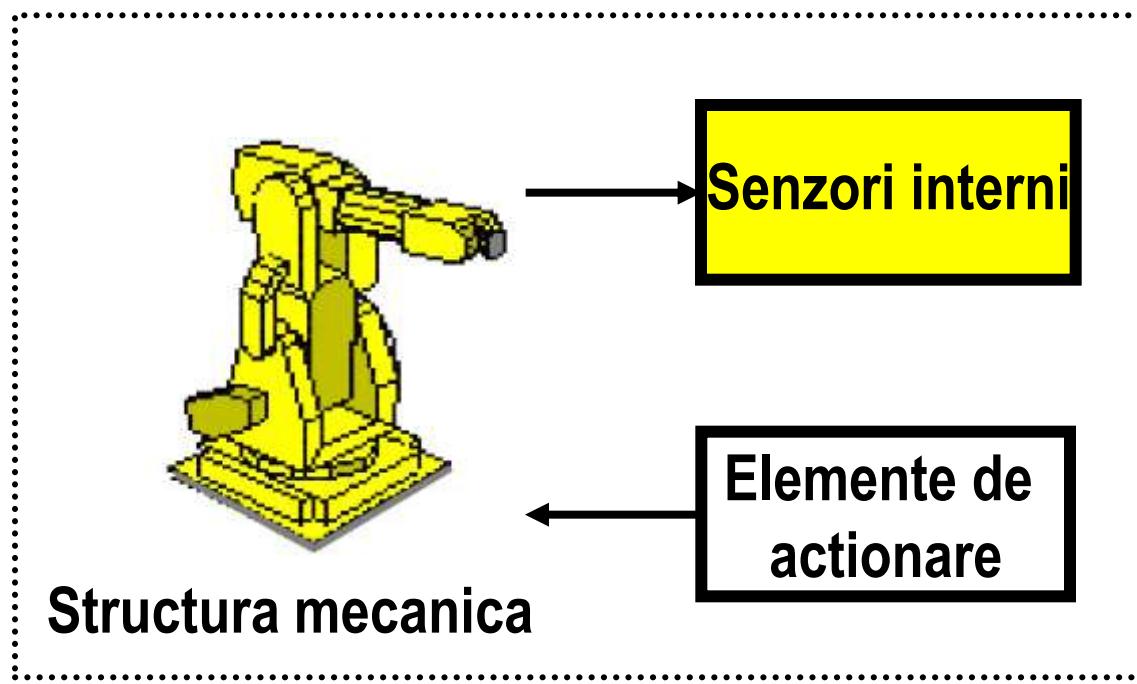
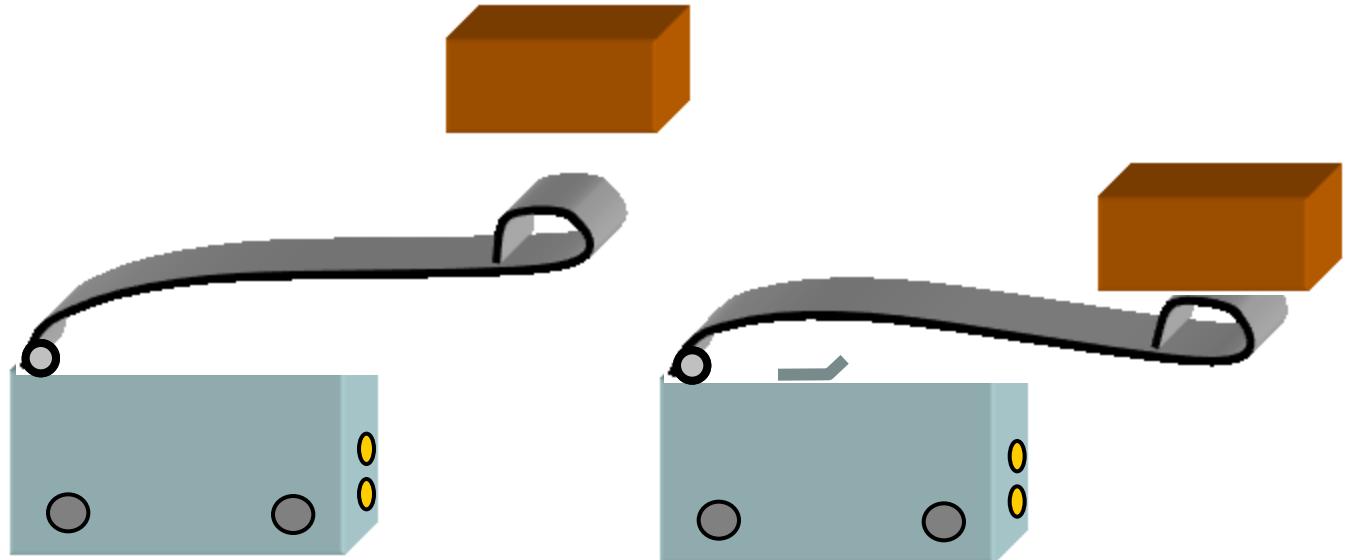
# **Senzori (interni)**

||

# Componentele robotului



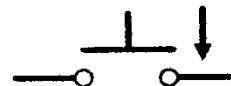
# Mecanici :



**detectoare**

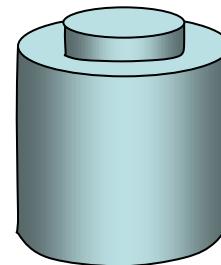
Senzori de pozitie

NO (normally open)



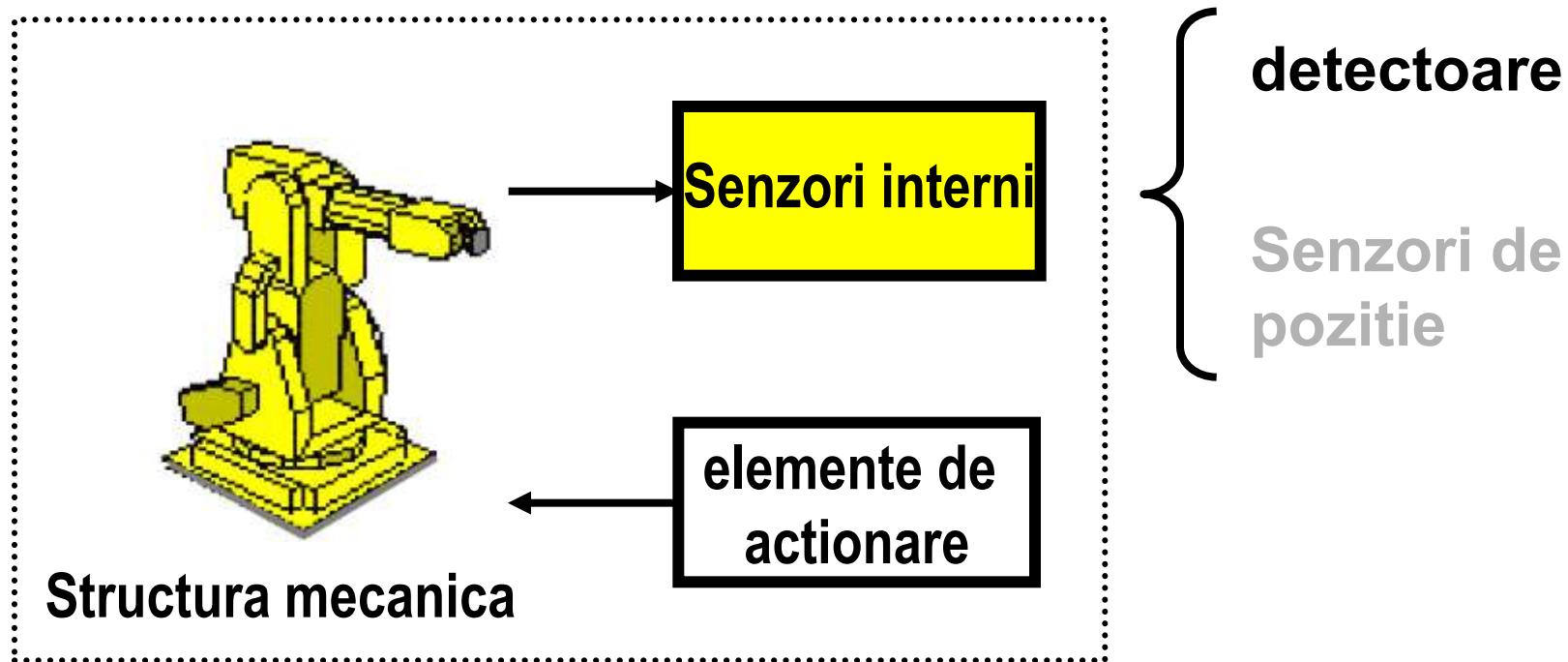
NC (normally close)





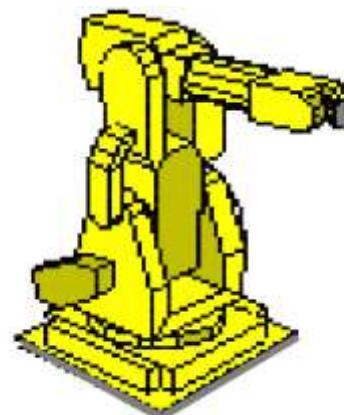
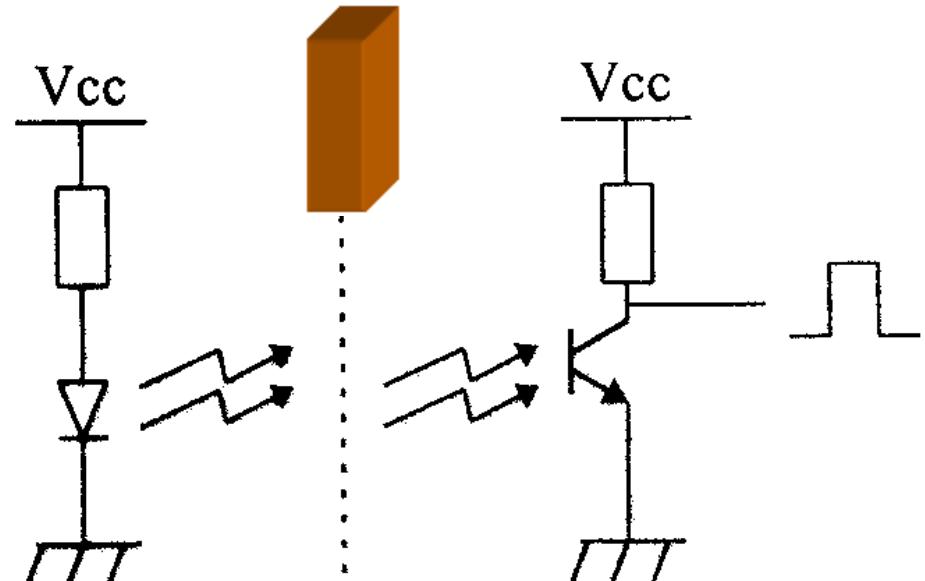
## Electromagnetici:

Detectie a variațiilor  
condițiilor de oscilație ale unui  
circuit cu senzor L - C



## Optice:

Intreruperea fluxului luminos sau reflexie



Senzori interni

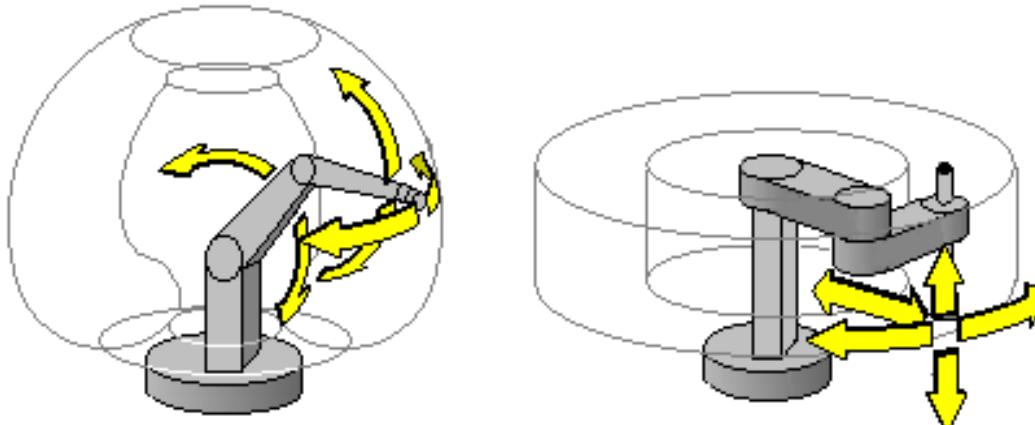
Elemente de actionare

Structura mecanica

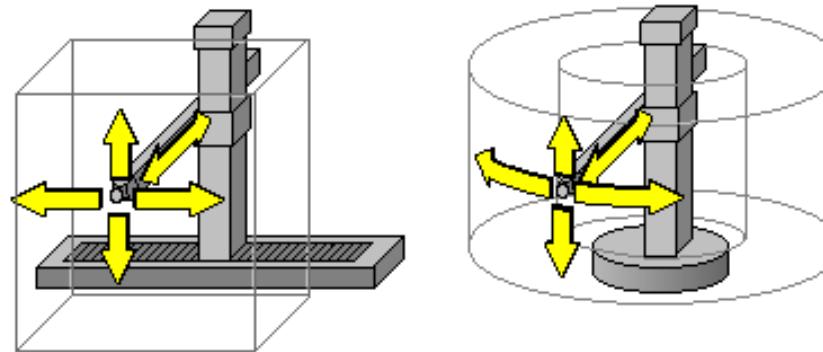
{ Detectoare  
Senzori de pozitie

# Tipuri de senzori

unghiulari

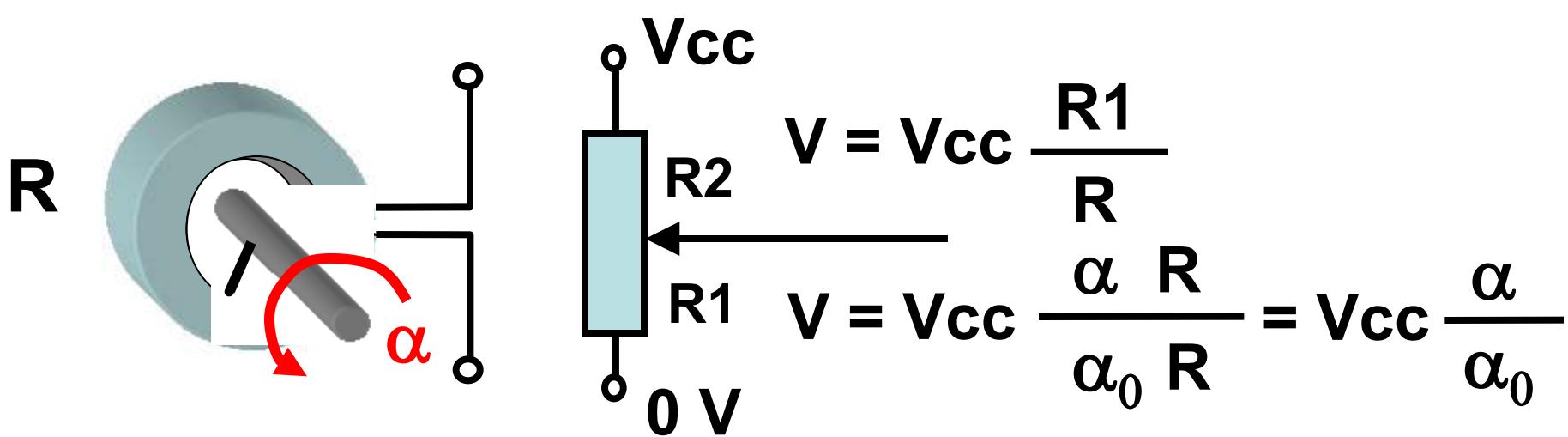


liniali



# Tipuri de senzori

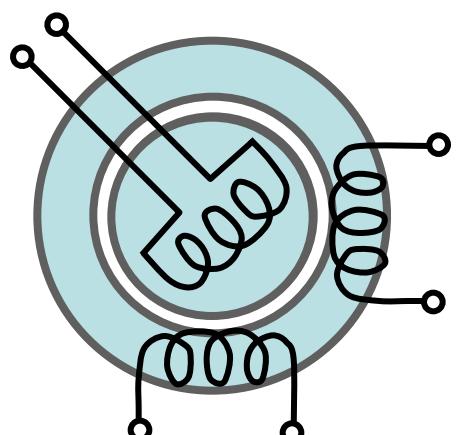
unghiulari	Analogici	Rezistivi (Potentiometrici)
	Digitali	



# Tipuri de senzori

unghiulari	Analogici	Rezistivi (Potentiometrici) Inductivi ( Resolver )
	Digitali	

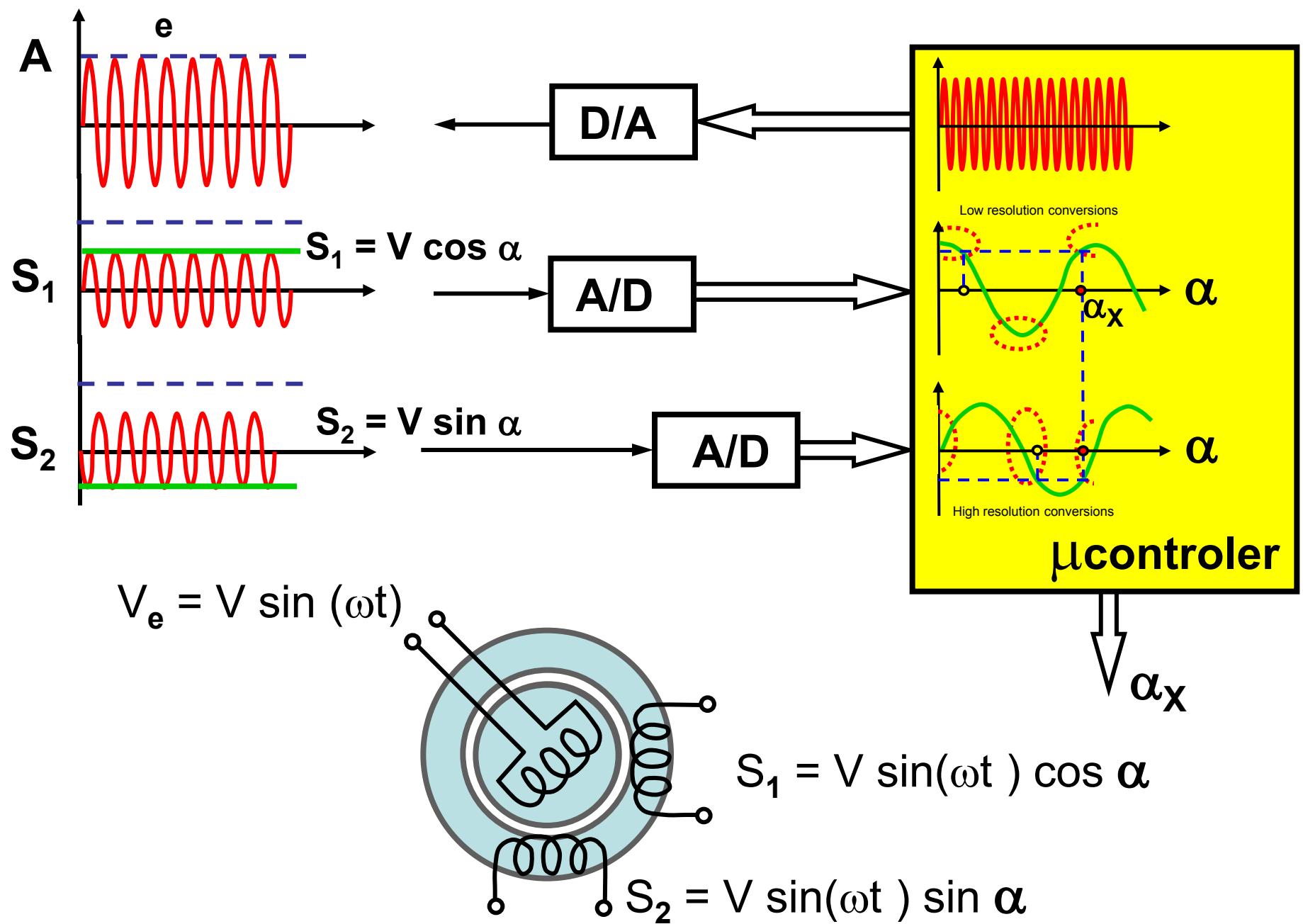
$$V_e = A \sin(\omega t)$$



“A” se obține prin citirea într-un tabel de căutare pentru arcsin și arcos

$$V_e = A \sin(\omega t) \cos \alpha$$

$$V_e = A \sin(\omega t) \sin \alpha$$



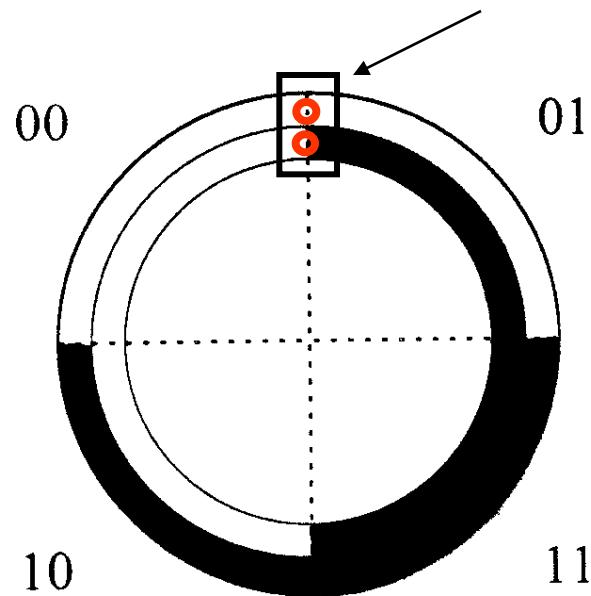
Posibilitatea de a obtine valoarea lui  $\alpha$  prin “urmarire”

