

## PROIECT 3

*Conducerea inteligentă, cu tehnici avansate și navigația bazată pe senzori performanți și sisteme servoing vizuale a Sistem Autonom Complex-Asistent Robotic Personal SAC-ARP și Sistem Autonom Complex -Vehicul Autonom Multidirecțional SAC-VAM integrate în tehnologii de asistare medico-socială și deservire de linii fabricație flexibilă de precizie, de laborator (linii de mecatronică) și industriale*

### ETAPA 1(2018)

Modelarea cinematică și dinamică a celor două sisteme autonome complexe: Sistem Autonom Complex-Asistent Robotic Personal SAC-ARP și Sistem Autonom Complex -Vehicul Autonom Multidirecțional SAC-VAM și proiectarea structurilor de conducere inteligentă și distribuită a SAC-ARP și SAC-VAM

#### **REZUMATUL ETAPEI**

Această etapă are ca rezultat determinarea modelelor cinematice și dinamice pentru platformele mobile echipate cu manipolatoare robotice, ce reprezintă suportul pentru Sistem Autonom Complex-Asistent Robotic Personal SAC-ARP și Sistem Autonom Complex -Vehicul Autonom Multidirecțional SAC-VAM. Aceste modele, odată obținute, sunt utilizate pentru sinteza legilor de comandă care sunt implementate în structura de conducere.

Modelele cinematice și dinamice pentru SAC –ARP și SAC VAM sunt neliniare și, având în vedere obiectivele celor două sisteme complexe, amândouă având sarcină variabilă, au dus la proiectarea unor structuri de conducere în care algoritmi de conducere, pentru navigație, asigură robustețea în condițiile în care există incertitudini. Pentru conducerea acestor sisteme neliniare, a fost folosită metoda de conducere „Sliding Mode Control”. Sunt prezentate structura de conducere și legile de comandă precum și rezultatele simulării care prezintă avantajele utilizării acestor algoritmi.

## CUPRINS

**CUPRINS**

PROIECT 3 .....	1
Obiectivul 1 Activitatea 1.7 .....	3
1a Modele cinematice și dinamice, pentru platformele mobile cu 2 două roți motoare (și directoare) și două roți libere 2DW/2FW, sau cu 2 două roți motoare (și directoare) și o roată liberă 2DW/1FW echipate cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate 6(DOF) .....	4
1.a.1 Modelul cinematic.....	5
1b. Modelul unui robot (vehicul) cu patru roți motoare și directoare utilizat pentru conducerea neliniară.....	8
1.b.1 Modelul cinematic al SAC-VAM.....	9
1.c Model dinamic pentru SAC-ARP și SAC-VAM.....	11
Obiectivul 2.....	13
2.a <i>Activitatea 1.8</i> Proiectarea și implementare structurilor de conducere a SAC-ARP, conducere cu tehnici avansate, bazată pe modelele cinematice și dinamice. ....	13
Implementare, simulare in buclă si testare in timp real .....	15
2.b Activitatea 1.9 Proiectarea și implementarea structurilor de conducere a SAC-VAM, conducere cu tehnici avansate, bazată pe modelele cinematice și dinamice.....	22
Concluzii .....	25
Rezultate Etapa1.....	25
Livrabile: .....	25

Raportul tehnico-științific prezintă rezultatele cercetărilor care au avut două obiective:

**1. Activitatea 1.7** Modelarea cinematică și dinamică a SAC-ARP, platformă mobilă cu două roți motoare și una sau două libere 2DW/1FW, 2DW/2FW echipată cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate (6-DOF) și Modelarea cinematică și dinamică a SAC-VAM, platformă mobilă cu patru roți motoare și directoare multidirecționale (4DW/SW), echipată cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate (6-DOF):

**1a.** - modele cinematice și dinamice, corespunzătoare situației în care toți parametrii sunt complet determinați, pentru platformele mobile cu 2 două roți motoare (și directoare) și două roți libere 2DW/2FW, sau cu 2 două roți motoare (și directoare) și o roată liberă 2DW/1FW echipate cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate 6(DOF);

**1b.** - modele cinematice și dinamice pentru platformă mobilă cu patru roți motoare și directoare multidirecționale (4DW/SW), echipată cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate (6-DOF).

**2.** Proiectarea structurilor de conducere pentru SAC-ARP, sistem robotic autonom 2DW/1FW și 2DW/2FW și pentru SAC-VAM, sistem robotic autonom multidirecțional 4DW/SW echipat cu manipulator cu 6-DOF.

**2.a** - Activitatea 1.8 Proiectarea și implementare structurilor de conducere a SAC-ARP, conducere cu tehnici avansate, bazată pe modelele cinematice și dinamice.

**2.b** - Activitatea 1.9 Proiectarea și implementarea structurilor de conducere a SAC-VAM, conducere cu tehnici avansate, bazată pe modelele cinematice și dinamice.

### ***Obiectivul 1 Activitatea 1.7***

În acest raport sunt prezentate rezultatele cecetărilor pentru atingerea primului obiectiv, considerând două direcții:

**-1a** modele cinematice și dinamice, corespunzătoare situației în care toți parametrii sunt complet determinați, pentru platformele mobile cu 2 două roți motoare (și directoare) și două roți libere 2DW/2FW, sau cu 2 două roți motoare (și directoare) și o roată liberă 2DW/1FW echipate cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate 6(DOF);

