

# SISTEM COMPUTERIZAT PENTRU MONITORIZAREA DEPLASĂRILOR ÎN TREI DIMENSIUNI

Pierre Joseph de Hillerin  
Vlad Văleanu

## 1. Generalități.

Prezenta comunicare raportează despre realizarea unui sistem computerizat, programabil și flexibil destinat monitorizării deplasărilor 3D a unui obiect asimilabil cu un punct material. Sistemul va fi folosit pentru studiile destinate antrenamentului asistat de calculator și testărilor de nivel de dezvoltare a calităților de control neuro-motor de la nivelul de începători până la cel de înaltă performanță, în sporturi ca scrima, canotajul academic, probele de aruncări din altetism, etc. Sistemul este conceput astfel încât prin dezvoltări ulterioare, particulare, ale programelor de interpretare și prelucrare a datelor va permite aplicații în antrenamentul asistat de calculator în alte sporturi, în domeniul recuperării neuromotorii asistate de calculator, precum și în domeniul antrenamentului asistat de calculator pentru întreținere (fitness).

Sistemul este destinat aplicațiilor care satisfac următoarele restricții:

- Conceptul metodei permite asimilarea obiectului în studiu, în cadrul contextului geometric, cinematic și dinamic dat, cu un punct material; obiectul în studiu poate fi, după caz, sportiv, pacient, membru al corpului uman, etc.;
- Conceptul metodei este de așa natură încât monitorizarea mișcării poate fi făcută prin atașarea obiectului în studiu cu legături fizice (fire), la traductorii de deplasare;
- Conceptul metodei este de așa natură încât extensibilitatea și greutatea proprie a firelor cu care obiectul în studiu este atașat la traductorii de deplasare sunt neglijabile în raport cu precizia și repetabilitatea monitorizării poziției;
- Conceptul metodei este de așa natură încât, oricare ar fi traiectoria urmată de obiectul în studiu (asimilat cu un punct material), este exclusă intersectarea firelor de legătură la traductori.

## 2. Schema bloc generală a sistemului de monitorizare a poziției.

Schema bloc a produsului este prezentată în figura 1 și evidențiază:

### **componenta hardware**

- subsisteme electronice de măsurare și transmitere la distanță a valorii instantanee a poziției folosind un dispozitiv mecanic de tip traductor electrooptic/mechanic;
- subsistemul electronic interfață cu calculator compatibil IBM-PC pentru colectarea și memorarea valorilor deplasării instantanee, culese din maximum 4 puncte de măsură;
- calculatorul IBM PC.

### **componenta software**

- programe de comanda și control a subsistemelor electronice;
- programe de culegere și stocare a informațiilor culese de la punctele de măsură;
- programe de filtrare, interpretare și prelucrare a datelor pentru a crea sistemului funcționalitatea de bază și posibilitatea dezvoltării aplicațiilor particulare.

**componenta metodică** specifică inclusă în programe pentru:

- programe de vizualizare a informației;
- programe de arhivare a sesiunilor de lucru;
- programe de modelare a condițiilor de antrenament.