# Tipuri de senzori

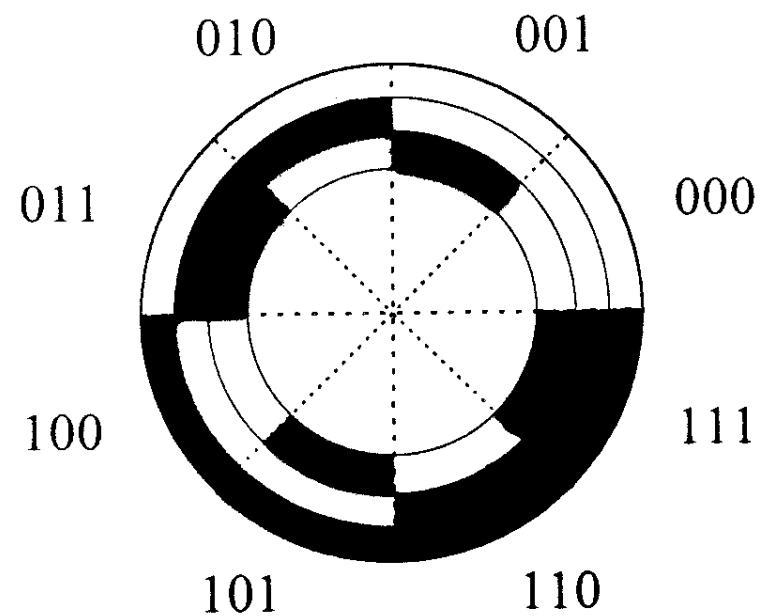
<b>unghiulari</b>	<b>Analogici</b>	Rezistivi (Potentiometrici) Inductivi ( Resolver )
	<b>Digitali</b>	Absolut Incremental

# Encoder optic in valoare absolută

Senzor fotoelectric



2 căi  
4 diviziuni



n căi  
 $2^n$  diviziuni  
n bariere optice

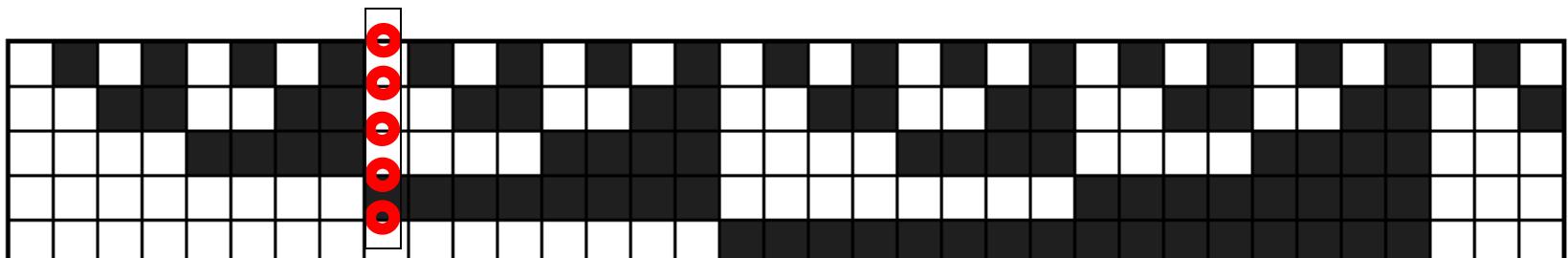
# Comercial

10 biti  $\Rightarrow$  1024 div.  $\Rightarrow$  Rezolutie  $0.35^\circ$

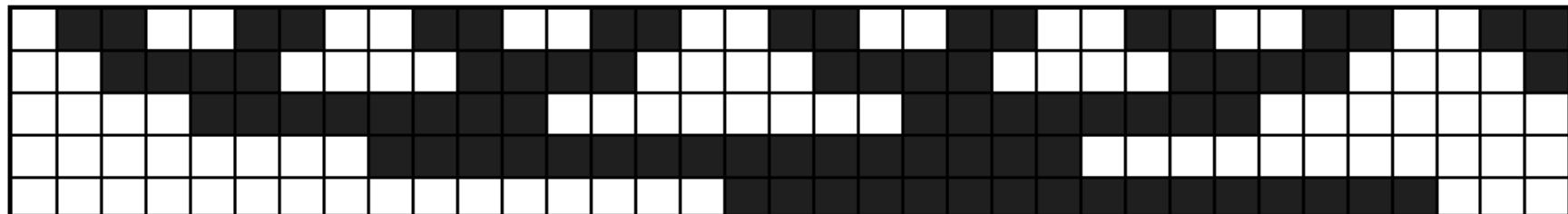
12 biti  $\Rightarrow$  4096 div.  $\Rightarrow$  Rezol.  $0.088^\circ$

14 biti  $\Rightarrow$  16384 div.  $\Rightarrow$  Rezol.  $0.022^\circ$

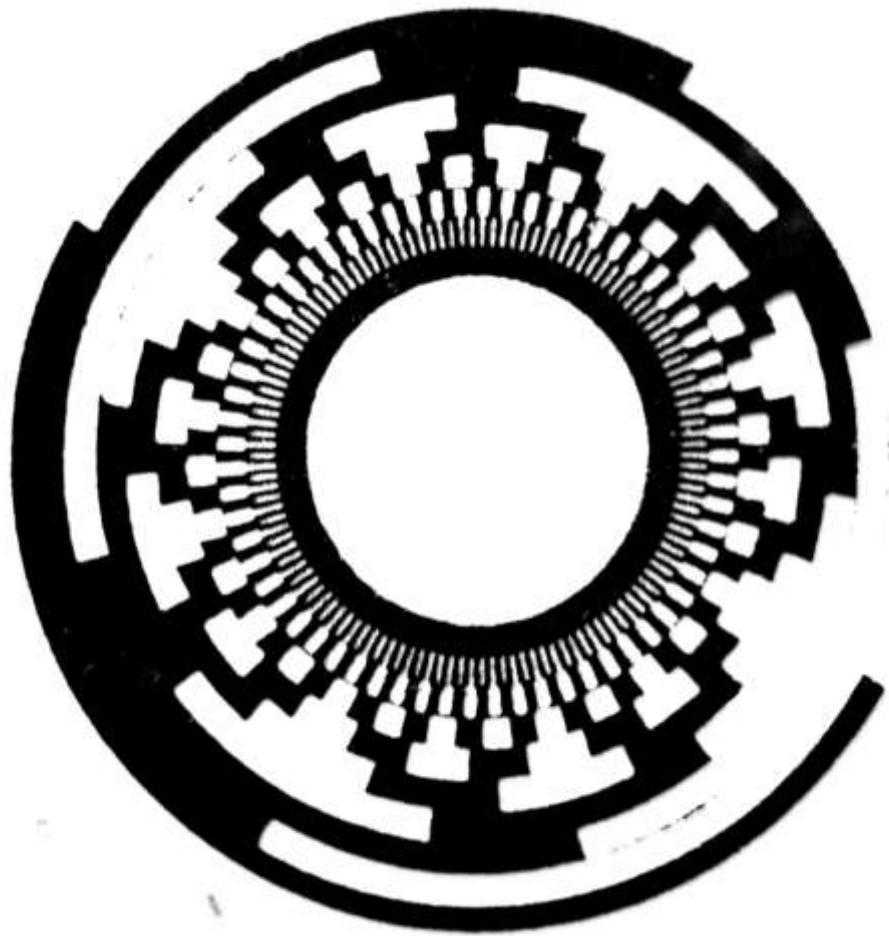
Diametru encodere: de la 50 la 175 mm



Ambiguitate atunci când se citeste codul binar natural



Eliminarea ambiguității citirii folosind codul Gray



Exemplu de disc codat Gray



Exemplu de encoder unghiular

# Tipuri de senzori

<b>unghiular</b>	<b>Analogici</b>	Rezistiv (Potentiometric) Inductiv ( Resolver )
	<b>Digitali</b>	Absolut Incremental

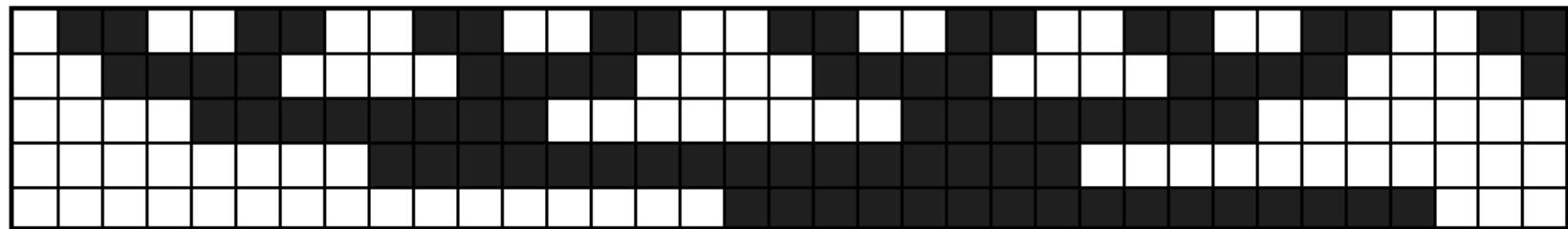
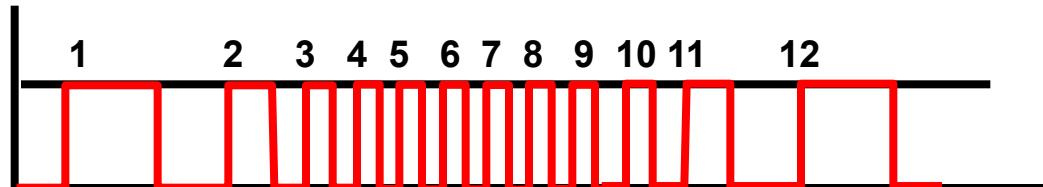
# Comercial

10 biti  $\Rightarrow$  1024 div.  $\Rightarrow$  Rezolutie  $0.35^\circ$

12 biti  $\Rightarrow$  4096 div.  $\Rightarrow$  Rezol.  $0.088^\circ$

14 biti  $\Rightarrow$  16384 div.  $\Rightarrow$  Rezol.  $0.022^\circ$

Semnal obținut după  
deplasarea senzorului  
pe un disc codificat



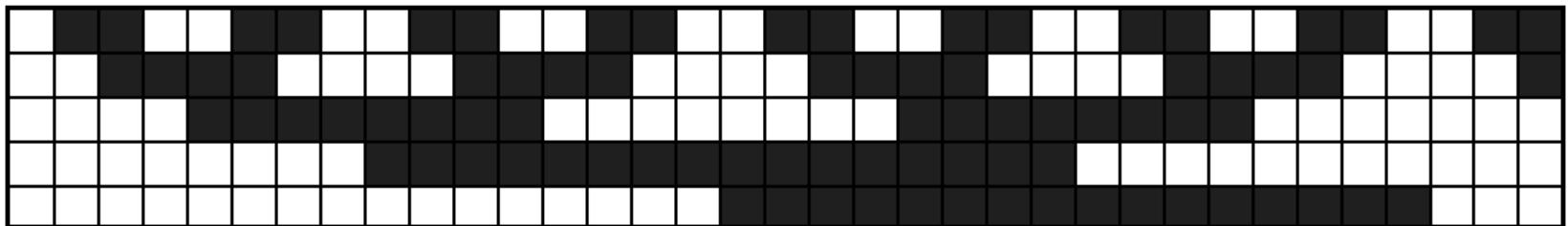
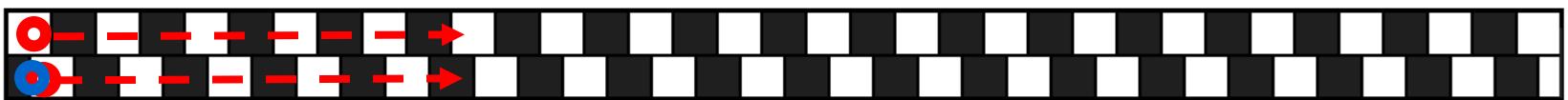
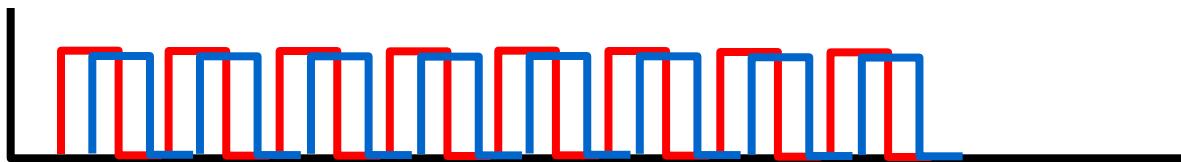
Gray code

# Comercial

10 biti  $\Rightarrow$  1024 div.  $\Rightarrow$  Rezolutie  $0.35^\circ$

12 biti  $\Rightarrow$  4096 div.  $\Rightarrow$  Rezol.  $0.088^\circ$

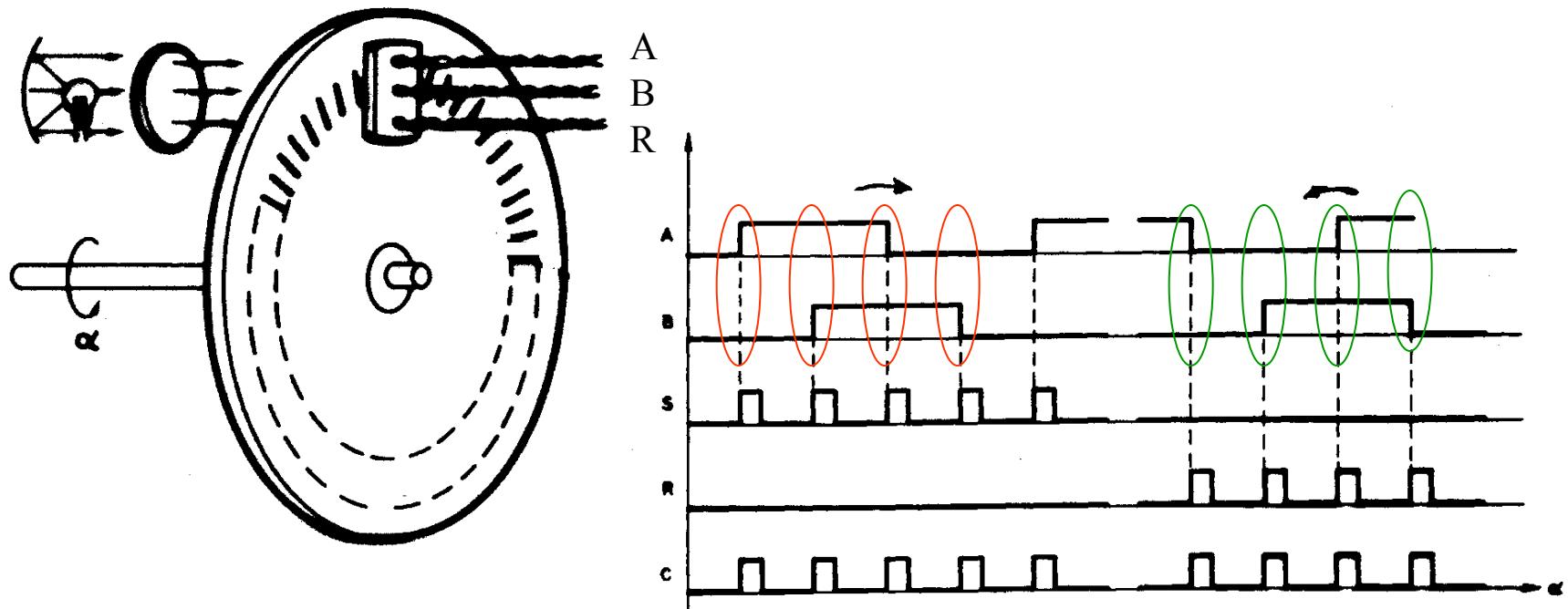
14 biti  $\Rightarrow$  16384 div.  $\Rightarrow$  Rezol.  $0.022^\circ$