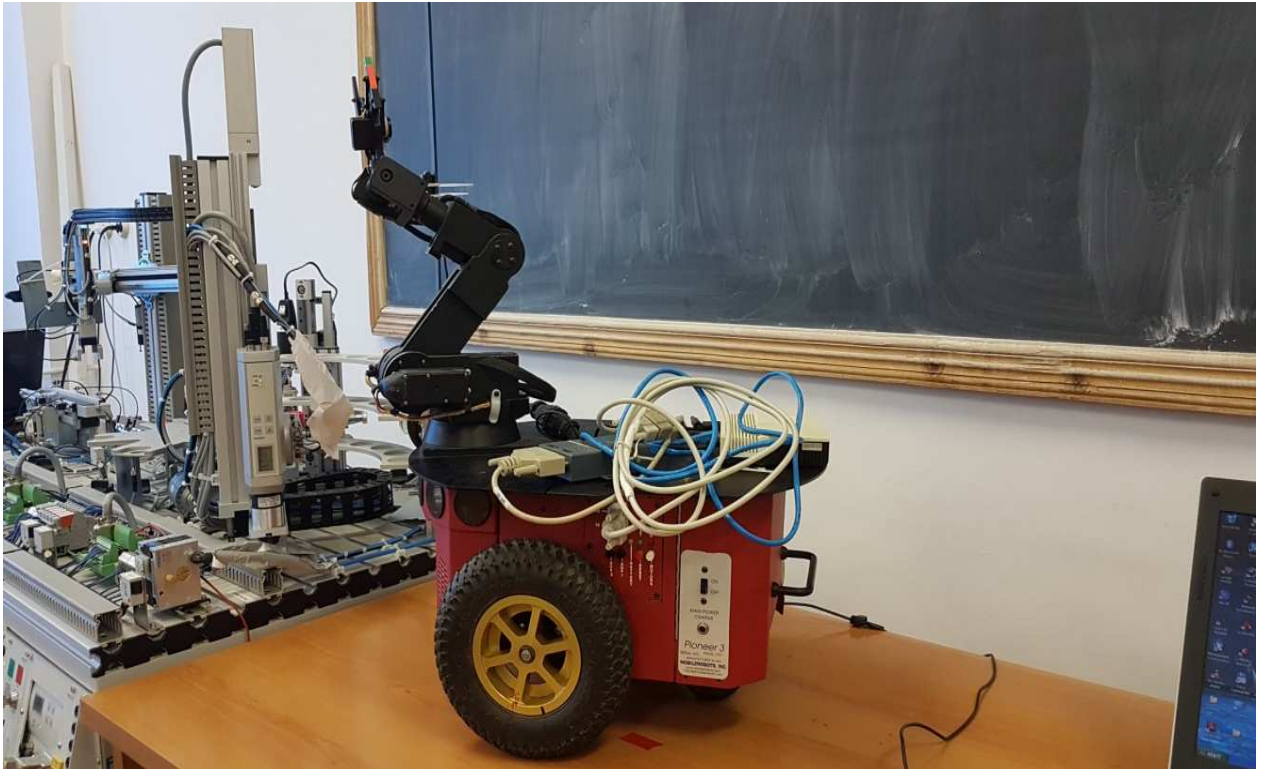
**-1b** modele cinematice și dinamice pentru platformă mobilă cu patru roți motoare și directoare multidirecționale (4DW/SW), echipată cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate (6-DOF).

***1a Modele cinematice și dinamice, pentru platformele mobile cu 2 două roți motoare (și directoare) și două roți libere 2DW/2FW, sau cu 2 două roți motoare (și directoare) și o roată liberă 2DW/1FW echipate cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate 6(DOF)***

Modelele cinematice și dinamice, corespunzătoare situației în care toți parametrii sunt complet determinați, pentru platformele mobile cu 2 două roți motoare (și directoare) și două roți libere 2DW/2FW, sau cu 2 două roți motoare (și directoare) și o roată liberă 2DW/1FW echipate cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate 6(DOF) sunt determinate pentru conducerea (Sistemului Autonom Complex-Asistent Robotic Personal) SAC-ARP.

Echipamentele care sunt considerate pentru SAC –ARP, în acest proiect, sunt:

- robotul mobil Pioneer 3-DX (2DW/1F) echipat cu manipulatorul Pioneer 5-DOF Arm sau cu manipulatorul robotic Cyton Gamma 1500 6-DOF;



- robotul mobil PowerBot (2DW/2FW) echipat cu manipulatorul Pioneer 5-DOF Arm sau cu manipulatorul robotic Cyton Gamma 1500 6-DOF

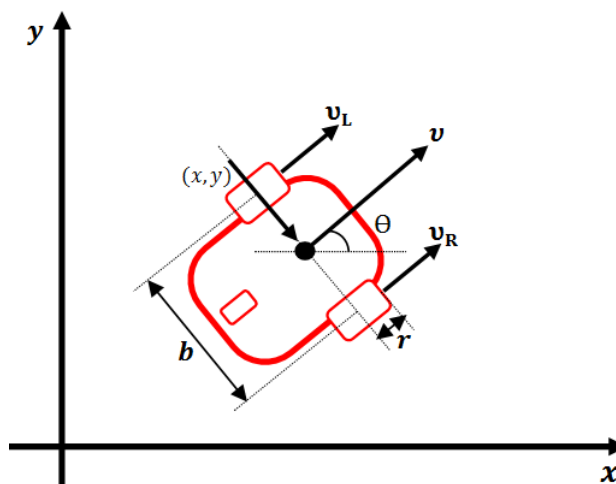


- robotul mobil PatrolBot(2DW/2FW)



### 1.a.1 Modelul cinematic

Platforma mobilă modelată, este un robot mobil de tipul 2DW/1FW sau 2DW/1FW echipat cu două roți motoare având tracțiune diferențială și o a treia roată pentru sprijin, sau încă 2 roți de sprijin. În Figura 1.1. este reprezentat robotul cu toate mărimile care îi caracterizează.



**Fig. 1.a.1.** - Modelul cinematic al platformei mobile de tipul 2DW/1FW și 2DW/2FW

Conform abordărilor din literatură, modelarea cinematică a robotului se poate face folosind sistemul de ecuații (1):

$$\begin{cases} \dot{x}_r(t) = v_r(t) \cos \theta_r(t) \\ \dot{y}_r(t) = v_r(t) \sin \theta_r(t) \\ \dot{\theta}_r(t) = \omega_r(t) \end{cases} \quad (1)$$

unde:

- $x_r$  și  $y_r$  sunt coordonatele carteziene ce definesc centrul geometric al robotului;
- $v_r$  reprezintă viteza liniară a robotului;
- $\theta_r$  definește unghiul direcției de deplasare a robotului;
- $\omega_r$  se referă la viteza unghiulară a platformei;
- $b$  reprezintă ecartamentul între cele două roți motoare.