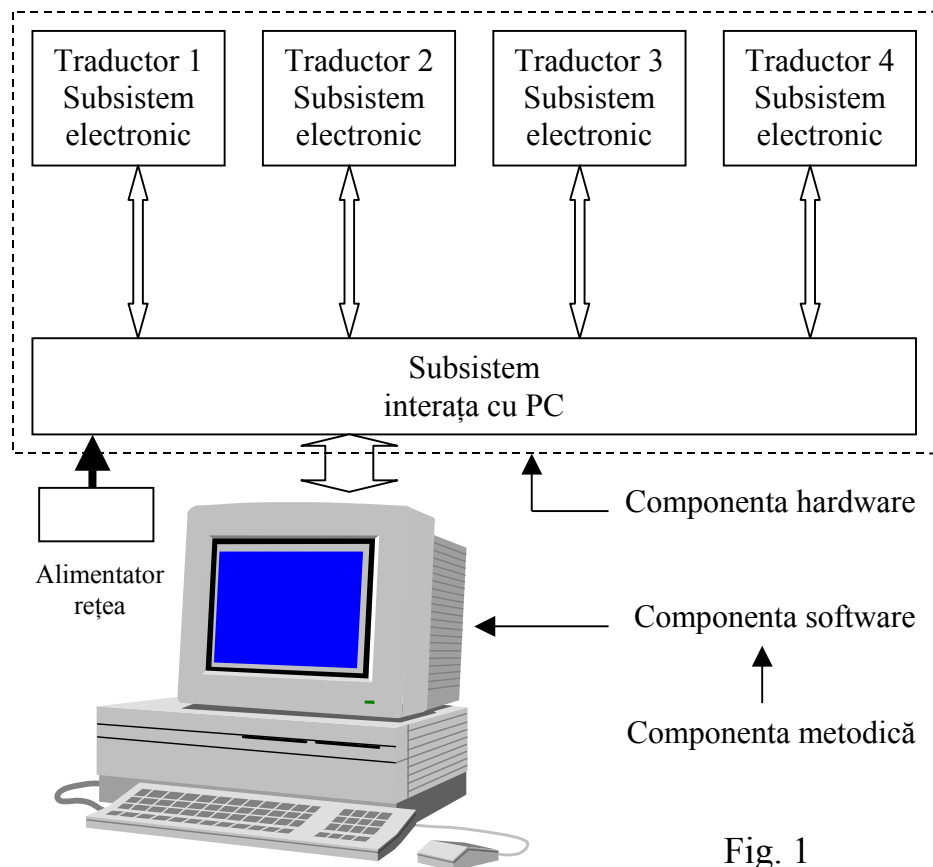


Fig. 1

### 3. Principiul general al metodei.

Considerăm un punct material (sau obiect asimilabil cu acesta în contextul de interes) atașat cu un fir inextensibil înfășurat pe un tambur. Luând în considerare un model unidimensional în care tamburul este poziționat în originea  $O$ , măsurarea unghiului de rotație a tamburului mosorului într-un interval de timp este echivalentă cu măsurarea deplasării ( $d$ ) a punctului material în același interval de timp. Dacă se alege în mod convenabil  $d_0$  distanța la origine la momentul inițial  $t_0$  și se ține seamă și de sensul de rotație coroborat cu valoarea

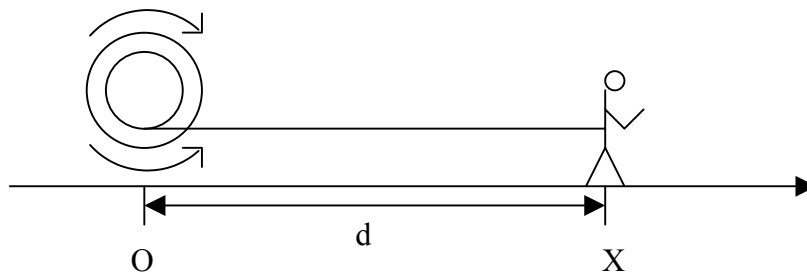


Fig. 2

acesteia, se obține informație despre poziția “instantanee”  $X$  a punctului material pe axa pe care

are loc deplasarea (Fig. 2). Vom numi tamburul pe care se înfășoară firul și a cărei rotație este măsurată, “traductor”.

Deoarece asupra problemei traductorului vom reveni mai departe, pentru moment este suficient să admitem că “citirea”, la un moment dat, a indicației traductorului oferă informație despre distanța  $d$  dintre traductor și punctul material, de-a lungul direcției definite de fir.

Extindem modelul unidimensional descris mai sus la 3 dimensiuni conform Fig. 3. Aici observăm un sistem de referință OXYZ în care sunt poziționați 4 traductori denumiți “Traductor  $i$ ” în punctele de coordonate respective,  $x_i, y_i, z_i$ . Sistemul de traductori cu coordonatele definite față de referențialul ales fixează cadrul în care are loc mișcarea punctului material.