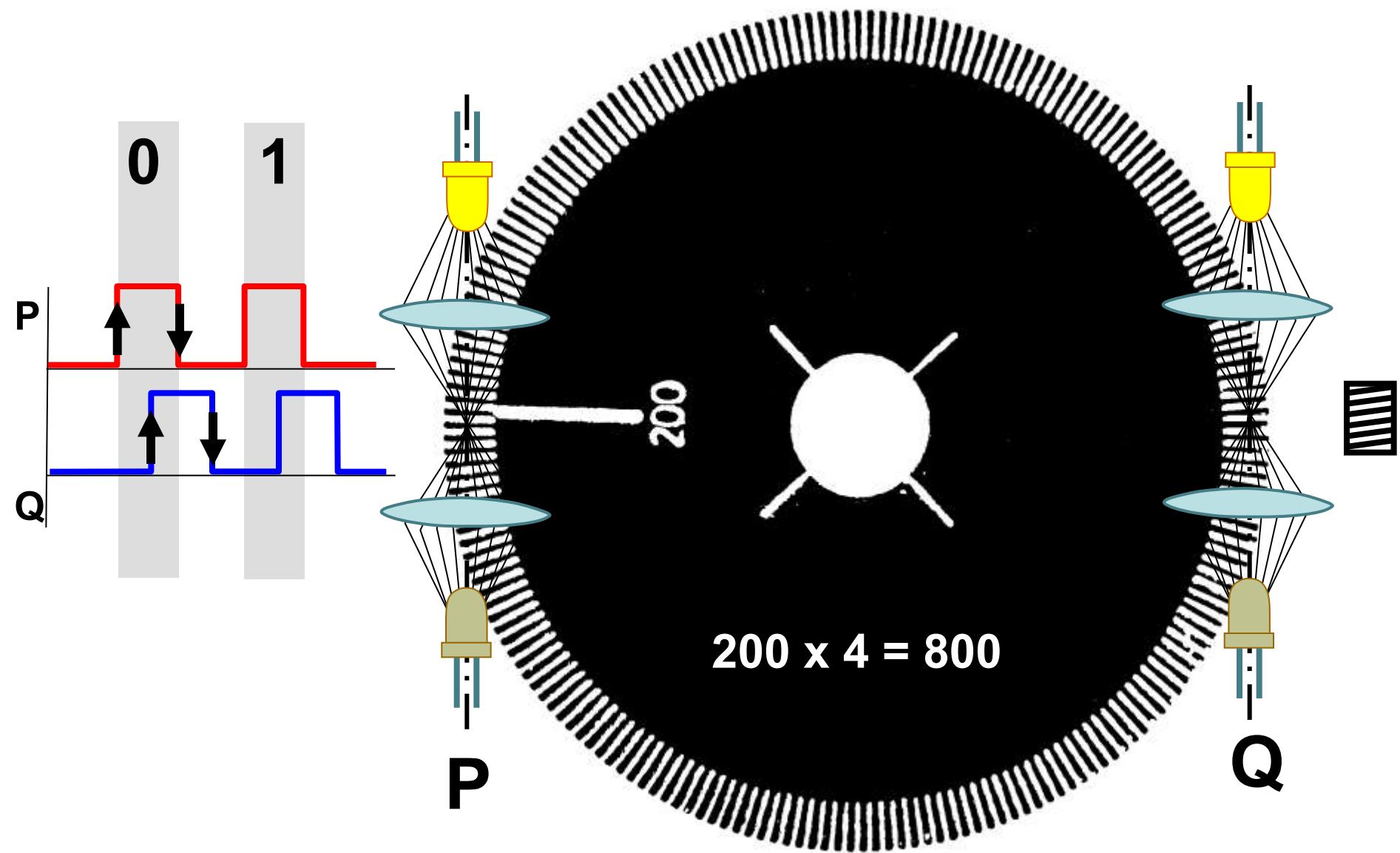
Cod Gray

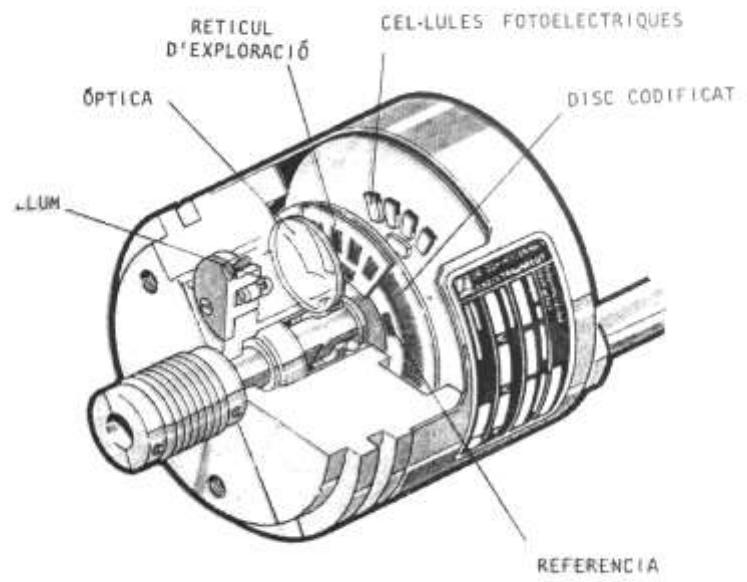
Posibilitatea detectării sensului de numărare cu doi senzori