Modelul cinematic al robotului mobil cu două roți motoare și una sau două directoare este un model neliniar.

Pornind de la modelul cinematic al roboților mobili cu două roți motoare, PatrolBot și Pioneer, utilizați în cadrul proiectului

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix}$$

unde: -  $x_r$  și  $y_r$  reprezintă poziția în plan a robotului

- $\theta_r$  unghiul de orientare al acestuia,
- iar  $v_r$  și  $\omega_r$  viteza de translație și respectiv de rotație ale robotului

Se definește eroarea de urmărire dintre poziția dorită a robotului - poziția unui robot virtual ce ar urmări cu exactitate traiectoria impusă  $q_d(t) = [x_d(t) \ y_d(t) \ \theta_d(t)]^T$  și poziția reală  $q_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ , prin poziția robotului real într-un sistem de coordonate legat de robotul virtual așa cum este reprezentat în figura 1.2

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_d & \sin\theta_d & 0 \\ -\sin\theta_d & \cos\theta_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_d \\ y_r - y_d \\ \theta_r - \theta_d \end{bmatrix}.$$

Prin derivare se poate deduce dinamica erorii de urmărire a traiectoriei ca fiind:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = -v_d + v_r \cdot \cos\theta_e + \omega_d \cdot y_e \\ \dot{y}_e = v_r \cdot \sin\theta_e - \omega_d \cdot x_e \\ \dot{\theta}_e = \omega_r - \omega_d \end{cases} \quad (2)$$

Pentru acest model al robotului s-a proiectat un controler sliding-mode. Controlerul, are ca intrări cele trei erori și trebuie să genereze două comenzi  $v_c$  și  $\omega_c$ . Pentru aceasta s-au definit două suprafețe de comutație  $s_1$  și  $s_2$ , suprafața  $s_2$  integrând atât eroarea laterală  $y_e$  dintre

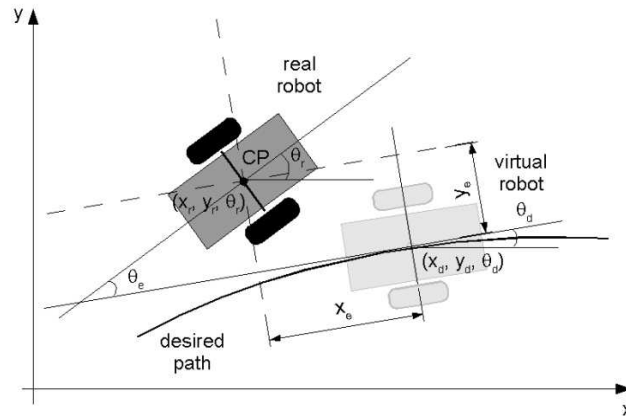


Figura 1.a.2. Eroarea laterală, longitudinală și de orientare

robotul virtual și cel real cât și eroarea de orientare  $\theta_e$ :

$$s_1 = \dot{x}_e + k_1 \cdot x_e$$

$$s_2 = \dot{y}_e + k_2 \cdot y_e + k_0 \cdot \text{sgn}(y_e) \cdot \theta_e,$$

unde  $k_0, k_1, k_2$  sunt constante pozitive,  $x_e, y_e$  și  $\theta_e$  sunt erorile de urmărire a traiectoriei definite de sistemul 2.

Prin dinamica impusă modului de anulare a lui  $s_1$  și  $s_2$ , se controlează viteza cu care este atinsă suprafața de comutație și cu cât este aceasta depășită. În literatură sunt propuse mai

multe legi ce controlează modul în care sistemul evoluează către suprafața de comutație, patru dintre acestea fiind cele mai interesante. Una dintre aceste legi, care asigură și viteza de atingere a suprafeței, este cea care integrează și o componentă proporțională cu distanța până la suprafața de comutație:

$$\dot{s} = -Q \cdot \text{sgn}(s) - P \cdot s$$

Utilizarea acestei legi de atingere a suprafeței de comutație conduce la obținere comenzilor:

$$\dot{v}_c = \frac{-p_1 \cdot s_1 - q_1 \cdot \text{sgn}(s_1) - k_1 \cdot \dot{x}_e - y_e \cdot \dot{\omega}_d - \dot{y}_e \cdot \omega_d + v_r \cdot \dot{\theta}_e \cdot \sin(\theta_e) + \dot{v}_d}{\cos(\theta_e)}$$

$$\omega_c = \frac{-p_2 \cdot s_2 - q_2 \cdot \text{sgn}(s_2) - k_2 \cdot \dot{y}_e + x_e \cdot \dot{\omega}_d + \dot{x}_e \cdot \omega_d - \dot{v}_r \cdot \sin(\theta_e)}{v_r \cdot \cos(\theta_e) + k_0 \cdot \text{sgn}(y_e)} + \omega_d$$

În cadrul controlerului devin astfel prezenți parametri  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $q_1$  și  $q_2$  ca parametri suplimentari. Valoarea acestor parametri trebuie „aleasă” de către proiectantul controlerului. Analizele realizate în literatură au evidențiat o influență semnificativă a valorii parametrilor  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $q_1$  și  $q_2$  asupra duratei de timp necesare atingerii suprafeței de comutație dar și asupra amplitudinii chattering-ului. Acești parametri se aleg de obicei experimental.

### **1b. Modelul unui robot (vehicul) cu patru roți motoare și directoare utilizat pentru conducerea neliniară**

Sistemul Autonom Complex -Vehicul Autonom Multidirecțional SAC-VAM, integrat în tehnologii de asistare medico-socială, considerat în acest proiect, este bazat pe vehiculul autonom SEEKUR Robot Base, cu 4 roți motoare și directoare 4DW/ 4SW. Acest vehicul autonom, care are posibilitatea de deplasare multidirecțională pe orice tip de teren, poate fi echipat cu manipulator robotic cu 6 grade de libertate (6-DOF) sau/și cu o targă, pentru a deveni un *Sistem Autonom Complex -Vehicul Autonom Multidirecțional SAC-VAM integrat în tehnologii de asistare medico-socială* fiind astfel capabil să transporte, să tracteze și să manipuleze targă medicală cu sarcină de greutate mare, având astfel posibilitatea să efectueze salvare pe orice tip de teren.