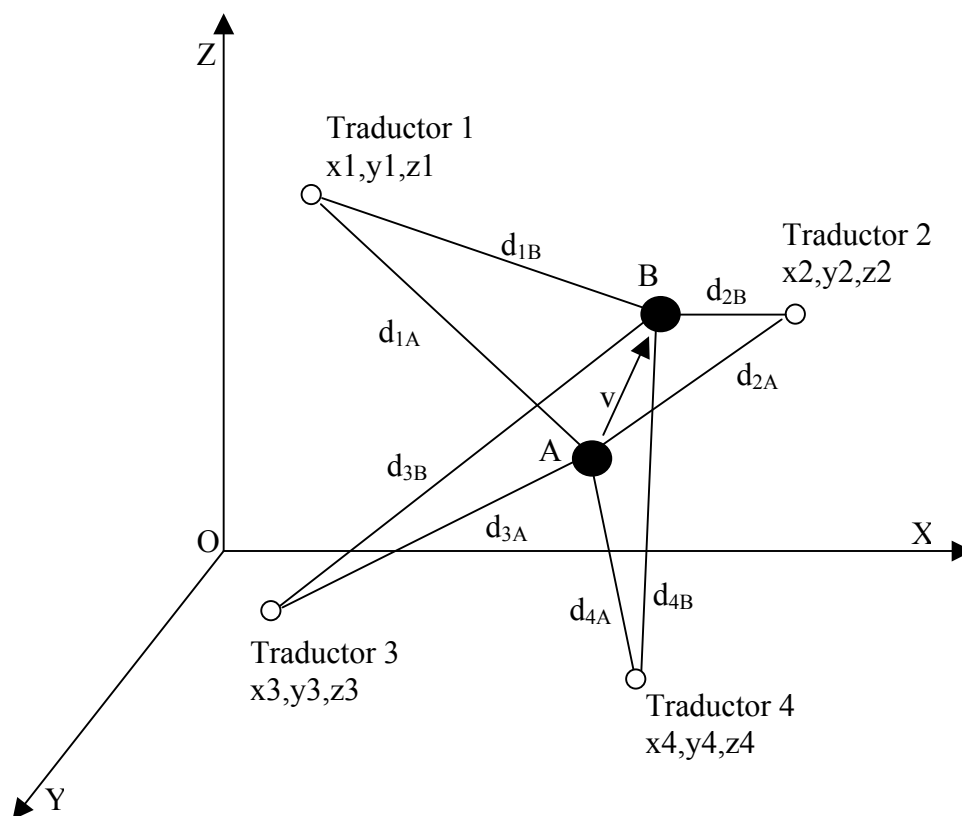


Fig. 3

Poziția curentă a punctului material, de exemplu poziția A de coordonate  $x_A, y_A, z_A$  aflată la distanțele respective  $d_{iA}$  față de traductorii  $i$ , poate fi determinată de un set de ecuații în care sunt implicate pozițiile constante ale traductorilor, distanțele  $d_{iA}$ , precum și restricțiile impuse traiectoriei de către metoda specifică de lucru sau de alte restricții materiale, după caz.

Restricțiile geometrice induse de metoda utilizată, restricții care se materializează prin impunerea unor condiții geometrice speciale, depinzând de metoda particulară a aplicației, sunt esențiale deoarece, în cazul cel mai general, soluția sistemului de ecuații este nedeterminată.

Accentuăm aici că rezolvarea analitică a problemei determinării poziției depinde de cazul particular al unei anumite metode de antrenament. Aceasta, prin impunerea unor condiții inițiale și prin impunerea unor restricții asupra mișcării va ridica nedeterminarea pentru cazul respectiv.

Situația descrisă nu împieteează asupra utilității și versatilității produsului care urmează a fi construit deoarece, în majoritatea cazurilor, situația concretă este mult mai simplă, unidimensională sau, maximum bidimensională. Soluția constructivă adoptată de noi prevăzând utilizarea a patru canale de măsură a distanței, corespunzătoare la patru detectori, a fost aleasă din două motive:

- creșterea productivității aparatului prin posibilitatea achiziționării simultane de date în aplicații uni- și bi-dimensionale;

- furnizarea unei informații suport pentru cazurile mai complicate tri-dimensionale, unde contribuie la reducerea nedeterminării în calculul analitic a poziției.

#### 4. Factorii geometrici de influență asupra determinării caracteristicilor cinematice ale mișcării.

Revenind cu discuția la figura 3 considerăm două puncte succesive A și B ocupate de punctul material în mișcarea de-a lungul traiectoriei. Vom considera aceste două puncte suficient de apropiate încât să aproximăm arcul de traiectorie parcurs între A și B cu un segment de dreaptă. În aceste condiții vectorul  $v$ , viteza instantanee a punctului material de-a lungul traiectoriei definește o direcție. Luând în considerare un singur traductor, poziția acestuia, împreună cu direcția vectorului viteză instantanee, determină un plan. Figura 4 arată segmentul de mișcare între A și B proiectat pe acest plan.