# Encoder optic incremental

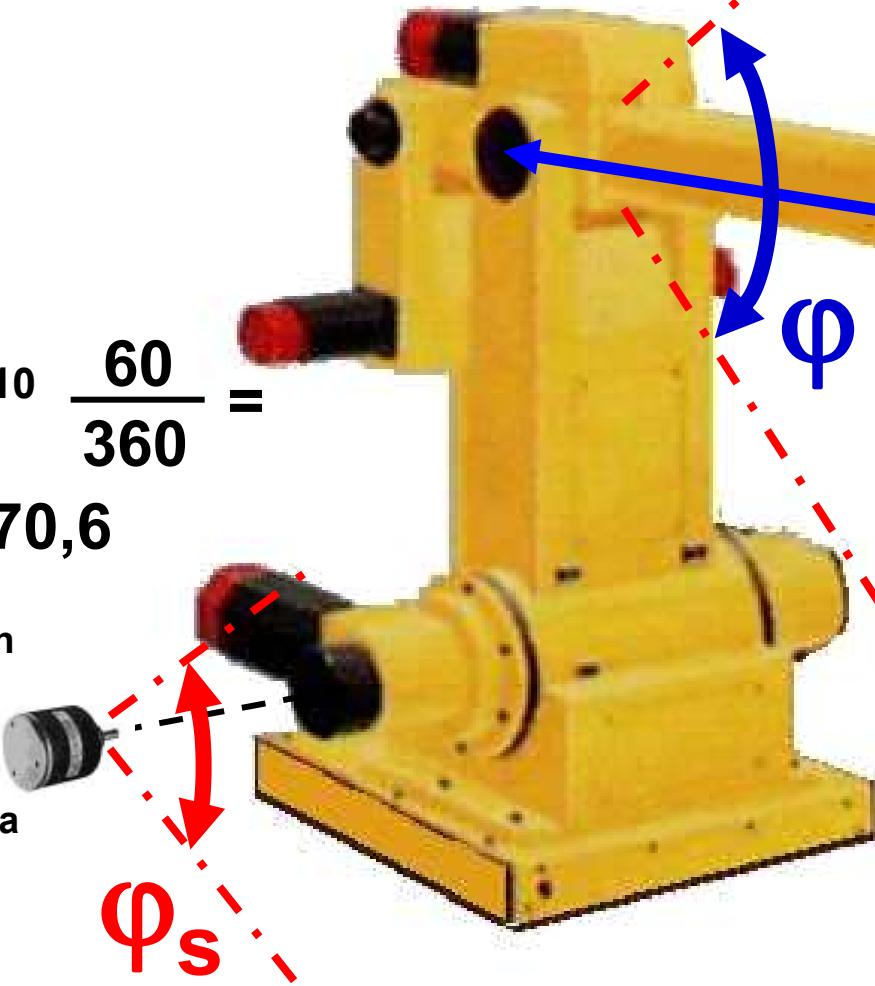


**1 niveli = 4 diviziuni**





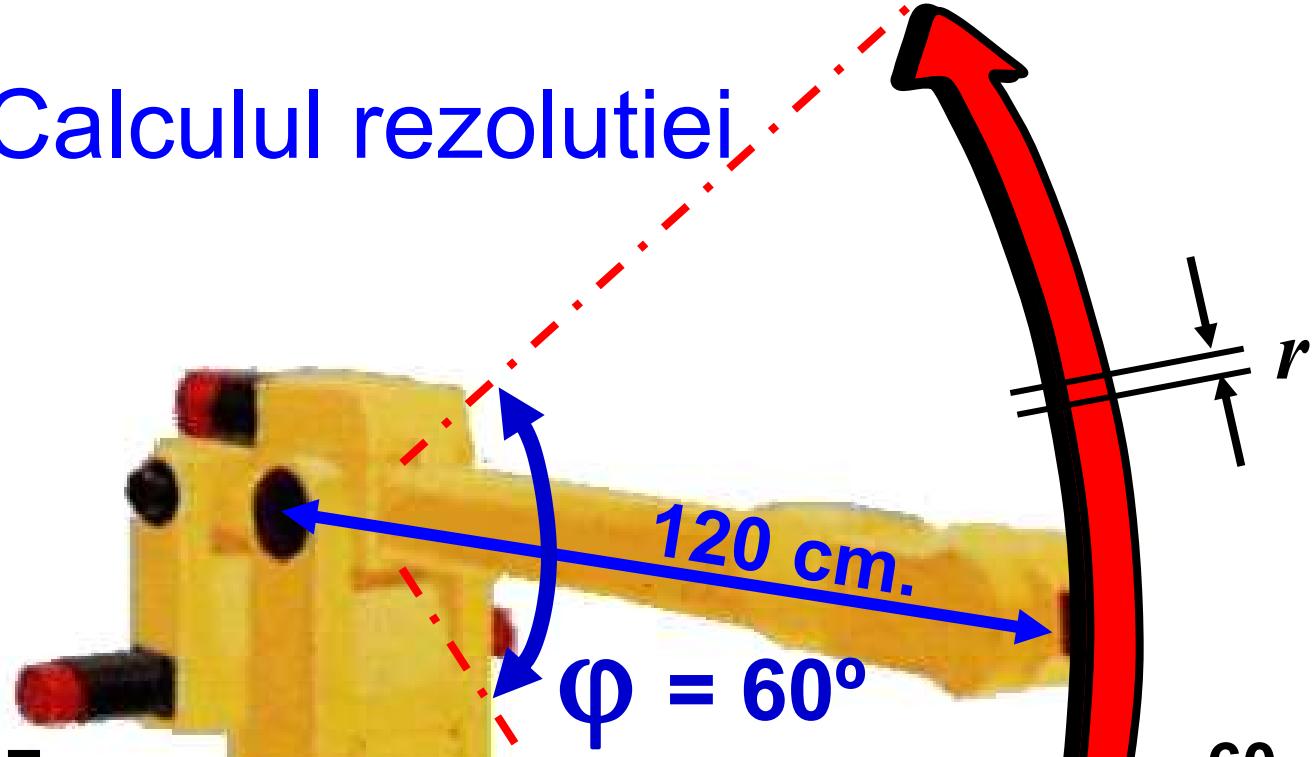
# Calculul rezolutiei



$$q = 2^{10} \frac{60}{360} =$$

$$q = 170,6$$

Folosind un codificator de 10 biți cuplat direct la axa motorului



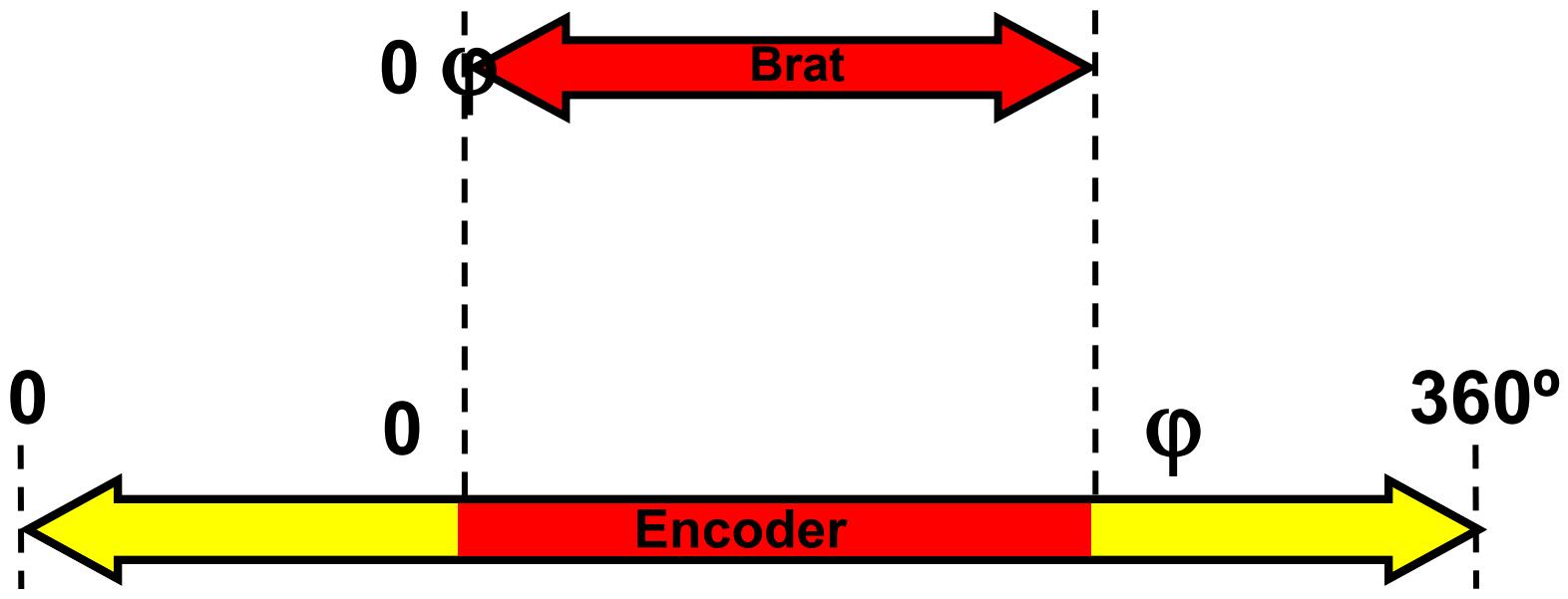
$$l = 2 \pi 1200 \frac{60}{360} =$$

$$l = 1256 \text{ mm.}$$

$$r = \frac{1256 \text{ mm.}}{170,6} = 7,3 \text{ mm.}$$

# Principiul măsurării

1 : 1



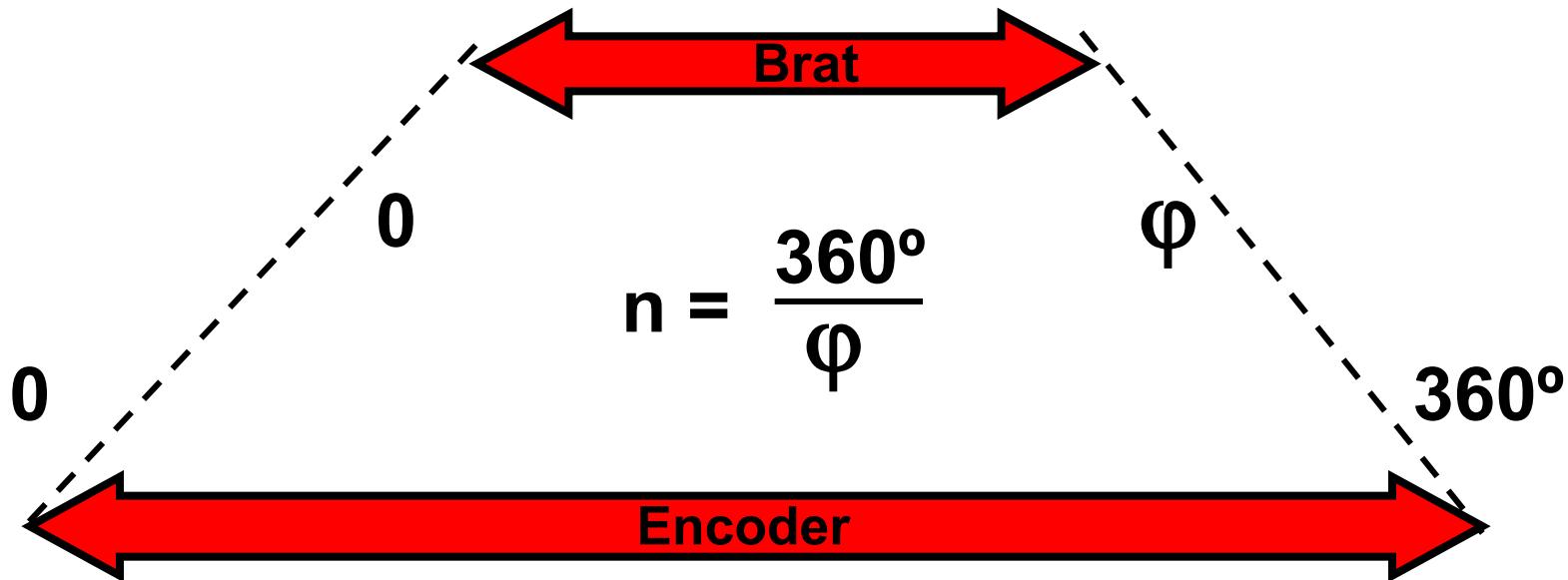
Absolut  
Incremental

$d_{n-1} \dots$  Cod  $\varphi$   $\dots d_o$

$d_{n-1} \dots$  Numarator  $\dots d_o$

# Principiul măsurării

1 : n



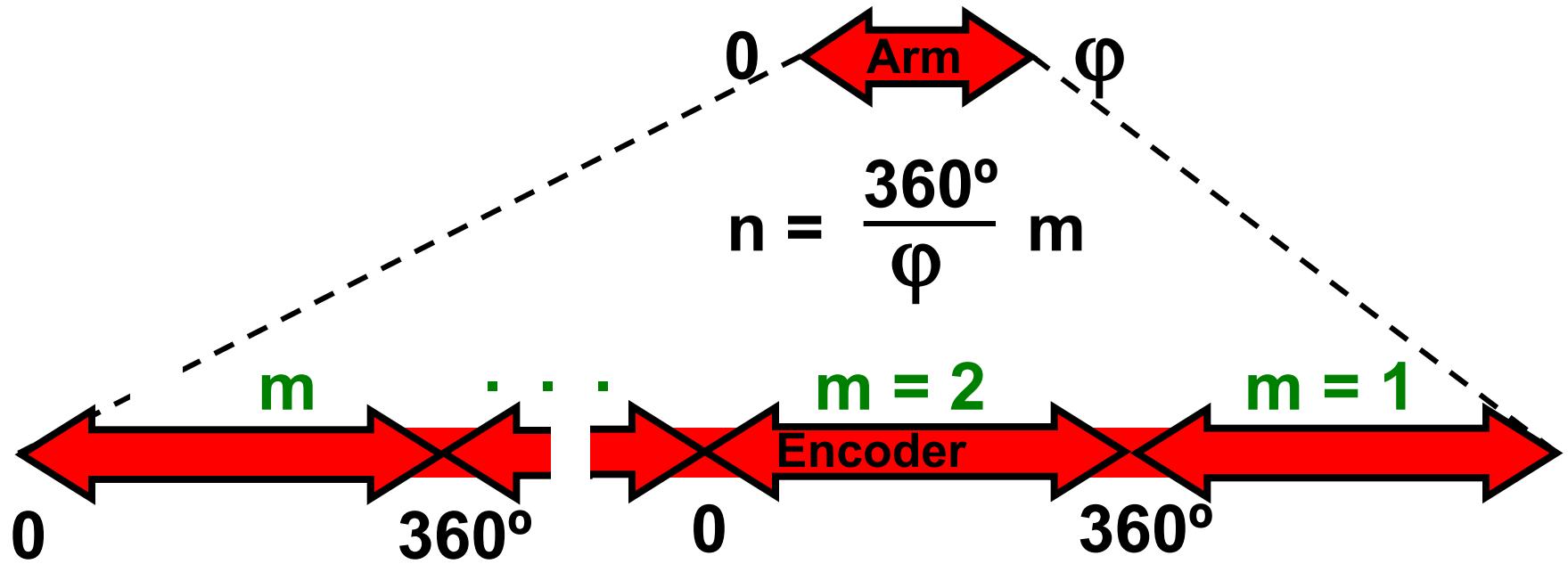
Absolut

Incremental

$d_{n-1} \dots$  Code  $\varphi$   $\dots d_o$

$d_{n-1} \dots$  Numarator  $\dots d_o$

# Principiul măsurării 1 : n



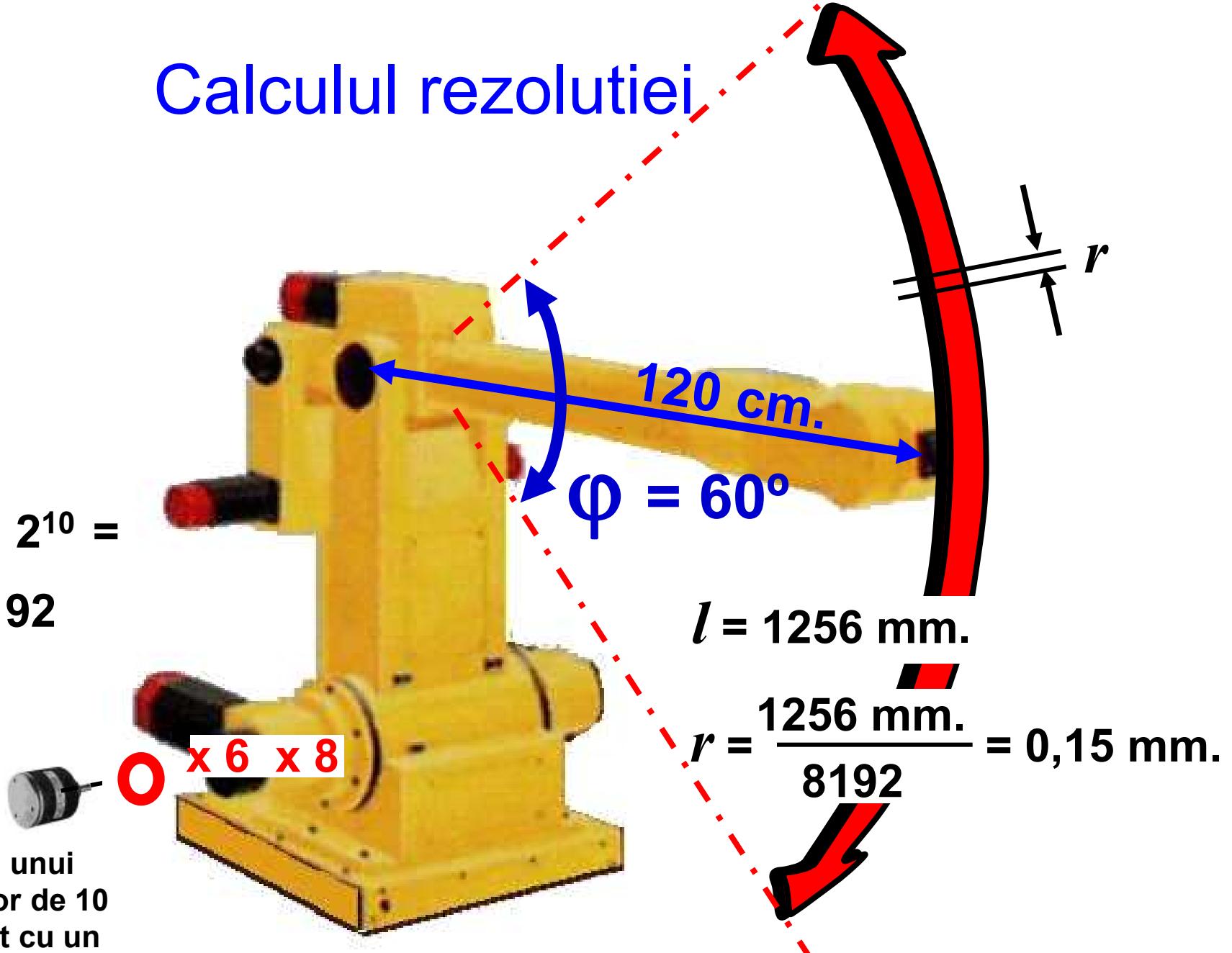
Absolut + Inc.  
Incremental

$d_{n+p-1} \dots d_{n-1} \dots$  Cod  $\varphi \dots d_o$

$d_{n+p-1} \dots d_{n-1} \dots$  Numarator  $\dots d_o$

Encoder cuplat la braț cu un raport de transmisie:  $m \times n$

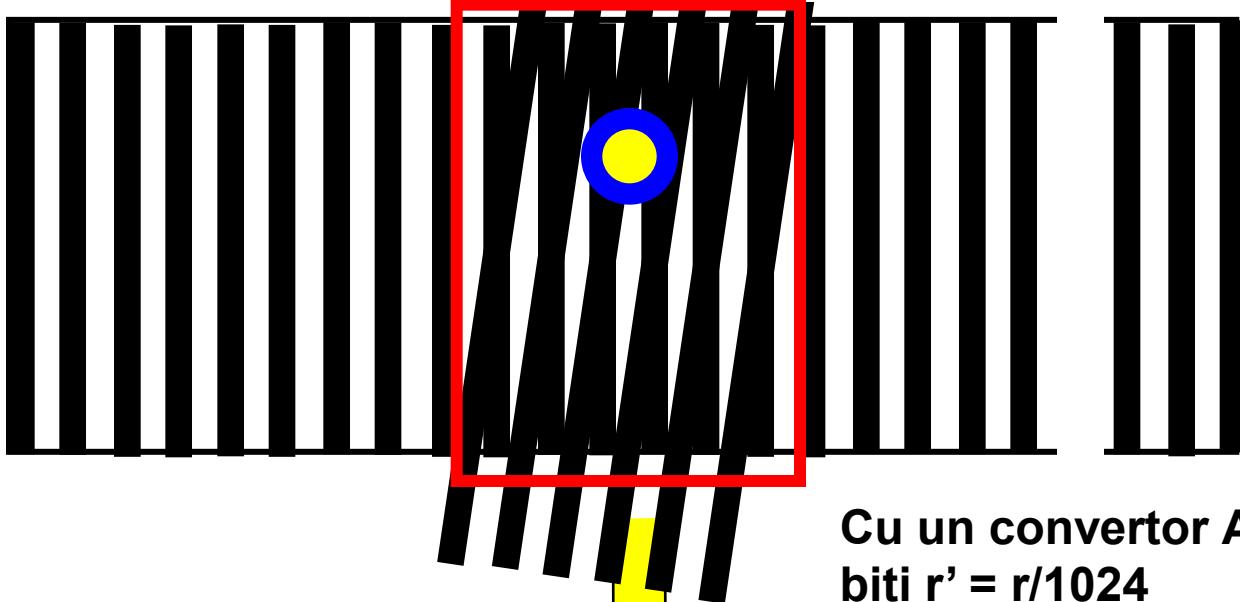
# Calculul rezolutiei



0 1 2 3

· · ·

199 200



Cu un convertor A/D de 10  
biti  $r' = r/1024$

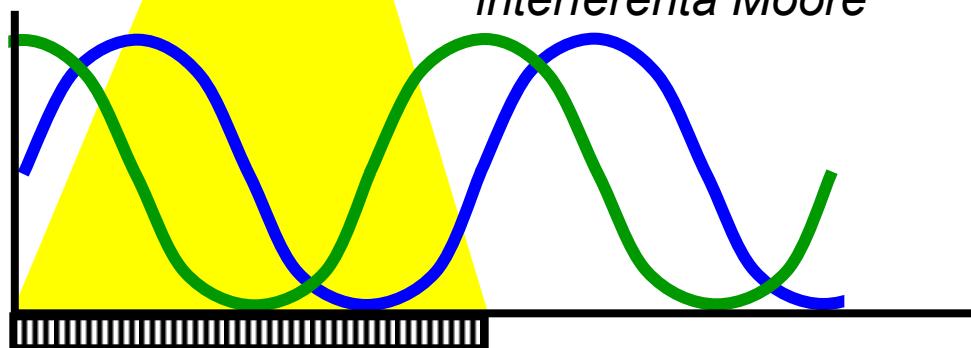
$$l = 1256 \text{ mm.}$$

$$200 \times 1024 = 204.800$$

$$r = \frac{1256 \text{ mm.}}{204.800} = 0,006 \text{ mm.}$$

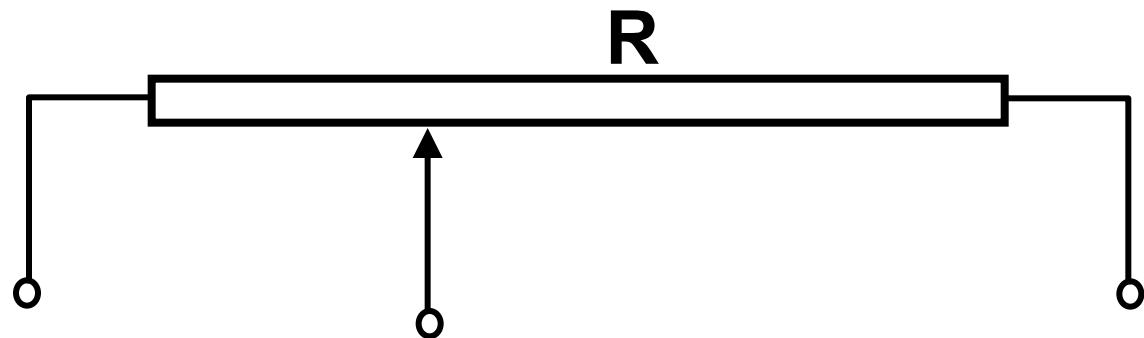
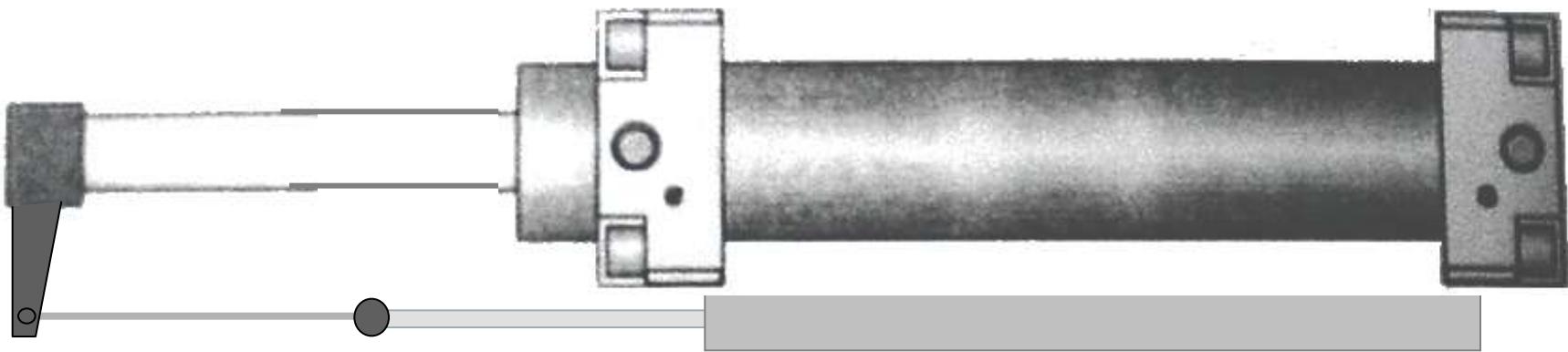
$$r < 0,01 \text{ mm.}$$

*Unde luminoasa obtinuta din  
interferenta Moore*



# Tipuri de senzori

<b>Unghiulari</b>	<b>Analogici</b>	Rezistivi (Potentiometrici) Inductivi ( Resolver )
	<b>Digitali</b>	Incremental Absolut
<b>Liniari</b>	<b>Analogici</b>	Rezistivi Inductivi ( Inductosin ) LVDT
	<b>Digitali</b>	principiu optic

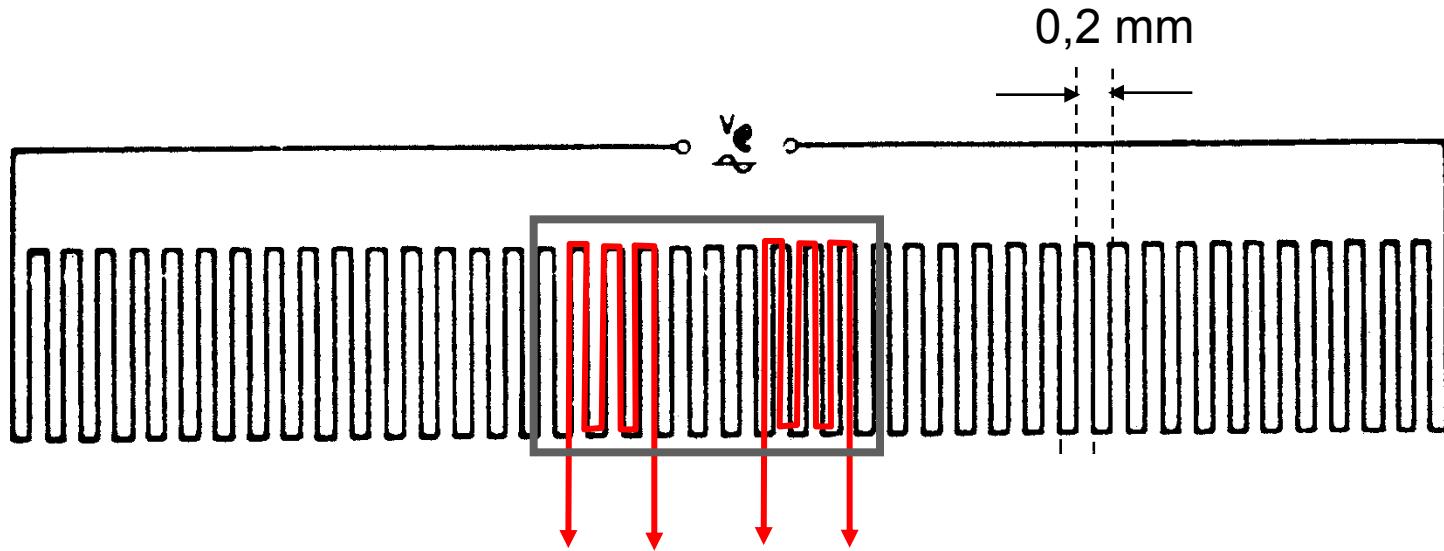


**Potentiometru liniar (mecanic)**

# Tipuri de senzori

<b>Unghiulari</b>	<b>Analogici</b>	Rezistivi (Potentiometrici) Inductivi ( Resolver )
	<b>Digitali</b>	Incremental Absolut
<b>Liniari</b>	<b>Analogici</b>	Rezistivi Inductivi ( Inductosin ) LVDT
	<b>Digitali</b>	principiu optic

# Senzor inductosin



Cu doi senzori secundari decalati cu  $90^\circ$ , rezolutia este:  $0,2 / 2^8 < 0.001 \text{ mm}$  \*

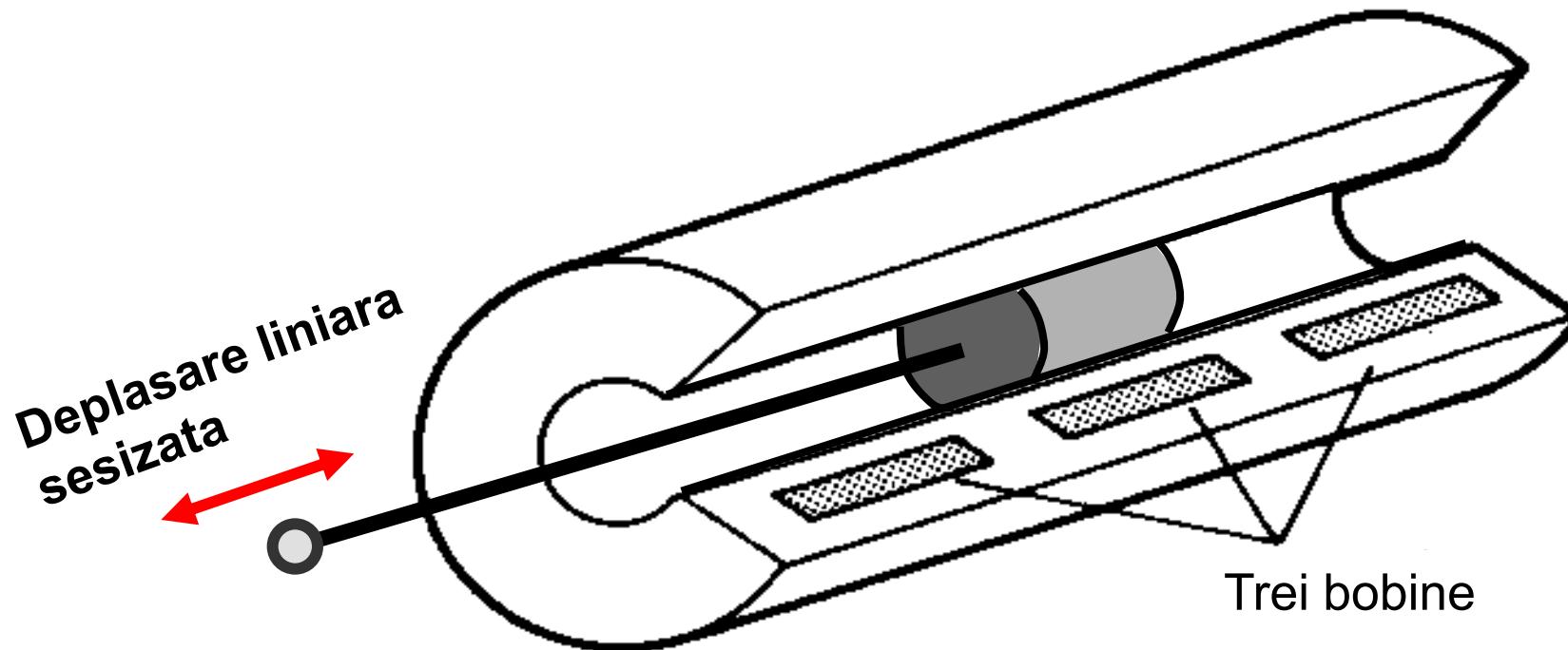
\* Cu o interpolare analogica utilizand un Adc pe 8 biti