Vehiculul autonom Seekur Robot Base cu patru roți motoare și patru directoare este prezentat în Figura 1.b.1.





Figura 1.b.1. Vehiculul autonom Seekur 4DW/ 4SW

Când se discută despre un model cinematic al unui vehicul cu 4 roți motoare și directoare, următoarele ipoteze sunt considerate:

- distanțele între roți sunt strict fixe;
- axa de direcție a fiecărei roți este perpendiculară pe suprafață;
- vehiculul nu este alcătuit din părți flexibile.

### 1.b.1 Modelul cinematic al SAC-VAM

Un model cinematic general al unui vehiculului este prezentat în Fig. 1.b.2.A. iar în figura B este dată reprezentarea modelului simplificat. În modelul general, fiecare roată are un anumit unghi de bracaj  $\delta_i$  și un unghiul de alunecare  $\beta_i$ . Unghiul de alunecare, este calculat în funcție de vitezele longitudinale și laterale ale roților ( $v_{xwi}$ ,  $v_{ywi}$ ), după cum urmează:

$$\beta_i = \tan^{-1} \left( \frac{v_{ywi}}{v_{xwi}} \right)$$

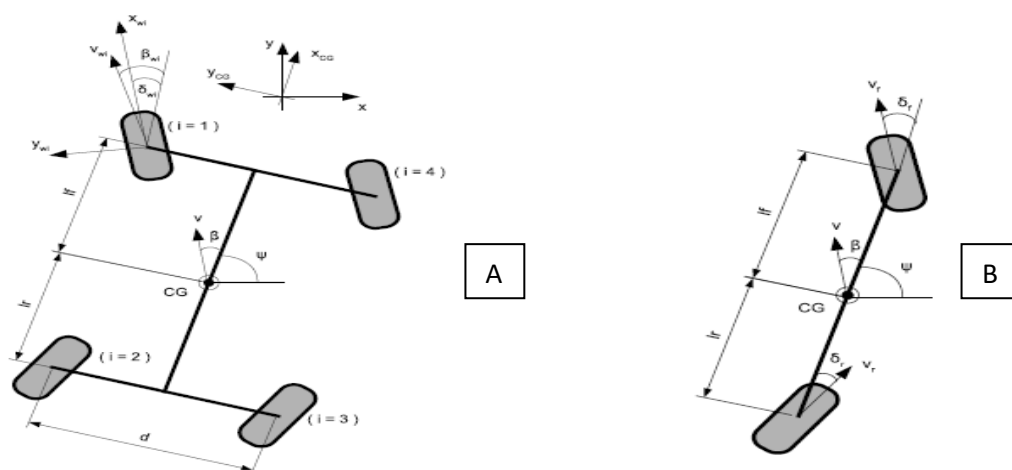


Figura 1.b.2.A. Modelul cinematic pentru un vehicul cu 4 roți motoare și directoare și B. Modelul cinematic simplificat (de tip bicicletă)

Ținând cont de alunecări, restricțiile nonholonomice sunt date de ecuațiile următoare:

$$\dot{x}_{CG} \cdot \sin(\beta + \psi) + \dot{y}_{CG} \cdot \cos(\beta + \psi) = 0$$

$$\dot{x}_{wi} \cdot \sin(\beta_{wi} + \delta_{wi} + \psi) + \dot{y}_{wi} \cdot \cos(\beta_{wi} + \delta_{wi} + \psi) = 0$$

Din restricțiile pentru modelul simplificat (Fig. 1.b.2.B) și modelul cinematic rezultă imediat:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{CG} \\ \dot{y}_{CG} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta + \psi) \\ \sin(\beta + \psi) \\ \frac{\cos\beta \cdot (\tan\delta_f - \tan\delta_r)}{l_f + l_r} \end{bmatrix} \cdot v$$

cu

$$\beta = \arctan \frac{l_f \cdot \tan\delta_r + l_r \cdot \tan\delta_f}{l_f + l_r}$$

unde  $v$  – este viteza lineară a vehiculului și simplificat al unui robot cu patru roți motoare și directoare.

Există două abordări legate de deplasarea (manevrarea) unui robot cu patru roți motoare și directoare, așa cum se poate vedea în Figura 1.b.3.A și respectiv B.

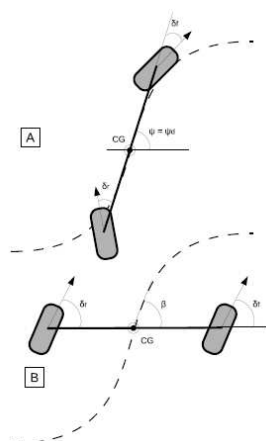


Figura 1.b.3. A. Manevrare de tip zero-slide-slip B. Manevrare paralelă

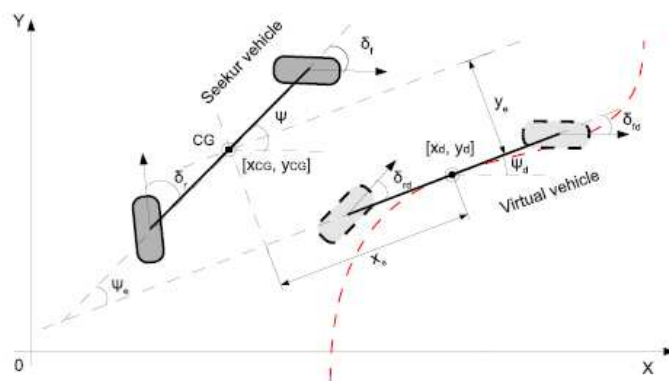


Figura 1.b.4. Erorile de poziție și unghi pentru cazul manevrare paralelă

### 1.c Model dinamic pentru SAC-ARP și SAC-VAM

Sistemele mecanice nonholonomice pot fi descrise de ecuațiile dinamice bazate pe formula Euler-Lagrange [6]:

$$M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) = B(q) \cdot \tau + J^T(q) \cdot \lambda \quad (1)$$

în timp ce restricțiile nonholonomice pot fi exprimate prin:

$$J(q) \cdot \dot{q} = 0$$

unde:

- q este vectorul  $n$ -dimensional al variabilelor de configurare;
- M(q) este o matrice de dimensiune  $n \times n$  pozitiv definită;  $\dot{q}$
- C(q,  $\dot{q}$ ) este un vector  $n$  dimensional al cuplurilor centripete și Coriolis;
- G(q) este vectorul  $n$  dimensional al cuplurilor gravitaționale;
- B(q) este o matrice de dimensiune  $n \times r$ , matricea de transformare a celor  $r$  intrări în cele  $n$  variabile;
- $\tau$  este vectorul  $r$ -dimensional al intrărilor;
- $\lambda$  reprezintă multiplicatorii Lagrange ai restricțiilor forțelor.