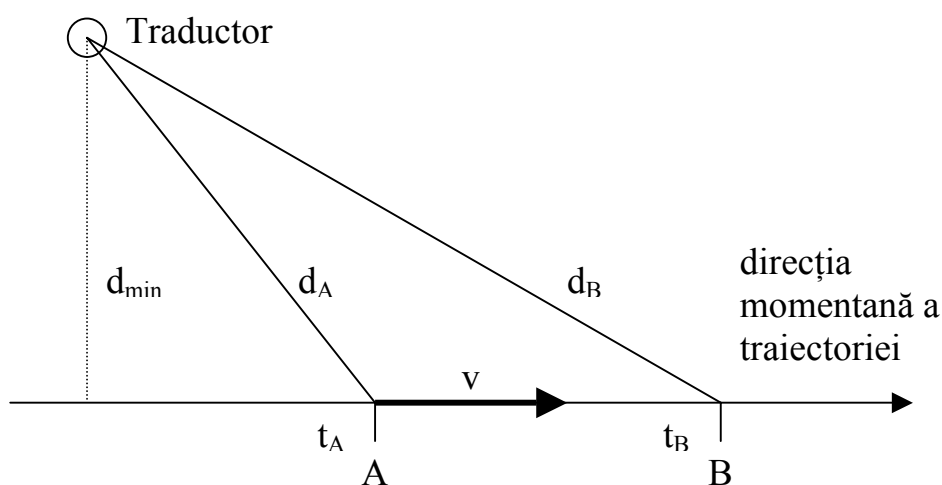


Fig. 4

Vom nota cu:

$\delta$  = lungimea incrementului minim sesizat de traductorul incremental în măsurarea deplasării de-a lungul firului;

$d_{\min}$  = distanța traductorului față de direcția instantanee a traiectoriei (măsurată de-a lungul normalei la direcția vectorului viteză instantanee).

pe care le vom considera constante de aparat în pentru măsurătoarea deplasării AB.

De asemenea,

$n_A$  = numărul de incremente  $\delta$  măsurate pe distanța  $d_A$

$n_B$  = numărul de incremente  $\delta$  măsurate pe distanța  $d_B$

În aceste condiții:

$$d_A = \delta^* n_A$$

$$d_B = \delta^* n_B$$

Prin aplicarea unor relații trigonometrice, din figura 4 rezultă că:

$$AB = d_B \sqrt{1 - \left(\frac{d}{d_B}\right)^2} - d_A \sqrt{1 - \left(\frac{d}{d_A}\right)^2}$$

sau:

$$AB = n_B \delta \sqrt{1 - \left(\frac{d}{n_B \delta}\right)^2} - n_A \delta \sqrt{1 - \left(\frac{d}{n_A \delta}\right)^2}$$

Vom observa că, pentru studiul unei deplasări AB relativ mică în raport cu lungimile de fire desfășurate pentru care se presupune  $n_A$  și  $n_B$  suficient de mari, vom putea aproxima

$$n_A \cong n_B \cong n$$

ceea ce duce la:

$$AB \cong (n_B - n_A) \delta \sqrt{1 - \left(\frac{d}{n \delta}\right)^2}$$

Deoarece măsurătorile de interes, obținute direct prin citirea traductorului și afectate de condițiile geometrice, sunt cea de deplasare AB și respectiv de viteză instantanee  $v$ , vom aprecia influența constantelor de aparat asupra fiabilității măsurării prin analiza influenței factorului introdus de radicalul din expresia de mai sus.

Începem prin a remarca faptul că în cazul unidimensional  $d = 0$  ceea ce duce, evident la relația așteptată:

$$AB \cong (n_B - n_A) \delta$$

Pentru cazul  $d \neq 0$ , vom remarca:

- situația  $d < n \delta$  nu are sens geometric și conduce la rezultat imaginar la evaluarea radicalului;
- recomandarea ca valoarea reziduală a lungimii firului (valoarea lungimii firului când se consideră mobilul în origine) să fie luată cât mai mare pentru asigurarea unui  $n$  cât mai mare

Vom analiza influența lui  $n$  pentru câteva valori ale raportului  $d/\delta$  și o vom comenta în cazul unei valori uzuale  $\delta = 10$  mm (Tabelul 1).