# Tipuri de senzori

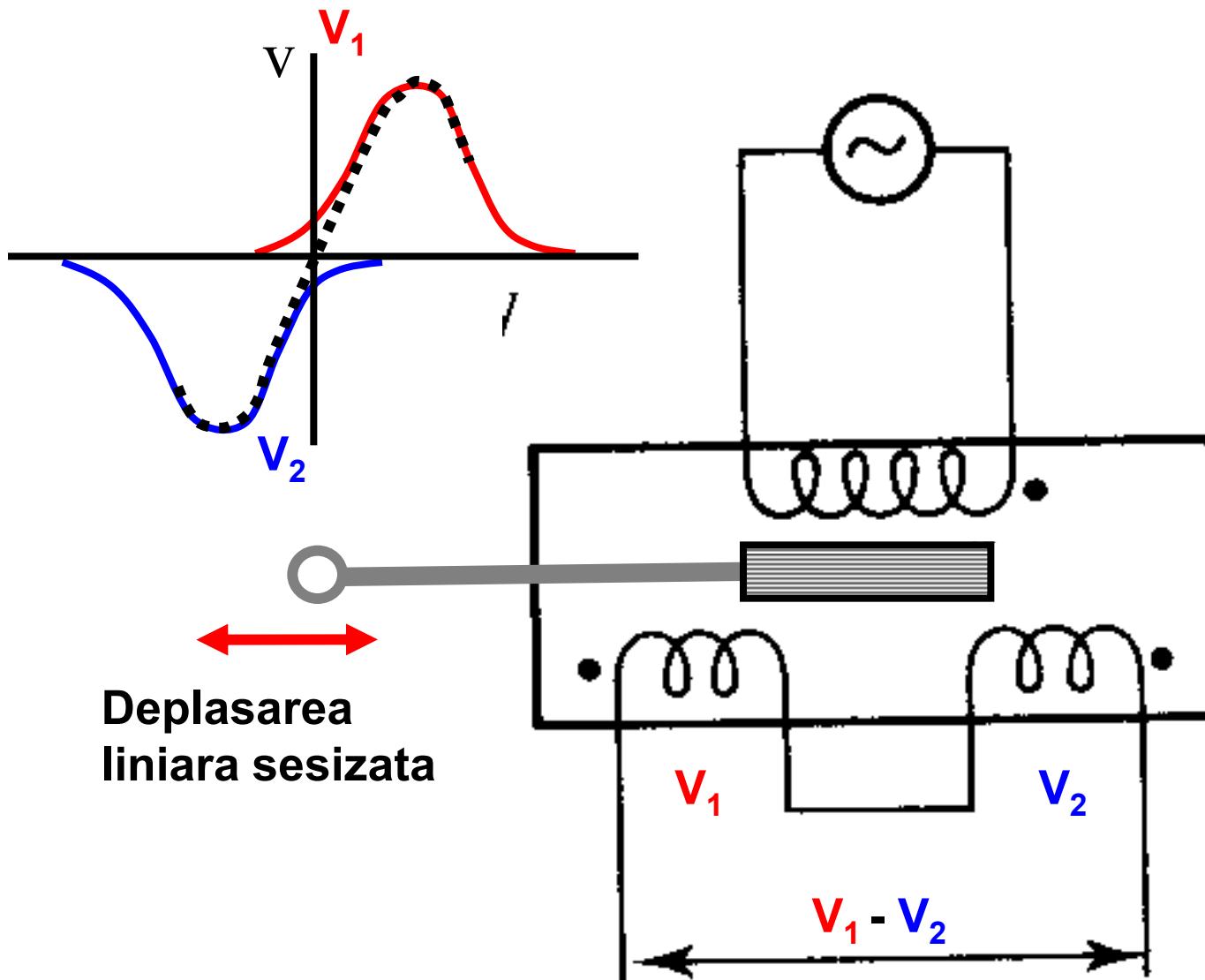
unghiulari	Analogici	Rezistivi (Potentiometrici) Inductivi ( Resolver )
	Digitali	Incremental Absolut
Liniari	Analogici	Rezistivi Inductivi ( Inductosin ) LVDT
	Digitali	principiu optic

# LVDT

LVDT = Linear Voltage Differential Transformer

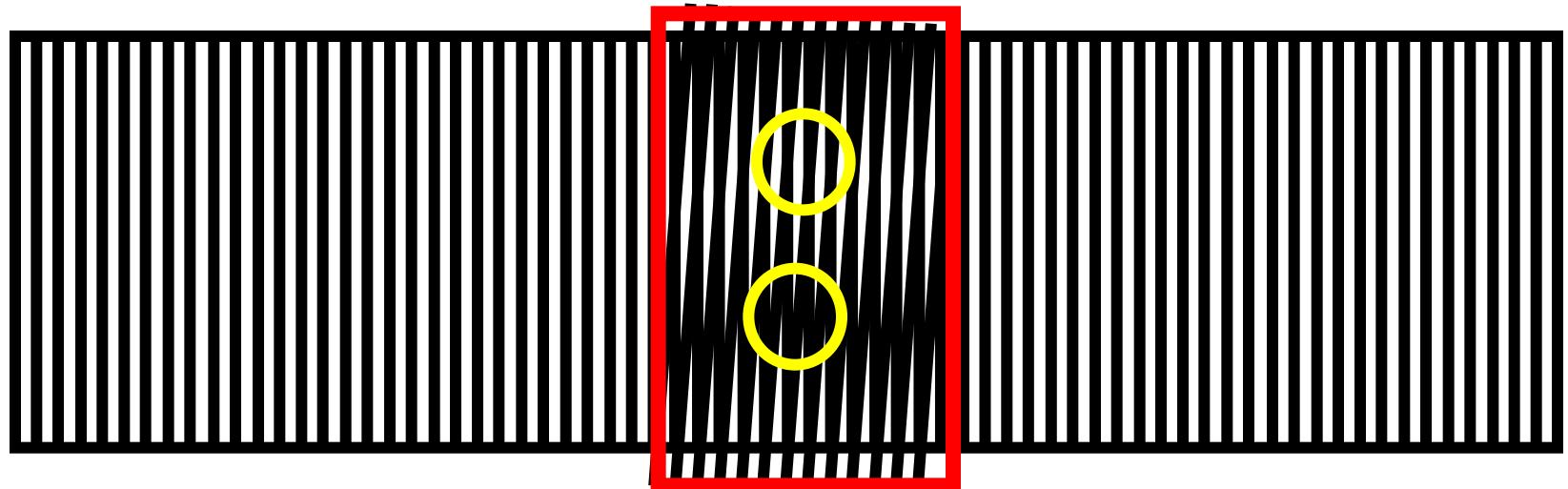


# LVDT

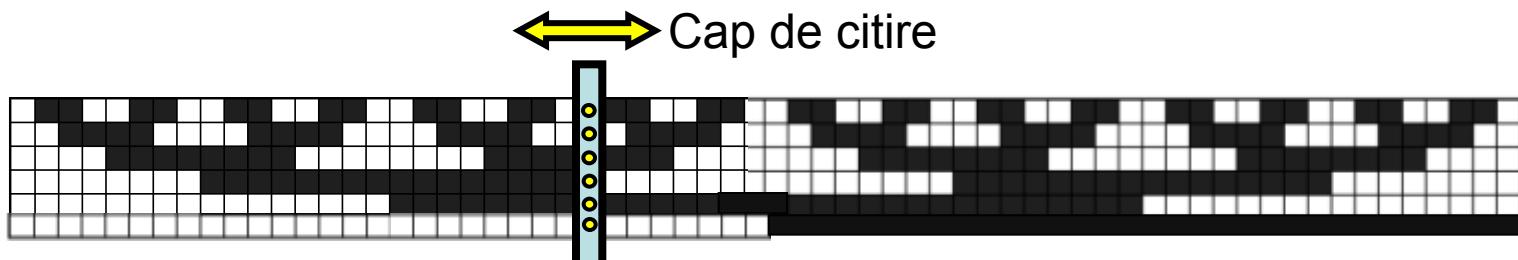


# Tipuri de senzori

unghiulari	Analogici	Rezistivi (Potentiometrici) Inductivi ( Resolver )
	Digitali	Incremental Absolut
Liniari	Analogici	Rezistivi Inductivi ( Inductosin ) LVDT
	Digitali	principiu optic



**Principiu optic  
incremental**



**Principiu optic absolut**

**Cercetări privind realizarea unui minirobot  
subacvatic pentru  
supravegherea și inspectarea unor obiective**

## INTRODUCERE

Destinația cercetării care se va desfășura are ca scop realizarea unui mirobot subacvatic, telecomandat de la suprafață prin cablu, care să permită efectuarea următoarelor activități:

- imersia în zona stabilită de pe o construcție fixă (pod, ponton, dig, etc.) sau de pe un mijloc mobil (barcă, șalupă etc.)
- deplasarea subacvatică, telecomandată prin cablu de la postul de comandă – pupitru de comandă și control.
- inspectarea vizuală a zonei și a detaliilor aferente prin deplasarea subacvatică în urma telecomenziilor de la operator, cu ajutorul sistemului TV în circuit închis (camera subacvatică pe mirobot , monitor la operator în postul de comandă).
- memorarea și prelucrarea datelor video (imaginile transmise de camera TV amplasată pe mirobot) în postul de comandă pentru analiza ulterioară a activității de supraveghere sau post incident (obiect considerat periculos, avarie depistată etc.) și pentru crearea unei baze de date privind traseul parcurs de mirobot.

## Cerințele sistemului

Minirobotul subacvatic va avea o structură modulară având următoarele componente principale:

- modulul submersibil
- sistemul de supraveghere TV
- sistemul de iluminare
- echipamentul de control și telecomandă
- post de comandă și control
- cablul de telecomandă și recuperare
- sistem de alimentare portabil

## Stadiul actual

Roboții subacvatici au apărut și s-au dezvoltat în primul rând în S.U.A., de aceea și definirea termenilor specifici a fost făcută în S.U.A. Conform a două publicații nord-americane, "Operational Guidelines for ROVs"(1984) și "Undersea Vehicles and National Needs"(1996), un vehicul subacvatic condus de la distanță (**ROV** – Remotely Operated Vehicle) este un submersibil care permite operatorului să lucreze într-un condiții confortabile în timp ce robotul lucrează la adâncime în condițiile grele ale mediului.

## CATEGORII DE ROBOȚI SUBACVATICI

Roboții subacvatici moderni pot fi clasificați după mai multe criterii: mărime, adâncimea maximă de lucru, puterea instalată, dacă acționările manipulatoarelor sunt electrice sau electrohidraulice.

CLASA	ADÂNCIMEA DE LUCRU UTILIZARE	PUTEREA (CP)
Miniroboți (electrici)	Observare – până la 100 m	< 5
Roboți mici și medii (electrici)	Observare – până la 300 m	< 10
Roboți mari (electrici)	Observare/activități ușoare - până la 3000 m	< 20
Roboți de foarte mare adâncime (electrici)	Observare/cercetare – peste 3000 m	< 25
Roboți medii (electro-hidraulici)	Activități simple/complexe – peste 2000 m	< 100
Roboți mari (electro-hidraulici)	Activități complexe/manipulează sarcini mari – până la 3000 m	< 300
Roboți de foarte mare adâncime (electro-hidraulici)	Activități complexe/manipulează sarcini mari – peste 3000 m	< 120

## **Utilizări ale robotilor subacvatici**

- Supravegherea scafandrilor;
- Inspectarea platformelor petroliere;
- Verificarea conductelor;
- Cercetare;
- Foraj marin;
- Construcții subacvatice;
- Înlăturarea deșeurilor;
- Curățarea platformelor;
- Sisteme de telecomunicații;
- Inspecții vamale;
- Localizare și recuperare.

## **Avantajele utilizării roboților**

- Mobilitatea – transport aerian sau terestru oriunde în lume;
- Personal necesar redus – majoritatea sistemelor sunt concepute să fie operate de un om sau de doi oameni;
- Pot fi lansate de pe orice navă – condiția esențială este existența unei surse de curent, în general curent alternativ. Navele mici sunt preferabile celor mari datorită mobilității sporite . Roboții pot fi lansați de pe cheu și chiar de pe suprafața gheții.
- Foarte manevrabilii – mișcările controlate pe cele trei axe de libertate în diverse combinații necesare, viteze variabile. Pot să stăioneze la punct fix în condiții de curenți submarini.
- Timpul de scufundare este limitat doar de rezistența la obosale a operatorului. În general timpul de scufundare este limitat la 4 ore pentru a preveni apariția oboselii operatorului. Pilotarea aparatului cere o concentrare totală și continuă. Un avantaj îl constituie lucrul în ture cu mai mulți operatori.
- Robotul poate funcționa în regim de flotabilitate ușor pozitivă, sau în regim de flotabilitate negativă, în funcție de obiectivele misiunii. Dacă e nevoie de mobilitate maximă este util regimul de flotabilitate ușor pozitivă. Dacă se operează în zone de curenți puternici sau la adâncimi mari este mai bun regimul de flotabilitate negativă.

## **Dezavantajele utilizării roboților**

- Necesită întreținere atentă și constantă – apa de mare afectează echipamentele electronice.
- Sunt afectate de starea de agitație a mării și de curenții de suprafață sau de adâncime curenții afectează mobilitatea.
- Agățarea cordonului ombilical – este cauza majoră în pierderea roboților. De cele mai multe ori cablul este cel ce se agăță și nu robotul . Acest lucru este valabil mai ales pentru cordoane ombilicale care nu plutesc și care se târesc pe fundul apei.
- Capacitate de transport redusă – sarcinile transportate sunt mici, pentru sarcini mari trebuie adăugate flotoare și reechilibrat aparatul.
- Vederea bidimensională și lipsa vederii periferice – imaginile obiectelor nu sunt tridimensionale și e greu de apreciat mărimea obiectelor vizate și distanța pâna la ele.

## **Minirobot – părți componente**

Minirobotul subacvatic este un complex de subsisteme care, funcționând sinergetic, asigură îndeplinirea unor misiuni diverse ca scop și complexitate. El este compus din patru părți principale :

1. Vehiculul;
2. Consola (pupitru) de comandă și control;
3. Cablul de legătură (cordoană umbilicală) cu tamburul de depozitare;
4. Sursa de energie

**VEHICULUL** este compus din următoarele subansamblu:

- a. Sistemul de propulsie
- b. Sistemul video și de iluminare
- c. Sistemul de senzori
- d. Flotorul
- e. Sasiul

## **Variante ale modulului submersibil**

Din prezentarea stadiului tehnic pe plan mondial al mini-roboților subacvatici rezultă că variantele constructive agreate de fabricanții cu tradiție în domeniu sunt două:

- componentele electronice adăpostite într-o carcasă etanșă, iar flotabilitatea asigurată de un flotor confecționat din spumă sintactică îmbrăcată într-o carcasă din fibre de sticlă;
- componentele electronice adăpostite într-o incintă etanșă (cu profil hidrodinamic) care are în același timp și funcția de flotor.

Din punct de vedere al echipamentului modulului submersibil, am considerat o echipare identică pentru cele două variante:

- Cameră video color echipată cu mecanism pan/tilt;
- Patru motoare de propulsie:

Două motoare pentru deplasare înainte/înapoi;

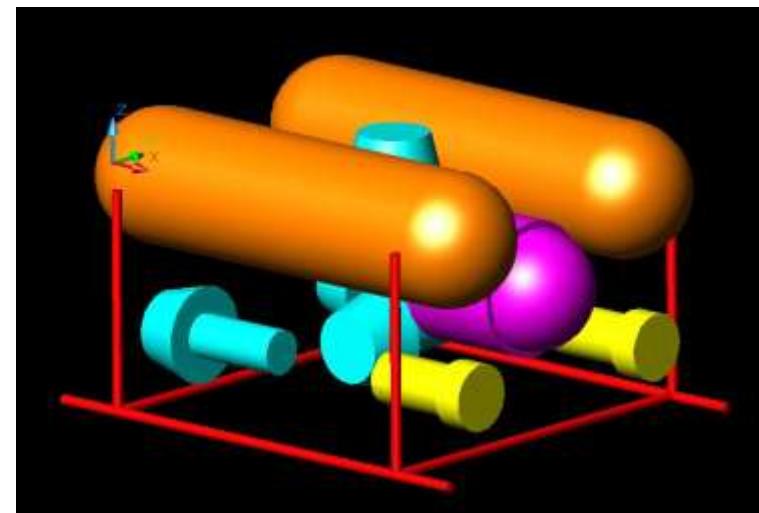
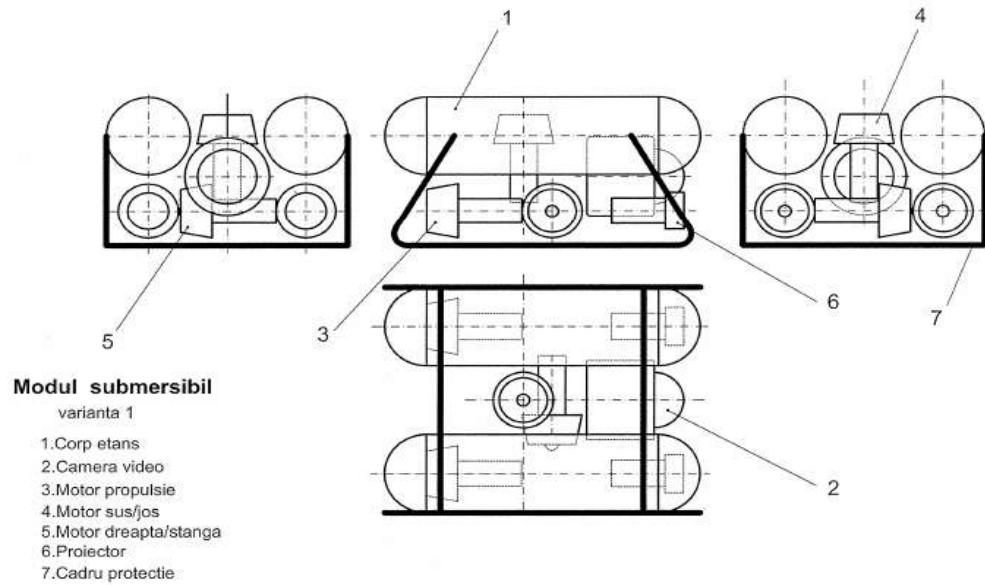
Un motor pentru deplasarea sus/jos (pentru varianta 1), două motoare (pentru varianta 2);

Un motor pentru deplasarea laterală – pentru varianta 1;

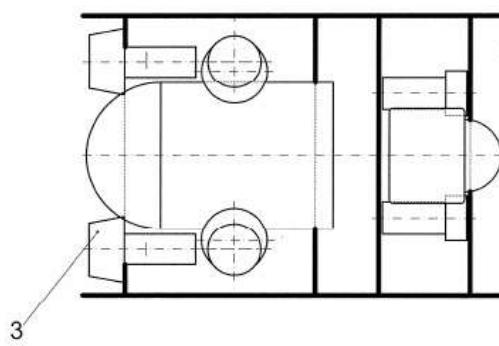
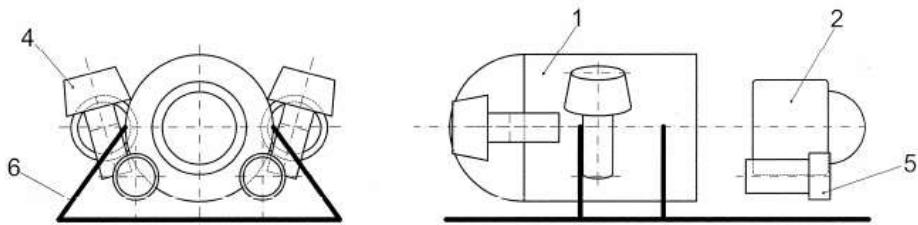
Două proiecțoare cu LED-uri;

Un cadru de protecție.