Din ecuația 1 și folosind faptul că  $G(q)$  și  $G(q, \dot{q})$  sunt 0, se obține următorul model dinamic:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{y}_r \\ \ddot{\theta}_r \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \theta_r \\ \sin \theta_r & \sin \theta_r \\ L & -L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ -\cos \theta_r \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \lambda \quad (2)$$

unde:

$$\lambda = -m \cdot (\dot{x}_r \cdot \cos \theta_r + \dot{y}_r \cdot \sin \theta_r) \cdot \dot{\theta}_r$$

$\tau_r$  și  $\tau_l$  - reprezintă cuplul roților din dreapta, respectiv stânga ;

m - este masa platformei robotului

I - este inerția platformei robotului

R - este raza

2L - este lungimea axei dintre cele două roți ale robotului mobil.

Luând în considerare condiția fără alunecare, restricția nonholonomică, se poate scrie sub forma :

$$\dot{x}_r \cdot \sin \theta_r - \dot{y}_r \cdot \cos \theta_r = 0$$

Această ecuație nu este integrabilă, astfel încât traiectoria fezabilă a robotului este limitată.

Presupunând că  $u_1 = \tau_r + \tau_l$  și  $u_2 = \tau_r - \tau_l$ , sistemul (2) devine:

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x}_r &= -m \cdot \dot{y}_r \cdot \dot{\theta}_r + \frac{u_1}{R} \cdot \cos \theta_r \\ m \cdot \ddot{y}_r &= m \cdot \dot{x}_r \cdot \dot{\theta}_r + \frac{u_1}{R} \cdot \sin \theta_r \\ I \cdot \ddot{\theta}_r &= \frac{L}{R} \cdot u_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Sistemul (3) poate fi rescris ca:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_r &= -\dot{y}_r \cdot \dot{\theta}_r + \alpha \cdot u_1 \cdot \cos \theta_r \\ \ddot{y}_r &= \dot{x}_r \cdot \dot{\theta}_r + \alpha \cdot u_1 \cdot \sin \theta_r \\ \ddot{\theta}_r &= \beta \cdot u_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Masa reală a robotului ( Wheeled Mobile Robot prescurtat, WMR) se presupune a fi uniform distribuită tot timpul și variază în funcție de timp cu o incertitudine limitată, cu masa nominală cunoscută. Datorită masei variabile în funcție de timp, momentul de inerție depinde de timp și de incertitudinea limitată.

Valorile reale ale parametrilor:

$$\alpha(t) = \frac{1}{R \cdot m(t)}, \beta(t) = \frac{L}{R \cdot I(t)}$$

variază în funcție de incertitudinile limitate superioar

$$\begin{aligned} \alpha_{real}(t) &= \alpha_{nom} + \Delta\alpha(t); |\Delta\alpha| \leq \Delta\alpha_{max} \\ \beta_{real}(t) &= \beta_{nom} + \Delta\beta(t); |\Delta\beta| \leq \Delta\beta_{max} \end{aligned}$$

Diferențierea ecuațiilor cinematice

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix}$$

conduce la :

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_r \cdot \sin \theta_r & 0 \\ \dot{\theta}_r \cdot \cos \theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ w_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{v}_r \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix}$$

Prin urmare

$$\begin{aligned}\ddot{x}_r &= -v_r \cdot \dot{\theta}_r \cdot \sin \theta_r + \dot{v}_r \cdot \cos \theta_r \\ \ddot{y}_r &= v_r \cdot \dot{\theta}_r \cdot \cos \theta_r + \dot{v}_r \cdot \sin \theta_r \\ \ddot{\theta}_r &= \dot{\omega}_r\end{aligned}\quad (5)$$

Comparând ecuația (4) cu ecuația (5):

$$\begin{aligned}-\dot{y}_r \cdot \dot{\theta}_r + \alpha \cdot u_1 \cdot \cos \theta_r &= -v_r \cdot \dot{\theta}_r \cdot \sin \theta_r + \dot{v}_r \cdot \cos \theta_r \\ \dot{x}_r \cdot \dot{\theta}_r + \alpha \cdot u_1 \cdot \sin \theta_r &= v_r \cdot \dot{\theta}_r \cdot \cos \theta_r + \dot{v}_r \cdot \sin \theta_r \\ \beta \cdot u_2 &= \dot{\omega}_r\end{aligned}\quad (6)$$

și înmulțirea primei părți a sistemului (6) cu  $\cos \theta_r$  și a doua parte cu  $\sin \theta_r$  și adăugarea rezultatelor, se obțin următoarele ecuații:

$$\dot{v}_r = \frac{u_1}{m \cdot R}, \quad \dot{\omega}_r = \frac{u_2 \cdot L}{I \cdot R}$$

Unde  $v$  și  $\omega$  sunt vitezele liniare și respectiv unghiulare ale robotului mobil care depind pe de o parte de parametrii constructivi ai robotului  $R$  - raza,  $2L$ , lungimea axei dintre cele două roți ale robotului mobil, și pe de altă parte, de sarcina variabilă prin  $m$ - masa robotului,  $I$  - inerția robotului și de dinamicile nemodelate: cuplurile celor 2 roți.

În consecință, parametrii  $m$ ,  $I$  și  $u_1$ ,  $u_2$  nu sunt complet definiți și ar trebui ca pentru conducerea roboților să folosim algoritmi destinați conducerii sistemelor neliniare, care să poată să răspundă la variații ale parametrilor între anumite limite impuse.