Tabelul 1

$d/\delta$	$n$	radical
2	2	0.0000
2	10	0.9798
2	50	0.9992
100	100	0.0000
100	200	0.8660
100	300	0.9428
100	1000	0.9950
500	500	0.0000
500	600	0.5528
500	1000	0.8660
500	1500	0.9428

- pentru rapoarte  $d/\delta$  mici (ex. = 2), așa cum era de așteptat, ne situăm într-un model cvasi-unidimensional, deci erorile induse de factorul geometric “radical” scad repede sub câteva procente odată cu creșterea lui  $n$  (deja la  $n = 10$ , adică la o lungime de fir de 1m, eroarea scade sub 5% pentru ca la  $n = 50$ , adică la 5m eroarea să fie neglijabilă);
- în cazul unui raport  $d/\delta = 100$ , ceea ce înseamnă, practic,  $d = 1$ m, aducerea erorii de măsurare a deplasării punctului material sub 10% se petrece la o lungime a firului de 3m;
- pentru asigurarea aceluiași condiții de eroare este nevoie de o lungime a firului de 15m când  $d = 5$ m.

Deoarece specificațiile constructive ale produsului, privitoare la eroarea stabilirii valorii deplasării, se referă la **un** canal de măsură și este definită **pe direcția firului**, în cazul unei metodologii de măsură multitractor și multidimensională va fi nevoie de o analiză atentă a

geometriei sistemului de poziționare a traductorilor și de stabilire a valorii reziduale pentru lungimea firului astfel încât erorile de măsură a deplasării precum și a mărimilor derivate să se păstreze în limitele dorite de metodist.

Analiza erorilor efectuată mai sus este valabilă calitativ și cantitativ pentru mărimile cinematice derivate din deplasare deoarece:

$$v = \frac{AB}{t_B - t_A} \qquad a = \frac{v_B - v_A}{t_B - t_A}$$

### 5. Considerații asupra parametrilor dinamici ai sistemului.

Transmiterea informației de poziție către calculatorul PC, echivalentă cu transmiterea conținutului numărătorilor afectați pentru fiecare traductor în parte, se face după o schemă multiplexată.

Problemele care apar la achiziția multiplexată sunt sintetizate în figura 5.

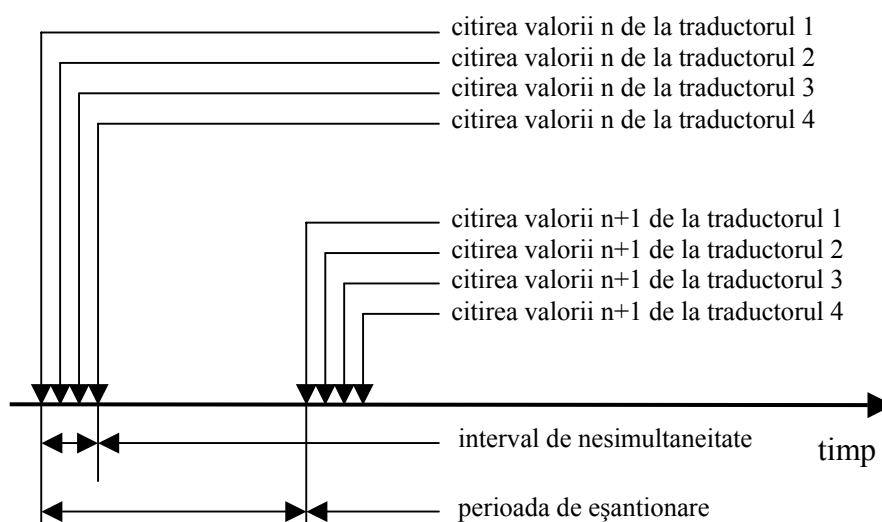


Fig. 5

După cum se observă, transmiterea către calculator a valorilor citite se face în pachete. În cadrul fiecărui pachet, transmiterea valorilor are loc secvențial, apărând un decalaj temporal între valorile instantanee ale numerelor (distanțelor) stocate în numărători. Presupunând că cele 4 valori de distanță citite "simultan" de la cei 4 traductori sunt corelate temporal, evident, "eroarea de nesimultaneitate" trebuie să fie minimă. Sau, cel puțin, trebuie să se impună o restricție asupra potențialei modificări măsurate în cadrul intervalului temporal în care se înscrie citirea pachetului de valori.