# Schiță ansamblului submersibil, varianta 1



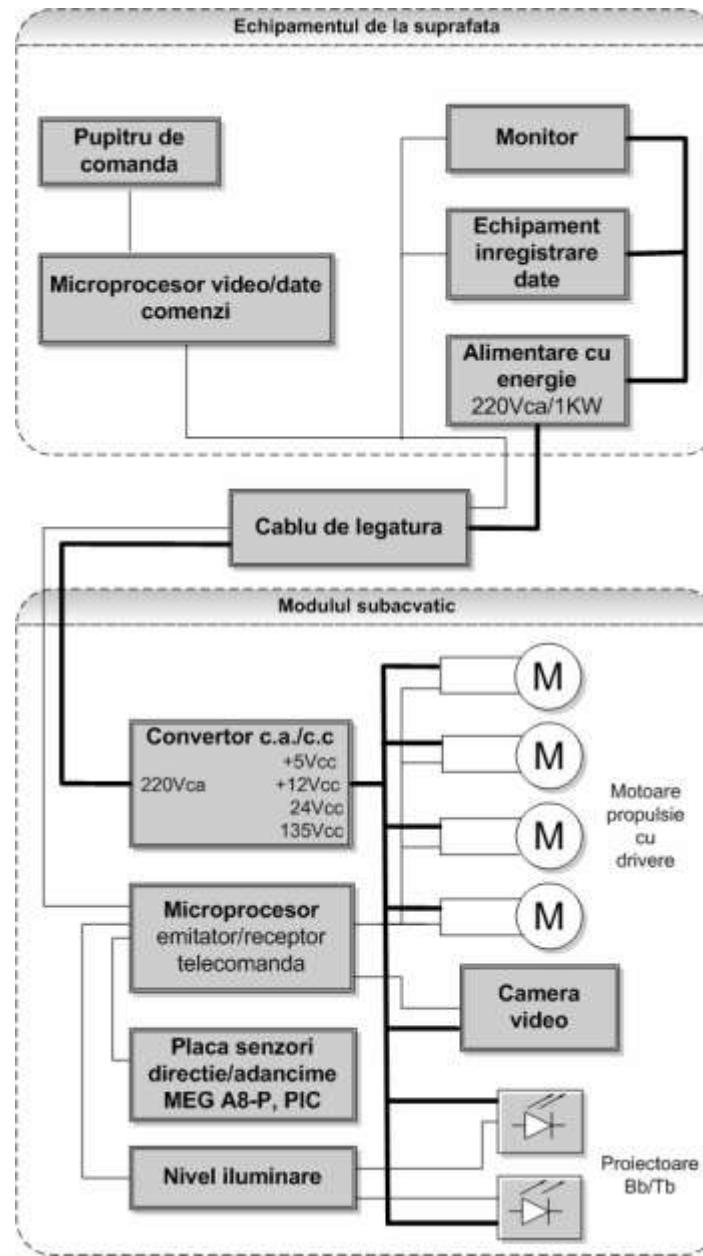
## Schiță ansamblului submersibil, varianta 2



Modul submersibil  
varianta 2

- 1.Corp etans
- 2.Camera video
- 3.Motor propulsie
- 4.Motor sus/jos
- 5.Proiectoar
- 6.Cadru protectie

## Schema bloc a ansamblului submersibil



- **Calculul rezistenței la presiune**

Calculul rezistenței la presiune ajută la dimensionarea corpurilor etanșe care asigură flotabilitatea și adăpostesc și componentele electronice ale sistemului. Pentru calculul rezistenței la presiune, am folosit programul UNDER PRESSURE 4.5 al firmei DeepSea Power & Light, Inc. din San Diego-California, S.U.A.

*Varianta 1 a modulului submersibil*

Am considerat un tub din aluminiu (AL 2024 - dural) având la capete emisfere din același material, cu lungimea totală de 500 mm. Diametrul exterior este de 134 mm, iar grosimea peretilor este de 2 mm.

Corpul etanș rezistă la o presiune a coloanei de apă de peste 164 m (0,0167 Kbar = = 16,48 atm), rezistența minimă fiind dată de partea cilindrică a corpului etanș care este cea mai puțin rezistentă. Corpul etanș are o greutate totală (în aer) de 1,14 kg și o greutate în apă de - 5,44kg (rezervă de flotabilitate de 5,44kg).

## *Varianta 2 a modulului submersibil*

Am considerat un tub din aluminiu (AL 2024 – dural)) cu lungimea totală de 380 mm, având la un capăt (în pupa) o emisferă din aluminiu cu diametrul exterior de 210 mm, iar în celălalt capăt (în provă) sudată o flanșă din același material. Lungimea totală a tubului este de 380 mm. Diametrul exterior este de 210 mm, iar grosimea peretilor este de 2 mm.

Corpul etanș rezistă la o presiune a coloanei de apă de peste 113 m (0,0127 Kbar = = 11,35 atm), rezistența minimă fiind dată de partea cilindrică a corpului etanș care este cea mai puțin rezistentă. Corpul etanș are o greutate totală (în aer) de 2,24 kg și o greutate în apă de - 10.34kg (rezervă de flotabilitate de 10,34kg).

În ambele variante adâncimea teoretică maximă de scufundare depășește 100 m, iar rezerva de flotabilitate, 10,88 kg pentru varianta 1 (sunt două coruri etanșe) și 10,34 kg pentru varianta 2, asigură o echipare standard a modulului submersibil, montarea unui cadru de protecție și un leșt variabil necesar echilibrării statice și dinamice.

## **Calculul coordonatelor centrului de masă și ale centrului de presiune – calculul flotabilității**

### *Calculul coordonatelor centrului de masă*

Pentru calcularea coordonatelor centrului de masă al produsului s-a utilizat un sistem de coordinate atașat produsului, cu originea în punctul extrem spate al corpului etanș dreapta (privind în sensul normal de deplasare orizontală) al produsului. Pentru calcularea coordonatelor centrului de masă al produsului s-au utilizat relațiile:

$$X_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad Y_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad Z_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

unde mi reprezintă masele celor n părți componente ale produsului, iar xi , yi și zi reprezintă coordonatele centrelor de masă ale părților componente ale produsului.

## VARIANTA 1

Sumele maselor părților componente, care apar ca numitor comun în relațiile de mai sus reprezintă, evident, masa M a produsului, pentru care s-a considerat valoarea  $M = 12,68 \text{ kg}$ .

*Tabelul 5.5. Masele și distribuția lor, varianta 1*

Nr. crt. [ i ]	Denumire parte componentă	Masa părții componente	Coordonatele centrului de masă		
			$m_i$ [ kg ]	$x_i$ [ mm ]	$y_i$ [ mm ]
0	1	2	3	4	5
1	Corpul etanș stânga	2,14	250	250	0
2	Corpul etanș dreapta	2,14	250	0	0
3	Motorul propulsie verticală	0,90	200	125	- 50
4	Motorul propulsie transversală	0,90	250	125	-150
5	Motorul stânga propulsie longitudinală	0,90	112	250	-150
6	Motorul dreapta propulsie longitudinală	0,90	112	0	-150
7	Camera video	1,80	395	125	- 75
8	Proiectoarul stânga	0,50	415	250	-150
9	Proiectoarul dreapta	0,50	415	0	-150
10	Cadrul metalic pentru protecție-suport	2,00	250	125	- 60

În aceste condiții, determinarea coordonatelor centrului de masă al produsului a furnizat valorile:

$\text{CM X} = 260 \text{ mm}$ ;  $\text{CM Y} = 125 \text{ mm}$ ;  $\text{CM Z} = - 67,4 \text{ mm}$ .

## VARIANTA 2

Pentru calcularea coordonatelor centrului de masă al produsului s-a utilizat un sistem de coordinate atașat produsului, cu originea în punctul extrem spate al corpului etanș (privind în sensul normal de deplasare orizontală) al produsului.

*Tabelul 5.5. Masele și distribuția lor, varianta 2*

Nr. crt. [ i ]	Denumire Partecomponentă	Masa părții componente	Coordonatele centrului de masă		
			$m_i$ [ kg ]	$x_i$ [ mm ]	$y_i$ [ mm ]
0	1	2	3	4	5
1	Corpul etanș	4,19	210	0	0
2	Motorul propulsie verticală stânga	0,90	210	135	0
3	Motorul propulsie verticală dreapta	0,90	210	-135	0
4	Motorul stânga propulsie longitudinală	0,90	90	135	0
5	Motorul dreapta propulsie longitudinală	0,90	90	-135	0
6	Camera video	1,80	480	0	0
7	Proiectoarul stânga	0,50	480	90	-70
8	Proiectoarul dreapta	0,50	480	-90	-70
9	Cadrul metalic pentru protectie-suport	2,00	210	0	-80

Masa totală = 12,59 kg. Coordonatele centrului de masă sunt:  
CM X = 252,9 mm; CM Y = 0 mm; CM Z = - 18,3 mm.

## *Calculul coordonatelor centrului de presiune (centrul de carenă)*

Pentru calculul coordonatelor centrului de presiune al produsului s-a utilizat același sistem de coordonate utilizat și la determinarea coordonatelor centrului de masă. De asemenea, în faza actuală a calculelor, s-a considerat produsul complet imersat în apă de mare (s-a considerat densitatea medie a apei Mării Negre  $m^3 \rho = 1020 \text{ kg}$ ).

$$X_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i x_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad Y_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i y_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad Z_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i z_i}{\sum_{i=1}^n V_i},$$

unde  $V_i$  reprezintă volumele celor  $n$  părți componente ale produsului, iar  $x_i$ ,  $y_i$  și  $z_i$  reprezintă coordonatele centrelor de masă ale părților componente ale produsului.

Volumul total al produsului, calculat ca sumă a volumelor părților componente este  $V = 14618 \text{ cm}^3$ . Forța arhimedică totală  $F_V$  g arhimedica  $= V \cdot \rho \cdot g$ , unde  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , are valoarea  $F = 146 \text{ N}$ . Greutatea produsului  $G = mg = 134 \text{ N}$ . Rezultă o rezervă de flotabilitate de 12 N, care ar permite ca în stare de plutire să avem o parte scufundată de cca. 92 % din volumul total al corpului.

*Tabelul 5.6. Centre de presiune, varianta 1*

Nr. Crt. [I]	Denumire Partecomponentă	Volumul părții componente	Coordonatele centrului de presiune			
			$V_i [\text{cm}^3]$	$x_i [\text{mm}]$	$y_i [\text{mm}]$	$z_i [\text{mm}]$
0	1	2		3	4	5
1	Corpul etanș stânga	5287		250	250	0
2	Corpul etanș dreapta	5287		250	0	0
3	Motorul propulsie verticală	194		200	125	- 50
4	Motorul propulsie transversală	194		250	125	-150
5	Motorul stânga propulsie longitudinală	194		112	250	-150
6	Motorul dreapta propulsie longitudinală	194		112	0	-150
7	Camera video	1487		395	125	- 75
8	Proectorul stânga	262		415	250	-150
9	Proectorul dreapta	262		415	0	-150
10	Cadrul metalic pentru protecție-suport	729		250	125	- 60

Coordonatele centrului de presiune al produsului, calculate în baza datelor de mai sus, au valorile:

$$\text{CP X} = 267 \text{ mm}; \text{ CP Y} = 125 \text{ mm}; \text{ CP Z} = -23,5 \text{ mm}.$$

Volumul total al produsului, calculat ca sumă a volumelor părților componente este  $V = 13.156 \text{ cm}^3$ . Forța arhimedică totală  $F_V$  g arhimedica  $= V \cdot \rho \cdot g$ , unde  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , are valoarea  $F = 132 \text{ N}$ . Greutatea produsului  $G = mg = 123 \text{ N}$ . Rezultă o rezervă de flotabilitate de 9 N, care ar permite ca în stare de plutire să avem o parte scufundată de cca. 93 % din volumul total al corpului.

*Tabelul 5.6. Centre de presiune, varianta 2*

Nr. crt. [ i ]	Denumire Parte componentă	Volumul părții componente	Coordonatele centrului de masă		
		$V_i [\text{cm}^3]$	$x_i [\text{mm}]$	$y_i [\text{mm}]$	$z_i [\text{mm}]$
0	1	2	3	4	5
1	Corpul etans	9640	210	0	0
2	Motorul propulsie verticală stânga	194	210	135	0
3	Motorul propulsie verticală dreapta	194	210	-135	0
4	Motorul stânga propulsie longitudinală	194	90	135	0
5	Motorul dreapta propulsie longitudinală	194	90	-135	0
6	Camera video	1487	480	0	0
7	Proectorul stânga	262	480	90	-70
8	Proectorul dreapta	262	480	-90	-70
9	Cadrul metalic pentru protectie-suport	729	210	0	-80

Coordonatele centrului de presiune al produsului, calculate în baza datelor de mai sus, au valorile:

$$\text{CP X} = 247,7 \text{ mm}; \text{ CP Y} = 0 \text{ mm}; \text{ CP Z} = -7,2 \text{ mm}.$$

## Funcția de autosalvare

Pentru asigurarea recuperării modulului submersibil, în cazul în care se întrerupe semnalul de comandă sau alimentarea cu energie, în termenii de referință este prevăzută dotarea cu un lest detașabil a cărui largare să permită urcarea rapidă la suprafață (funcția de autosalvare).

Această metodă de recuperare presupune dotarea modulului submersibil cu:

- un lest de o anumită greutate (0,5 kg – 1 kg);
- un dispozitiv de largare a lestului care să acioneze la dispariția tensiunii de alimentare sau a semnalelor de comandă – un electromagnet;
- acumulator care să asigure acționarea electromagnetului.

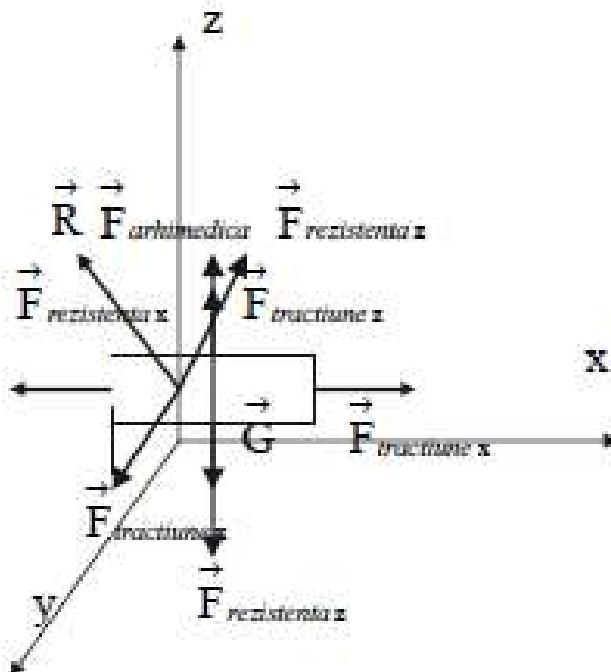
## Rezistență la înaintare

### Forțe

Asupra robotului deplasându-se cu viteza  $v$  constantă, în completă imersie acționează 7 forțe principale a căror rezultantă trebuie să fie nulă:

$$\vec{G} + \vec{F}_{\text{archimedica}} + \vec{F}_{\text{rezistență } x} + \vec{F}_{\text{rezistență } z} + \vec{F}_{\text{închidere } x} + \vec{F}_{\text{închidere } z} + \vec{R} = \vec{0}$$

unde s-a considerat un sistem de axe de coordinate legate de sistemul de referință pământ în ipoteza fluidului aflat în repaus față de pământ și a poziției initiale a robotului în originea sistemului de coordinate. Axele Ox și Oy sunt orizontale, sensul lui Ox coincizând cu sensul de nișcare, iar axa Oz este verticală, cu sensul în sus. În aceste condiții :



- $\vec{G} = m \vec{g}$  este greutatea produsului [N];
- $m$  = masa produsului [kg];
- $g$  = accelerarea gravitațională [ $\approx 9,8 \text{ m/s}^2$ ];
- $\vec{F}_{tractiune}$  = rezultanta forțelor de tractiune imprimate de elice pe direcțiile Ox, Oy sau Oz [N];
- $\vec{F}_{rezistență}$  = rezultanta forțelor de rezistență întâmpinate la înaintarea în fluid pe direcțiile axelor Ox, Oy respectiv Oz [N];
- $\vec{F}_{arhimedica}$  = forță arhimedică [N];
- $\vec{R}$  = forță de rezistență datorată cablului [N].

## Propulsia

Sistemul de propulsie are o influență considerabilă asupra proiectării robotului subacvatic. Tipul propulsoarelor, configurația sistemului și sursa de putere care le alimentează capătă o importanță mai mare ca celelalte componente.

Sistemul de propulsie al minirobotului subacvatic este compus din mai multe propulsoare care asigură mișcarea vehiculului în manieră controlată către locul vizat. Propulsoarele trebuie să fie poziționate pe vehicul astfel încât momentul forței de propulsie față de centrul de masă al sistemului să permită un control și o manevrabilitate adecvate.

- În practică s-a constatat că pentru a propulsa modulul subacvatic cu viteza de 2 Nd (~1m/s), în configurație asemănătoare cu cea aleasă pentru MRS-01, este necesar ca tracțiunea la punc fix (bollard pull) a electromotoarelor să fie de cel puțin 40% din greutatea în aer a modulului. Rezultă că pentru o greutate mai mare de 12,5 kgf este necesar ca propulsoarele să dezvolte o tracțiune de minim 5 kgf.
- Deoarece folosim schema cu două motoare de propulsie pe orizontală, este necesar ca fiecare să aibă o tracțiune de minim 3 kgf. Propulsoarele trebuie să poată fi echipate cu elici cu sens de rotație contrar. Propulsoarele care se potrivesc minirobotului proiectat, MRS-01, sunt cele produse de SEAMOR MARINE, ROPER RESOURCES LTD.( INUKTUN și CYVVECT), SEABOTIX și TECNADYNE (300).

## Sistemul de supraveghere TV

Sarcina de bază a minirobotului subacvatic este observarea, cercetarea și supravegherea mediului subacvatic. Practic, în configurația de bază, minirobotul subacvatic este o cameră video cu mobilitate crescută, capabilă să supravegheze un volum mare de al mediului acvatic.

În termenii de referință au fost stipulate următoarele caracteristici ale sistemului de supraveghere TV în circuit închis:

- Camera TV imersibila ..... grad de protectie IP 68 5 BAR
- Senzor ..... super HAD
- Sensibilitate ..... 0,3 lux
- Obiectiv ..... 3,6 mm (92 °)
- Iluminare ..... 2-3 niveluri, cu LED-uri
- distanță minimă de observare..... 3 m.

Camera TV trebuie să fie zi/noapte, cu iluminare IR în condiții de vizibilitate redusă. Sistemul de iluminare trebuie să conțină cel puțin un proiectoare cu puterea minimă de 50W. Performanțele sistemului de supraveghere depind de caracteristicile și performanțele componentelor (camera TV și proiecție), de poziționarea lor unele față de altele și, în mod deosebit, de proprietățile și caracteristicile apei de mare.

## **Camerele TV**

Camera TV trebuie să aibă o sensibilitate de cel puțin 0,3 lux. Această cerință este îndeplinită atât de camerele alb/negru cât și de camerele color. Pe plan mondial, robotii similari sunt echipați cu o cameră color pentru navigație și o cameră alb/negru pentru observarea precisă a detaliilor. Camera alb negru poate fi prevăzută cu mecanism pan/tilt (sau numai tilt) sau poate fi fixă, în funcție de misiunile care trebuie desfășurate și de mobilitatea și manevrabilitatea modulului submersibil. Ele pot fi echipate cu ZOOM optic sau electronic, mărind astfel posibilitățile de observare.