## **Obiectivul 2**

### **2.a Activitatea 1.8 Proiectarea și implementare structurilor de conducere a SAC-ARP, conducere cu tehnici avansate, bazată pe modelele cinematice și dinamice.**

În această lucrare, se propune o structură de conducere hibridă (continuă- cu evenimente discrete) distribuită și ierhizată, în timp, a cărei arhitectură generală este prezentată în figura 2.a.1. La nivelul de bază se găsește interfața cu elementele de execuție (motoarele de cc ce asigură deplasarea) și cu senzorii din structura roboților. Nivelul ierarhic

superior este nivelul de control și toleranță la defecte care asigură autonomia robotului și performanțele impuse în operarea în regim trajectory tracking. Cel de-al treilea nivel al ierarhiei este responsabil de taskurile de comunicare și implementează un server de date și unul de comenzi, cu scopul de a asigura date valide și comenzi prin rețeaua wireless către celelalte noduri ale sistemului distribuit.

Supervizorul este implementat la nivelul ierarhic superior, unde clasa *Grafcet* (prezentată în figura 2.a.1) reprezintă modalitatea prin care funcția de comandă a supervizorului este “tradusă” în comenzi pentru proces.

Această structură de conducere hibridă este utilizată pentru conducerea sistemului autonom complex format din platforma mobilă echipată cu manipulator.

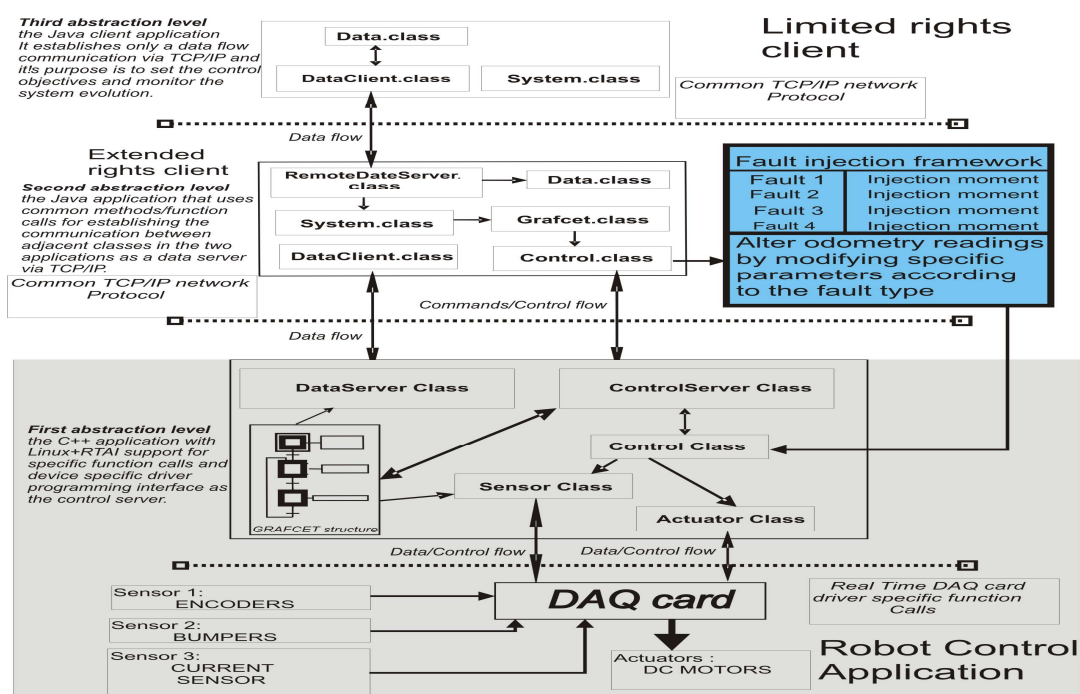


Figura 2.a.1 Structura sistemului avansat de conducere

Pentru implementarea în timp real a structurii de conducere hibride a fost utilizată o aplicație server-side a cărei structură este reprezentată în fig. 2.a.2.

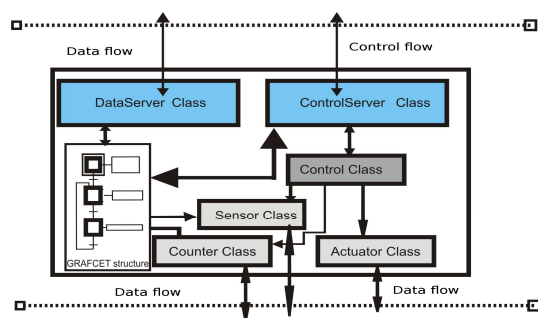


Figura 2.a.2 Structura aplicației *server-side* de la nivelul de bază

Aplicația *client* a fost proiectată astfel încât să satisfacă anumite specificații. Primul tip de client este responsabil de interacțiunea prin operațiile de bază ale robotului: *start*, *stop*, *pause actions*, dar și de monitorizarea stării robotului prin achiziția de date de la senzori.

La nivelul de bază sunt implementate taskurile responsabile de control și monitorizare, ce fac astfel încât senzorii și elementele de execuție să fie contactate în timp real prin caracteristicile I/O ale Linux-RTAI. Componenta aplicației server de la acest nivel este descrisă în figura 2.a.2

La acest nivel, la fiecare perioadă de eșantionare, aplicația citește date de la encodere și calculează comenzile pentru motoarele de cc. Funcțiile specifice ce realizează obținerea valorilor curente de la senzori și trimiterea comenzilor către elementele de execuție sunt în clasele Counter, Sensor și Actuator. Comanda *sliding mode* este evaluată într-o buclă externă astfel încât robotul să atingă următorul punct de pe traiectorie în timpul dorit, ceea ce face ca această comandă calculată să fie transferată în referințe de viteză pentru bucele interne PID. Taskurile de monitorizare și diagnoză rulează concurențial în timp real. Modulul de toleranță la defecte poate trimite mesaje de avertizare către aplicația *client* cu privire la starea curentă a operației executate de robot.