În cazul produsului care face obiectul prezentei comunicări, valorile transmise către calculator sunt numere care reflectă valori de distanță exprimate cuantificat. Cuanta de deplasare fiind  $\delta$  și viteza maximă presupusă pentru punctul material monitorizat fiind  $v_{max}$  atunci intervalul minim în care nu poate avea loc o modificare a valorii înscrise în numărător este:

$$\Delta t = \frac{\delta}{v_{max}}$$

pentru un  $v_{max}$  rezonabil de 50m/s și  $\delta$  deja utilizat de 5mm, rezultă un  $\Delta t$  de 100 $\mu$ s. În interiorul acestui interval valoarea stocată în numărător **nu poate varia**, din principiu.

Rezultă că pentru durata achiziționării întregului pachet de 4 valori există o disponibilitate temporală de  $100\mu\text{s}$ .

În aceste condiții relativ laxe, intervalul dintre două citiri, în cadrul aceluiași pachet, a doi numărători diferiți, va fi determinat de posibilitățile tehnologice precum și de un alt factor care va fi discutat imediat.

Revenind la figura 5 vom analiza a doua mărime temporală figurată, perioada de eşantionare. Această perioadă trebuie să asigure citirea valorilor cu o frecvență suficient de mare încât să fie surprinse toate variațiile posibile ale mărimii de interes. O perioadă de eşantionare prea lungă va induce riscul de a nu fi sesizate unele trăsături ale mărimii urmărite, dacă aceasta variază prea repede.

În cazul produsului care face obiectul prezentului proiect s-a stabilit o valoare maximă așteptată a vitezei instantanee a punctului material  $v_{\text{max}}$ . Variația acestei viteze, este și ea o mărime monitorizată, prin sinteză analitică, și pentru a asigura urmărirea ei fidelă este necesară o perioadă de eşantionare suficient de mică. Variația vitezei este accelerația pentru care, în cazul în speță, vom stabili ca valoare maximă:  $a_{\text{max}} = 50 \text{ m/s}^2$ . (aprox. 5g)

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta v}{a}$$

unde:

$\Delta v$  este variația procentuală admisă ca eroare în estimarea vitezei (10%)

$\Delta t$  este intervalul minim în care această variație poate avea loc (în condițiile în care accelerația este egală cu  $a_{\text{max}}$ )

Pentru valorile noastre  $\Delta t = 0.1\text{s}$ , valoare care se constituie ca limită inferioară a valorii perioadei de eşantionare (în condițiile exemplului numeric dat și care a fost astfel ales încât să reprezinte cele mai pretențioase condiții de măsurătoare pentru domeniul de utilizabilitate a produsului).

Revenind la figura 7, vom constata intuitiv, fără alte considerente analitice că perioada de eşantionare trebuie să fie considerabil mai lungă decât intervalul de nesimultaneitate. În cazul nostru vom constata un interval de nesimultaneitate admisibil deja mult mai mic decât perioada de eşantionare.

Ținând seama că intervalul de nesimultaneitate conține de 4 ori intervalul necesar pentru transmiterea valorii la calculator vom stabili pentru "timpul de transfer a mărimii achiziționate" valoarea acoperitoare  $t_{\text{transfer}} = 20\mu\text{s}$ . Această valoare este perfect accesibilă în condițiile tehnologiei utilizate.

Datorită principiului măsurătorii, intervalul minim în care poate avea loc o modificare a valorii stocate în numărător este de  $100\mu\text{s}$ . Vom constata că, deoarece valoarea este constituită incremental prin numărarea unui tren de impulsuri provenite de la traductor, frecvența maximă așteptată pentru trenul de impulsuri este de cca. 10 kHz.

## 6. Sinteza parametrilor funcționali ai sistemului.

- posibilitatea cuplării a maxim 4 traductori (4 canale de măsură);
- preluarea a două trenuri de impulsuri TTL cu frecvența de 10 kHz, transmise pe fir torsadat de la distanța de minim 50m, pe fiecare canal de măsură;
- sesizarea sensului de rotație din defazajul celor două trenuri de impulsuri de la fiecare canal de măsură;
- numărarea impulsurilor up/down, funcție de sens, în numărători cu capacitatea de stocare a impulsurilor de 16 biți, pe fiecare canal de măsură;
- transferul multiplexat către calculator a valorii stocate în numărători;
- timpul de transfer către calculator a valorii stocate în numărător  $20\mu\text{s}$ ;
- perioada de eşantionare a valorii stocate în numărători, 0.1s;
- interfațarea cu calculatorul, pe portul serial și USB.