### **Minicamera UWC – 300**

- Senzor ..... 1/3" Exview CCD, 411.000 pixeli;
- Sensibilitate ..... 0,0003 lux;
- Rezoluție ..... 600 linii (pe orizontală);
- Obiectiv ..... E-Iris, 3,6 mm, F 1,4
- Câmp ..... 70°
- Alimentare ..... 12V-24V, 110mA.

#### **Caracteristici mecanice:**

- Lungime ..... 125 mm (fără conector)
- Diametru ..... 40 mm
- Greutatea -în aer ..... 0,2 kg-în apă.....0,08 kg
- Adâncimea maximă ..... 300 m
- Carcasă ..... poliacetal (DELRIN)- negru

# Proiectoarele

Pentru a putea observa mediul acvatic în orice condiții de iluminare naturală, trebuie să asigurăm o iluminare adecvată a porțiunii de spațiu cercetate. Proiectoarele disponibile în domeniul roboților subacvatici se pot clasifica după sursa de lumină și după caracteristicile fluxului luminos.

Proiector	Bec	Putere (W)	Lumeni	Ore de funcționare
Mini Sealite 20	Halogen 12V/24V	50	950	2000
		100	2.200	1000
		100	1.800	2000
		150	5.000	70
Multi Sealite	Halogen 12V/24V	50	950	200
		100	2.200	1000
		150	5.000	70
Rite Lite	Halogen 12V/24V	50	850	2000
		50	1.400	50
		100	2.200	1000
		100	2.800	70
		100	1.800	2000
		150	4.700	70
WDL - 75	Halogen 12V	75	200	1600
	120 V	75	100	1200
MV - 4000	Halogen 12V/24V 120V	250	4.800	2000
		500	10.000	2000
		250	4.500	2000
		500	9.500	2000
		50	900	2000
		75	1.600	2000
		100	1.800	2000
		150	4.200	100
Led Lite	LED	30	180	50000
Smart Light	LED	31	>406	50000
UWL – 400	LED	35	1740	50000
Sea LED	LED	40	1850	50000

Caracteristici proiectoare

# **Calculul puterii absorbite și al alimentării cu energie**

Blocurile componente ale modulului submersibil sunt:

- Electromotoarele de propulsie: - înainte /înapoi 2 buc.;
- stânga/dreapta 1 buc.(0 buc. pentru varianta 2);
- sus/jos 1 buc.(2 buc. pentru varianta 2);
- Proiectoarele cu LED-uri;
- Camerele video;
- Senzorii de direcție și adâncime;
- Microcomputerul de bord (microprocesorul de comandă și control).

Puterea absorbită în regim de funcționare nominal este sintetizată în tabelul de mai jos.

*Puterea absorbită*

<b>Consumator</b>	<b>Tensiune</b>	<b>Curent</b>	<b>Putere max</b>	<b>Putere totală</b>
Electromotor de propulsie	150Vcc control + 12Vcc viteză ± 5Vcc	2 A	150W	600W
Proector cu LED	24Vcc	1,5A	36W	72W
Cameră video	24Vcc	0,40A	7W	7W
Senzori	12Vcc	0,5A	6W	6W
Microcomputer	5Vcc	4,2A	~25W	25W

## **Senzorii**

Deoarece minirobotul nu poate fi condus vizual de către operator decât pe primii metri ai traectoriei, este imperativ ca evoluția în mediul acvatic să poată fi urmărită și controlată. Echiparea standard a unui asemenea vehicul este alcătuită din senzor de direcție și senzor de adâncime. Robotul mai poate fi echipat și cu alți senzori: de proximitate, sonde ultrason, senzor Doppler.

### ***Senzori de direcție***

Compasul magnetic digital de ultimă generație combină ce mai nouă tehnologie giro cu hardware și software avansate. Tehnologia giro se aplică pe un cip de siliciu și are ca rezultat stabilizarea inertială pe axa Z față de perturbațiile magnetice datorate obiectelor de fier din zona cercetată.

### ***Senzori de adâncime***

Senzorii de adâncime sunt de fapt senzori de presiune, știind că presiunea la o anumită adâncime este determinată de greutatea coloanei de apă.

$$p = p_0 + \rho \times g \times h$$

unde  $p$  – presiunea într-un punct la adâncimea  $h$

$p_0$  – presiunea de la suprafață apei

$\rho$  – densitatea apei de mare

$g$  – accelerația gravitațională

$h$  – adâncimea la care se face măsurătoarea

## **Senzori de proximitate**

Pentru a putea asigura protecția la atingerea fundului apei sau a unor obiecte aflate sub minirobot în timpul coborârii pe verticală, se poate folosi o sondă ultrason miniatură. Ea măsoară distanța între modulul subacvatic și fundul apei cu precizie foarte ridicată, având o rezoluție de 1mm.

Principiul de funcționare care stă la baza acestui senzor este măsurarea intervalului de timp care trece de la emiterea până la recepția unui semnal ultrasonor.

Alegerea senzorilor va trebui făcută în funcție de compatibilitățile cu sistemul de microcomputer care va fi instalat la bordul modulului submersibil, astfel încât să se poată integra în funcția de autopilot. Datele furnizate vor putea fi afișate pe monitorul de control în combinație cu imaginile furnizate de camerele video. Acești senzori au o mare flexibilitate în alimentare, condiții de lucru și montaj fiind în același timp performanți și ieftini.

## CONCLUZII

Dezvoltarea și optimizarea roboților subacvatici telecomandați s-a facut mai ales prin aportul științific adus de institutele de profil (institute navale de cercetări sau de învățământ), prin cooptarea în colectivele de cercetare atât a specialiștilor cât și a studentilor.

Dezvoltarea unei adevărate industrii a submersibilelor telecomandate a dus, inevitabil și la apariția unei industrii foarte puternice a componentelor. Fructificând cercetările și realizările din domeniul militar, după declasificarea acestora, firmele mici au dezvoltat o gamă largă de senzori diversi, miniaturali, de înaltă performanță. Roboții subacvatici au devenit accesibili și utilizatorilor individuali, datorită prețului mic și caracteristicilor de performanță.

În zilele noastre, o treime din economia mondială depinde de existența unui comerț internațional și sistem de transport siguri, iar măriile și oceanele sunt căile cele mai ieftine și mai folosite pentru transportul materiilor prime și al produselor finite.

Pentru înlăturarea amenințărilor teroriste și a consecințelor lor, miniroboții subacvatici au devenit o componentă constantă a sistemului de apărare, prevenire și contracarare, astfel încât porturile, navele și platformele de foraj marin să funcționeze în deplină siguranță.

În urma studierii mai multor miniroboti subacvatici existenti pe plan mondial se pot desprinde două tipuri de configurații, care duc și la variantele de echipare corespunzătoare:

- Minirobotul subacvatic construit pe un șasiu tip "ramă", cu flotor, cu sistemul de propulsie în configurație "în cruce";
- Minirobotul subacvatic al cărui șasiu este corpul etanș care asigură și rezerva de flotabilitate.

Minirobotul subacvatic reprezintă o soluție modernă și economică pentru cercetarea mediului acvatic. El se constituie într-o rezolvare ieftină și sigură a problemelor ridicate de cercetare, supraveghere și exploatare, înlocuind factorul uman în condiții dure de mediu sau periculoase.

Aplicațiile militare și civile sunt numeroase și se extind continuu. Realizarea unui mini-robot subacvatic reprezintă pe plan național o noutate absolută în domeniul robotilor de intervenție și utilitari.

O mențiune specială cu privire la prezentul proiect, este aceea referitoare la proiecția financiară de ansamblu a acestuia, din urmatoarele perspective:

- creșterea permanentă a prețurilor de cost pentru elementele componente ale minirobotului, atât pentru cele achizitionate din import cât și pentru acelea executate de agenți economici naționali;
- posibilitatea certificării soluțiilor tehnice adoptate în procesul de proiectare, prin efectuarea de probe/teste, dedicate, în condiții ce reclamă aparatură și dotari proprii numai unor entități unice pe plan național, cu reflectare directă în prețul de cost solicitat;
- definirea cu un grad mai ridicat de particularitate a cerințelor misiunilor ce urmează a fi executate, pe parcursul derulării proiectului, de către beneficiarul direct - MapN, cu incidentă în efectuarea de dotări / facilități suplimentare în raport cu termenii de referință, respectiv în majorarea amprentei financiare a necesarului de cheltuieli.

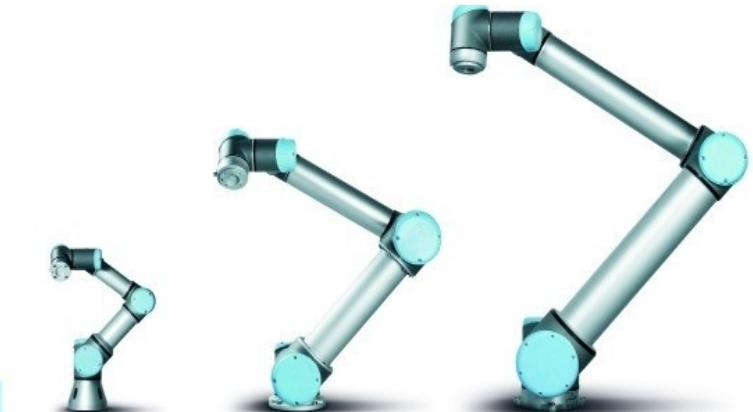
Realizarea, programarea și simularea off-line a robotilor industriali în producția sistemelor de acces. Roboti colaborativi

CURS 13

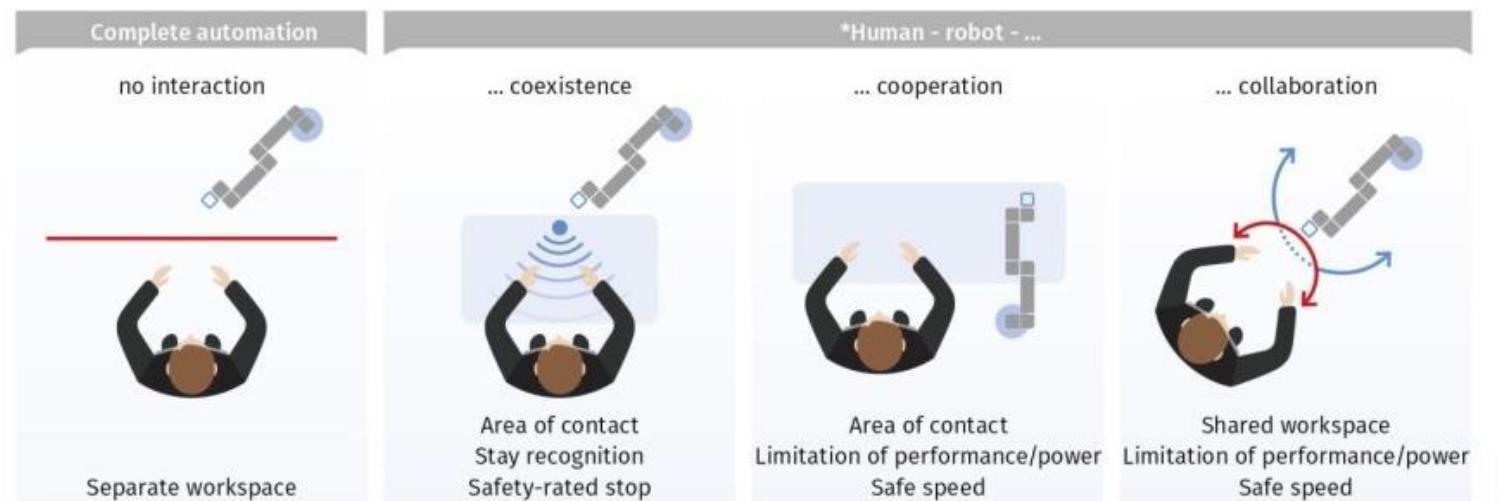
## Moduri de interactiune roboti colaborativi- operatori umani

**Robotii colaborativi au un avantaj destul de mare pentru-ca pot lucra cu omul in paralel. El este prevazut cu sisteme de monitorizare al sistemului de angrenare al bratelor incat daca simte o forta de apasare sau intra in coliziune cu ceva acesta se va oprii imediat si va semnala .**

**In imaginea de mai jos avem prezentate diferite situatii,moduri de interactiune cu robotii colaborativi.**



# UNIVERSAL ROBOTS



Complete automation

no interaction



## Roboti complet automatizati cu spatiu de lucru separat.

Situatii in care robotul lucreaza independent de operator.

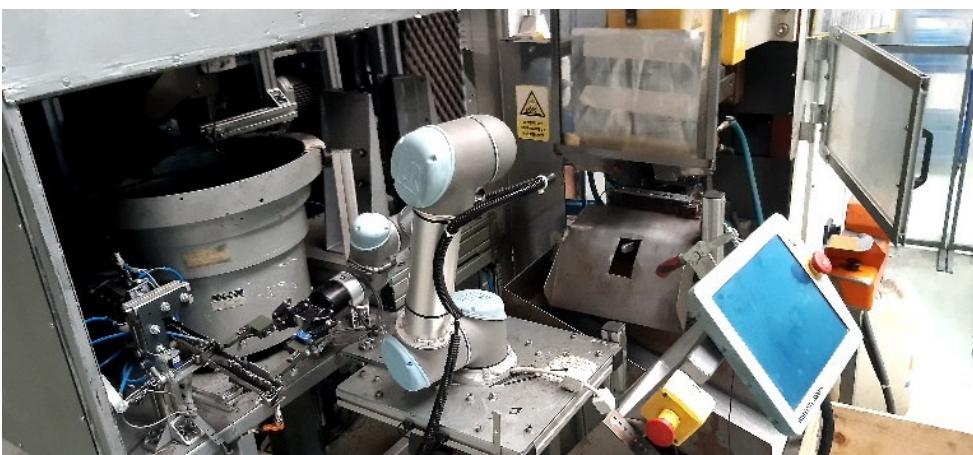


Separate workspace

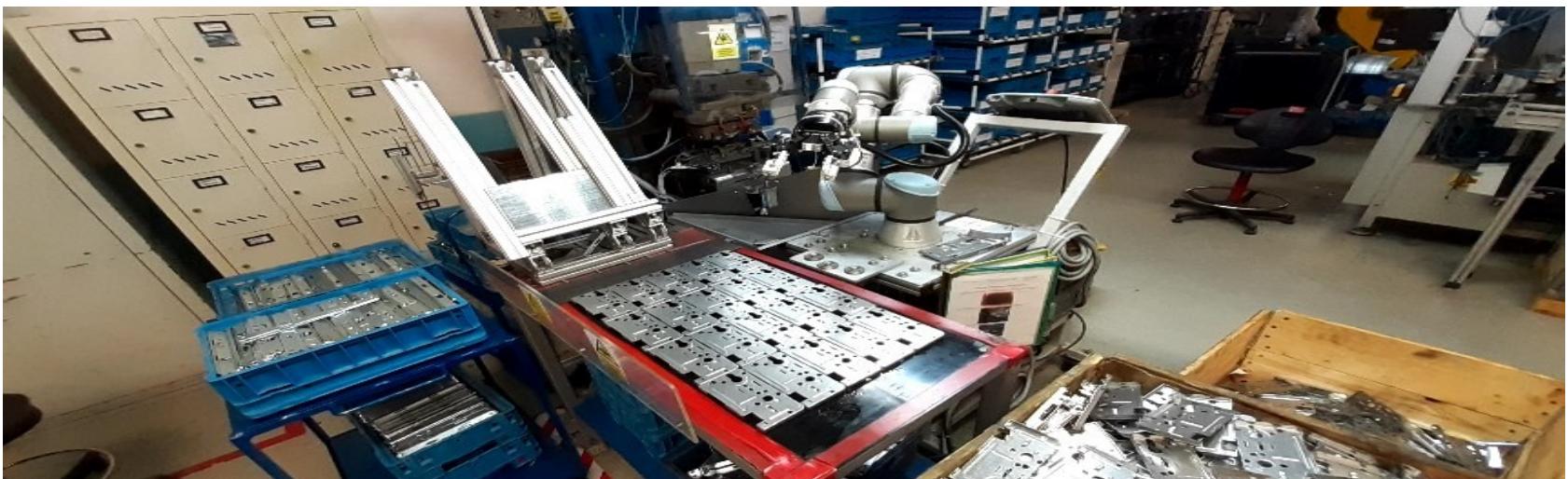
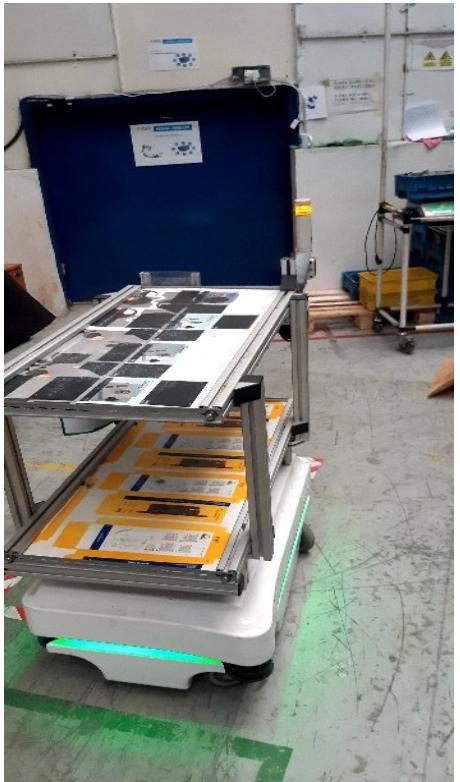


# Roboti colaborativi cu interactiune umana

**Robotul lucreaza independent de operator.**

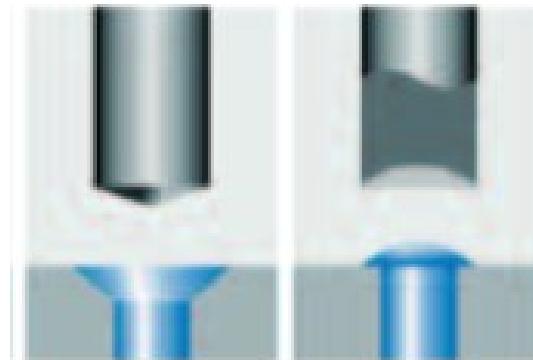


## Roboti colaborativi cu interactiune umana

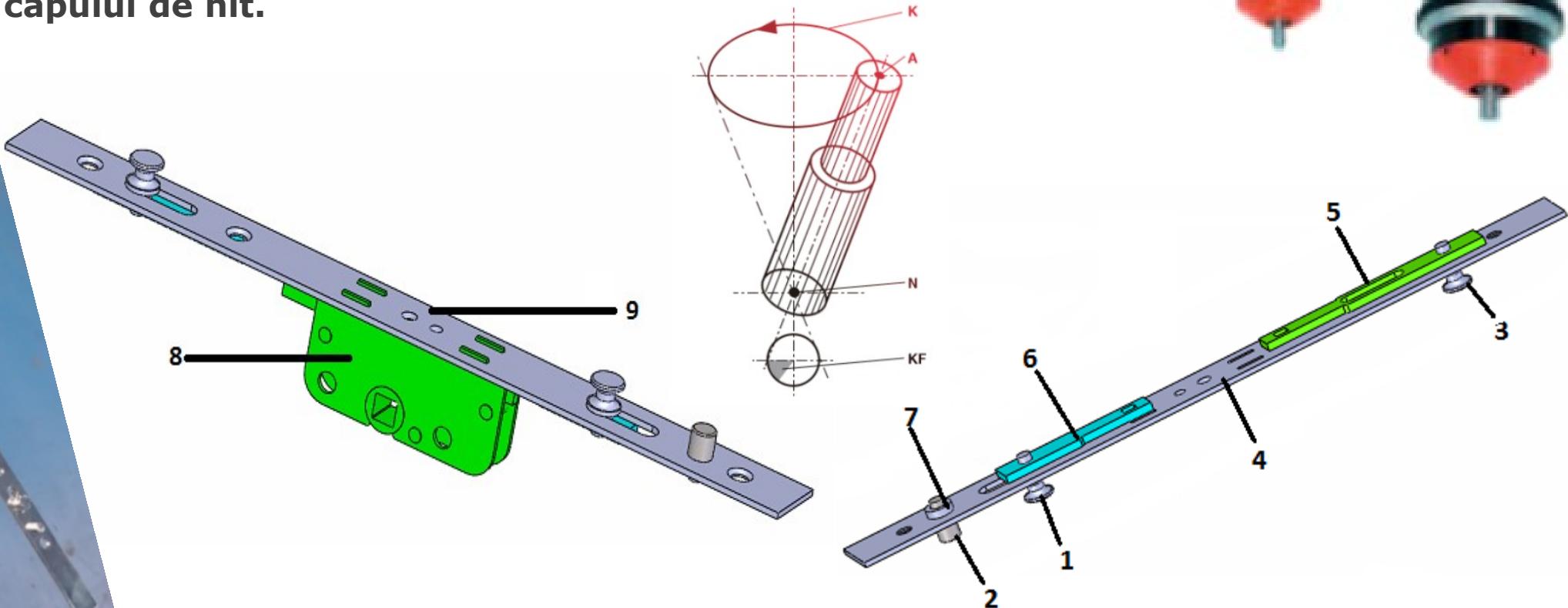


# Reperul produs și mijlocul de producție

Espanioleta este un dispozitiv metalic, folosit pentru închiderea unei ferestre sau a unei uși, este formată din doua brațe metalice dispuse în prelungire acționate de un mâner.