## Implementare, simulare in buclă si testare in timp real

### Descrierea nivelului algoritmului de comandă

Nivelul de comandă are ca obiectiv să asigure robotului operarea în modul *trajectory tracking* adică sistemul urmărește o anumită traiectorie respectând restricții de timp. Obiectivul algoritmului de conducere este să minimizeze erorile de poziție adică eroarea longitudinală, laterală și eroarea unghiulară. Structura acestui nivel este prezentată în figura 2.a.3

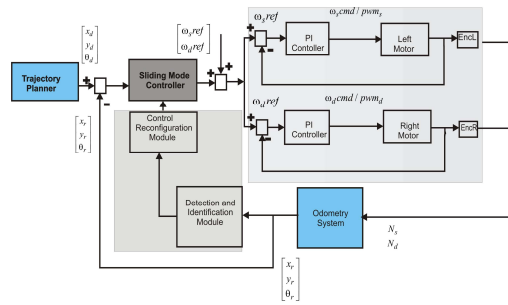


Figura 2.a.3 Structura nivelului de comandă

Legea de comandă *sliding mode*:

$$\dot{v}_c = \frac{-Q_1 s_1 - P_1 \operatorname{sgn}(s_1) - k_1(x_e) - \omega_d y_e - \omega_d y_e + v_r \dot{\theta}_e \sin(\theta_e) + \dot{v}_d}{\cos(\theta_e)}$$

$$\omega_c = \frac{-Q_2 s_2 - P_2 \operatorname{sgn}(s_2) - k_2(y_e) + \omega_d x_e + \omega_d x_e - \dot{v}_r \sin(\theta_e)}{v_r \cos(\theta_e) + k_0 \operatorname{sgn}(y_e)} + \omega_d$$

Are ca obiectiv să asigure o viteză bună de convergență a stării robotului și eliminarea chatteringului. Pentru a asigura stabilitatea sistemului se definește o funcție candidat Lyapunov dată de

$$V = 0.5 s^T$$

și cu

$$\dot{V} = s_1 s_2 + s_2 s_1 = -s^T Qs - P_1 |s_1| - P_2 |s_2|$$

cu condiția ca  $V' < 0$  îndeplinită dacă  $Q \geq 0$  și  $P_i \geq 0$ .

Figura 2.a.4 prezintă deplasarea robotului ce urmărește o traiectorie dată (reprezentată prin cruciulițe). Sensul de deplasare al robotului pe traiectorie este desemnat de săgeți.

De asemenea, analiza erorilor a condus la validarea alegerii controllerului sliding mode pentru nivelul de comandă.



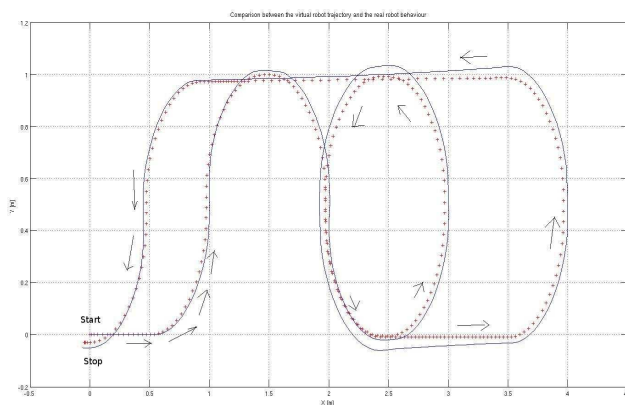


Fig. 2.a.4 Reprezentarea grafică a urmării unei traiectorii oarecare

Utilizând controlere de tip sliding-mode s-a rezolvat și problema de urmărire a unei traiectorii predefinite. Obiectivul principal în problema de urmărire a traiectoriei este acela de a minimiza erorile de distanță (longitudinale și laterale) și de unghi chiar și atunci când există perturbații. Traiectoria dorită (referința) este definită în timp (există restricții de timp). De aici rezultă că fiecărei traiectorii îi este asociat un profil de viteză liniară și unul de viteză unghiulară.

În cadrul acestei etape s-au implementat și testat patru legi de comanda de tip nelinear (sliding-mode) și apoi s-au investigat performanțele acestor legi prin simulare:

$$a) \dot{s} = -Q \cdot \text{sgn}(s)$$

$$b) \dot{s} = -Q \cdot \text{sgn}(s) - P \cdot s$$

$$c) \dot{s} = -p_i \cdot |s_i|^\alpha \cdot \text{sgn}(s_i), \quad 0 < \alpha < 1, \quad i = 1, \dots, m$$

$$d) \dot{s} = -p_i \cdot \exp(\alpha \cdot |s_i|) \cdot \text{sgn}(s_i), \quad p_i > 0, \alpha > 0, \quad i = 1, \dots, m$$

De asemenea s-a implementat și testat un controller de tip sliding-mode bazat pe modelul dinamic cu incertitudini (pentru cazul variațiile masei și/sau inerției ansamblului platformă mobilă- braț manipulator sunt luate în calcul).

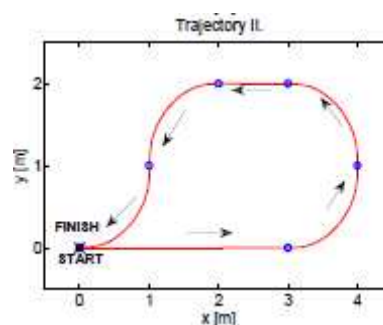
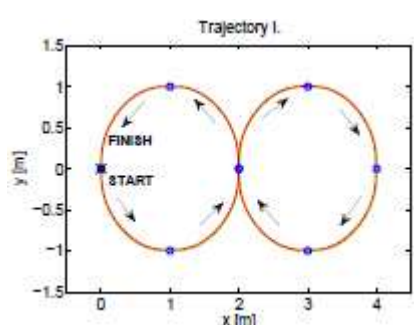
$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x}_r = -m \cdot \dot{y}_r \cdot \dot{\theta}_r + \frac{u_1}{R} \cdot \cos \theta_r \\ m \cdot \ddot{y}_r = m \cdot \dot{x}_r \cdot \dot{\theta}_r + \frac{u_1}{R} \cdot \sin \theta_r \\ I \cdot \ddot{\theta}_r = \frac{L}{R} \cdot u_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \ddot{x}_r = -\dot{y}_r \cdot \dot{\theta}_r + \alpha \cdot u_1 \cdot \cos \theta_r \\ \ddot{y}_r = \dot{x}_r \cdot \dot{\theta}_r + \alpha \cdot u_1 \cdot \sin \theta_r \\ \ddot{\theta}_r = \beta \cdot u_2 \end{cases}$$