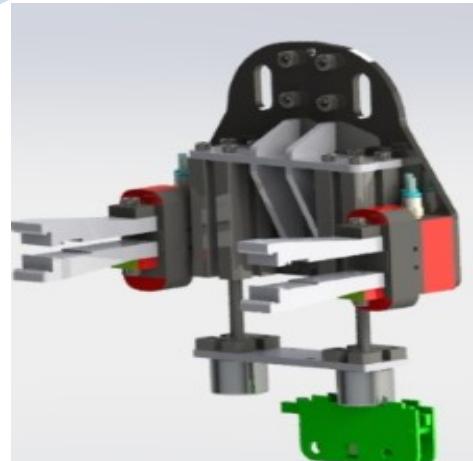


Nituirea orbitală este o asamblare nedemontabilă realizată pe unități speciale de nituire în care căpuitarul descrie o mișcare rotundă pe vârful nitului prin care produce o deformare în jurul capului de nit.

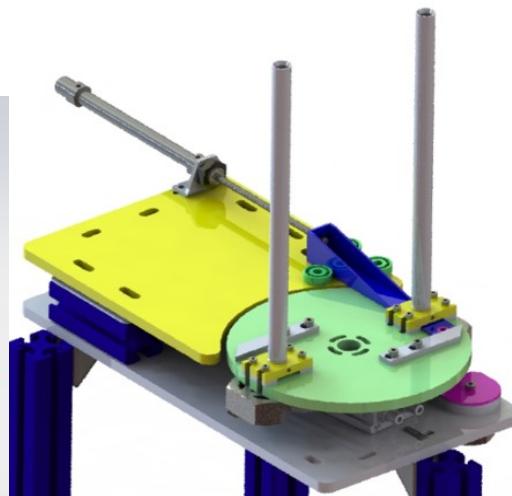


## **Etapele proiectului de automatizare**

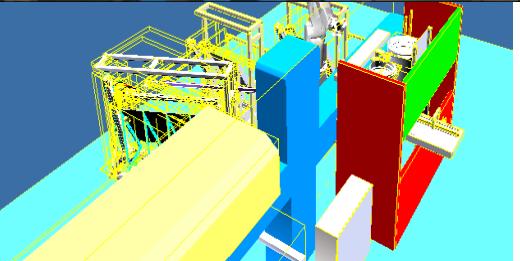
# Cercetarea în detaliu a procesului de producție manual



# **Proiectarea si realizarea subsistemelor**

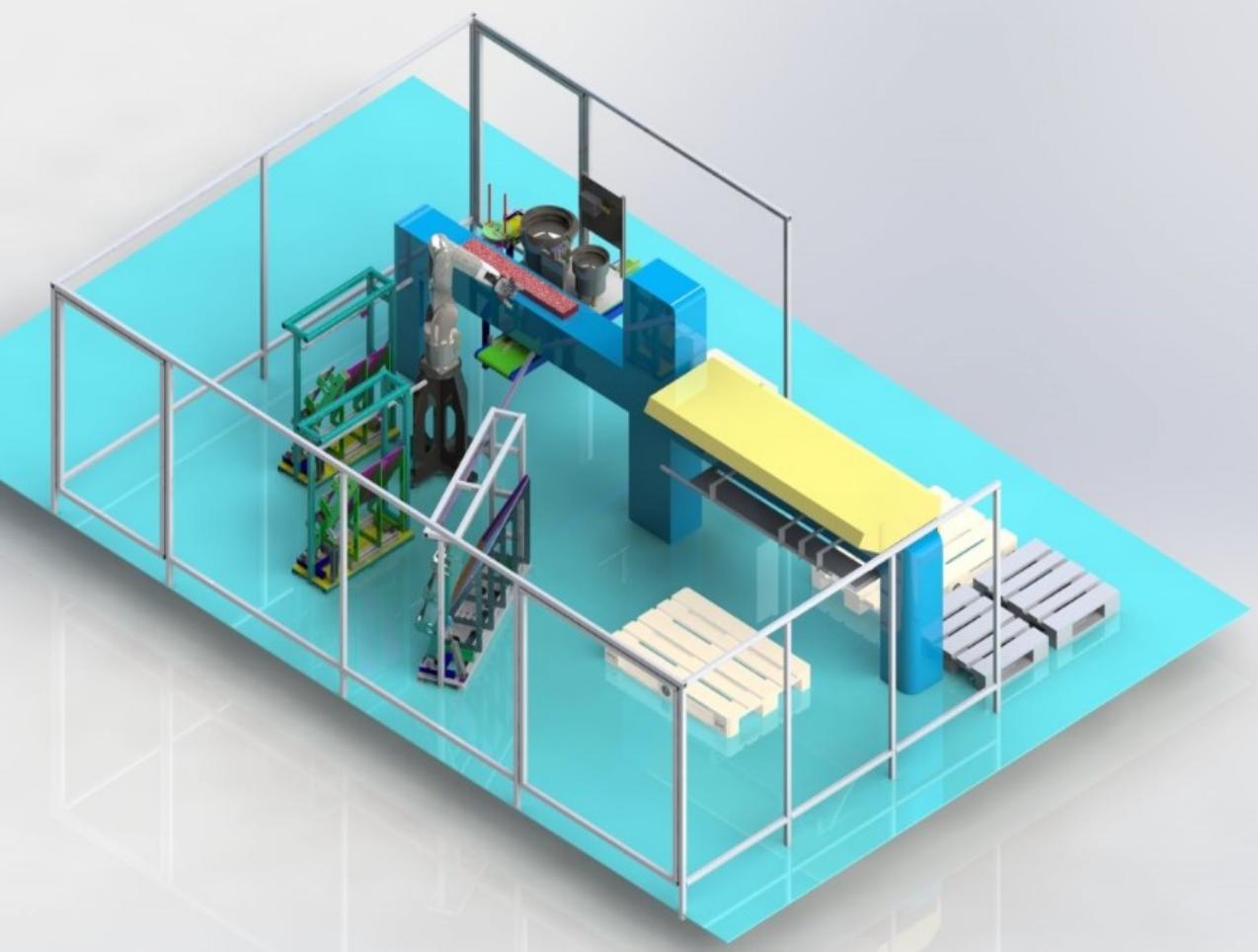


# **Punerea în funcțiune, programarea și simularea off-line**

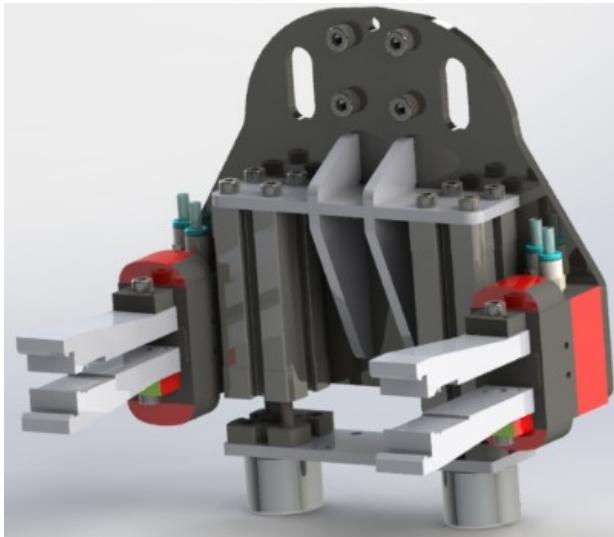


```
 1 Pro1.pcs
 2
 3 (Top)
 4
 5 091
 6 092 reset IO[806]
 7 093 F[8] = 1[10]
 8 094 F[10] = F[9] / 276.79
 9 095 F[5] = F[2] + (- F[10], 0, 0, 0, 0, 0)
10 096 changework 2
11 097 Approach 1, F[5], @P - 80, s = (MaxSpeed * f
12 098 Approach 1, F[5], @P - 15, s = (MaxSpeed * f
13 099
14 100 SetCollisionDetection 2, 32, 0|0, 0, 0, 0,
15 101 CollisionDetection true, 2
16 102 move 1, @P|5, s = (PlaceSpeed * f_local_O
17 103 RESET IO[28]
18 104 set Ic[29]
19 105 delay 200
20 106 set Ic[30?]
21 107 depart 1,@P - 80, s = (MaxSpeed * f_local_OverallRob
22 108 changework 1
23 109 CollisionDetection false, 2
24 110 I[12] = GetCollisionStatus (2)
25 111 if I[12] > 0 then printmsg "Coliziune mushroom 1", 2
26 112 if I[12] > 0 then hold
27 113 I[12] = 0
28
29
30 114
31
32 115 **END MUSHROOM 1 (STANGA)
33
34
35 116
36
37 117 ** START NIT
38 118 F[8] = 1[10]
39 119 F[10] = F[9] / 276.79
```

# De la concept la real

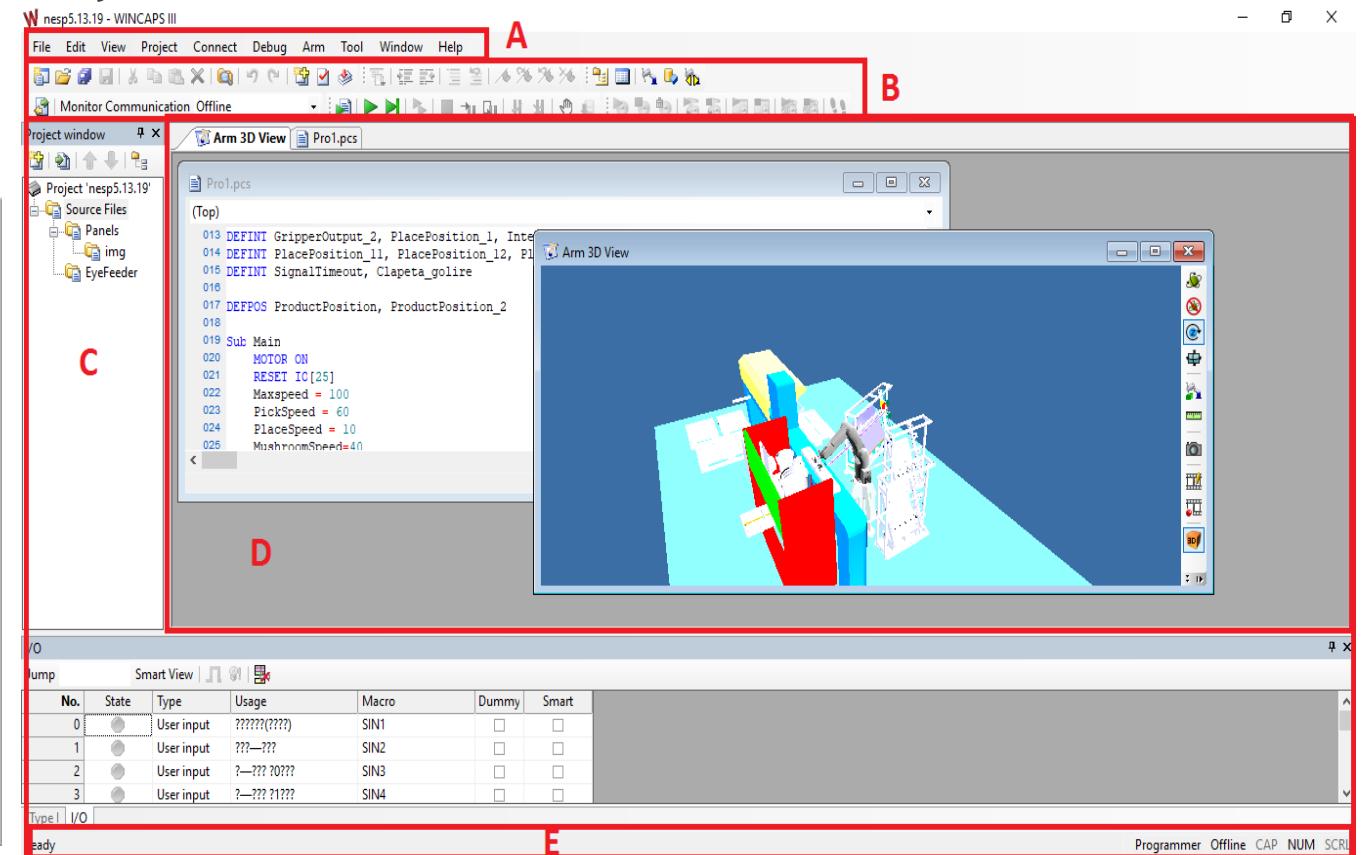
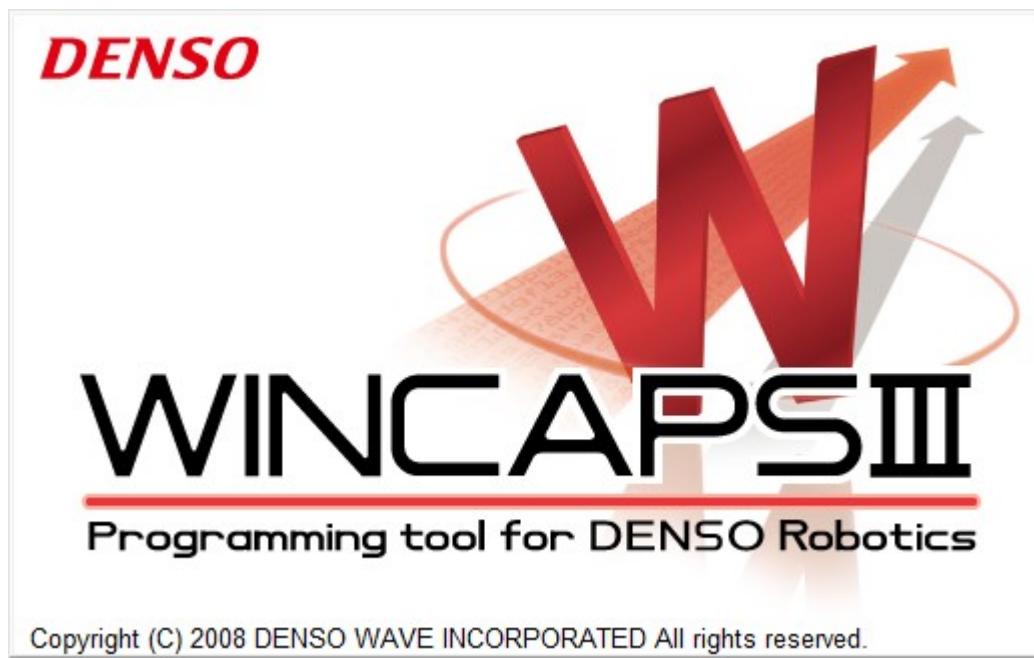


# Robotul Denso VS-087, efectorul, batiul de supra-înălțare și bolurile vibrante



# WINCAPS 3 – unealta de programare și simulare off-line pentru roboții Denso

WINCAPS 3 sprijină funcționarea roboților Denso din toate punctele de vedere, prin furnizarea de diferite funcții practice cu ar fi: crearea de programe și simulari, verificarea traseelor robotului, jurnale de funcționare etc.



# WINCAPS 3 – funcții specifice

Programarea  
roboților  
Denso

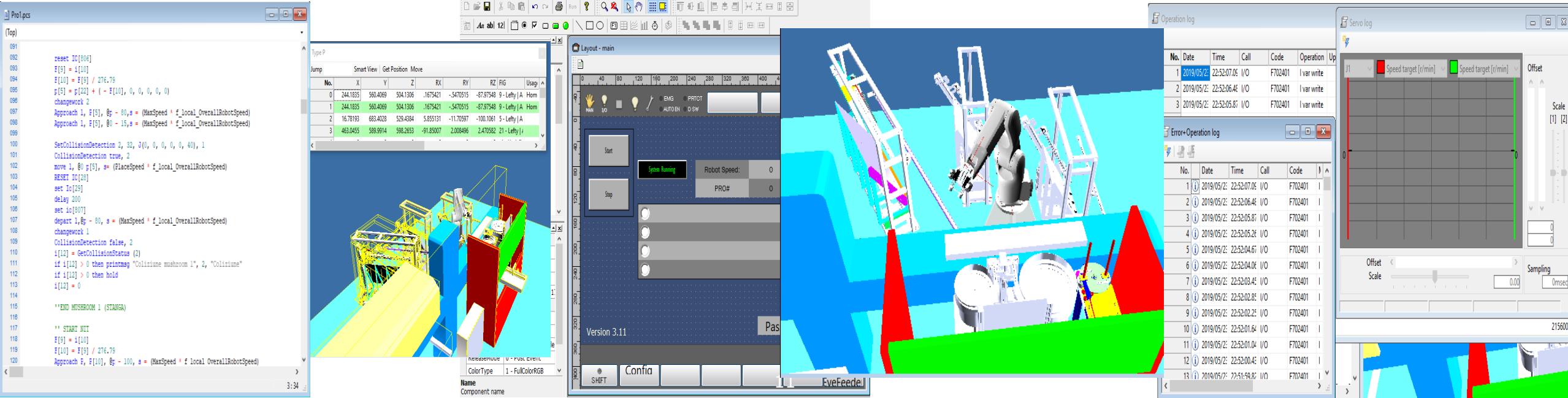
Simularea  
roboților  
Denso

Crearea de  
panouri de  
comandă

Vizualizarea  
roboților și  
echipamentelor

Înregistrarea  
și afișarea  
jurnalelor

Funcții  
folosite on-  
line



**Simularea celulei robotizate, vezi clipul video de pe site!**