$$\alpha(t) = \frac{1}{R \cdot m(t)}, \quad \beta(t) = \frac{L}{R \cdot I(t)}$$

$$\alpha_{real}(t) = \alpha_{nom} + \Delta\alpha(t); \quad |\Delta\alpha| \leq \Delta\alpha_{max}$$

$$\beta_{real}(t) = \beta_{nom} + \Delta\beta(t); \quad |\Delta\beta| \leq \Delta\beta_{max}$$

Rezultatele experimentale arată o bună comportare a sistemului la apariția perturbatiilor (robustețe, mici variații ale erorilor de poziție și unghi), pentru cele două traiectorii date în figurile de mai jos:



Din tabelul de mai jos, se poate vedea că răspunsul nu este afectat de variațiile sarcinii robotului:

TABLE II  
EXPERIMENTAL RESULTS

Case	No	$x_e$ Max [m]	$x_e$ RMS	$y_e$ Max [m]	$y_e$ RMS	$\theta_e$ Max [deg]	$\theta_e$ RMS
Trajectory I.							
A	I	0.0408	0.0112	0.0384	0.0237	7.0967	0.0403
	II	0.0420	0.0105	0.0384	0.0242	7.3121	0.0407
	III	0.0437	0.0133	0.0374	0.0231	7.0548	0.0411
B with additional mass	I	0.0432	0.0128	0.0363	0.0229	7.7997	0.0407
	II	0.0418	0.0108	0.0367	0.0239	7.5361	0.0423
	III	0.0456	0.0125	0.0384	0.0228	7.3997	0.0403
Trajectory II.							
A	I	0.0417	0.0126	0.0551	0.0298	7.0004	0.0350
	II	0.0408	0.0115	0.0583	0.0302	6.9294	0.0354
	III	0.0421	0.0128	0.0563	0.0289	7.8931	0.0346
B with additional mass	I	0.0445	0.0131	0.0555	0.0283	7.2132	0.0355
	II	0.0432	0.0119	0.0576	0.0291	7.1264	0.0432
	III	0.0448	0.0135	0.0564	0.0268	7.9648	0.0384

Algoritmii de calcul am fost scriși în limbajul C++, iar pentru implementarea în timp real a controlerilor de tip sliding-mode s-au utilizat platformele mobile dezvoltate de firma

MobileRobots (Pioneer, PatrolBot, PowerBot etc) existente în cadrul centrului de cercetare Sisteme de conducere a proceselor, Laboratorul de conducere a sistemelor neliniare <https://erris.gov.ro/Process-Control-Systems> . Schema generală utilizată pentru conducerea în timp real a platformelor mobile este dată în figura 2.a.5.

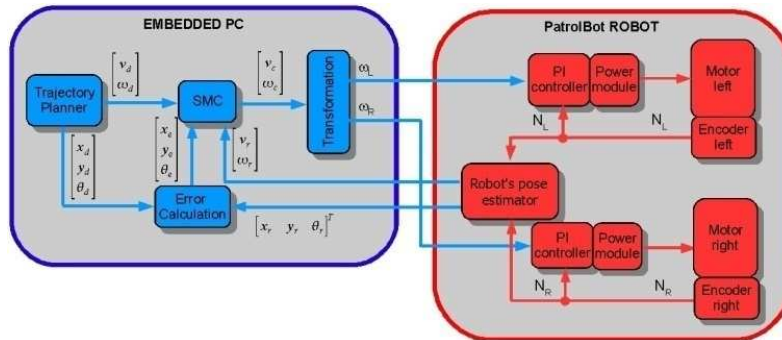


Figura 2.a.5. Schema generală a structurii de conducere.

Comunicarea cu platformele mobile se realizează pe baza unei relații de tip client/server, folosind fie o conexiune serială (pentru robot), fie una TCP/IP (pentru a comunica cu un simulator robotic). ARIA (Advanced Robotics Interface for Applications) este o platformă de dezvoltare software de control pentru roboți mobili, prin care se pot stabili și implementa detaliile de nivel scăzut de interacțiune client-server (inclusiv rețelistică și comunicarea serială), procesarea pachetelor cu informații de la server și comenzi, temporizarea ciclurilor robotului, multithreading, și de asemenea oferă suportul pentru comunicarea cu o mare varietate de accesorii și senzorii atașabili platformei mobile.

Testele experimentale au aratat că algoritmi de control (de tip sliding-mode) folosiți sunt robusți și că pot fi folosiți cu ușurință și în cazul altor tipuri de platforme mobile.

În această secțiune este prezentată o strategie pentru generarea traseelor atât pentru platforma mobilă cât și pentru manipulator plecând de la o poziție inițială astfel încât robotul să atingă o poziție finală, specificată, fără a încălca constrângerile nonholonomice. Traseele generate sunt de tip polinomial și, prin urmare, sunt continue în timp și line. Validitatea metodei este demonstrată cu ajutorul unui robot mobil diferențial - cu două roți motoare (de tip Pioneer 3DX) și a unui manipulator de tip Pioneer cu 6(5+1) grade de libertate (Figura 2.a.4).

Abordarea propusă poate fi aplicată atât sistemelor nonholonomice cât și sistemelor holonomice.

Figura 2.a.6 prezintă o platformă mobilă cu două roți motoare diferențiale și cu un manipulator. Vom examina mai întâi ecuațiile cinematice ale manipulatorului. Pentru

simplitate vom considera un manipulator cu un braț ce se mișcă în plan orizontal așa cum este ilustrat în figura 2.a.7.



Figura 2.a.6. Platforma mobilă Pioneer 3-DX

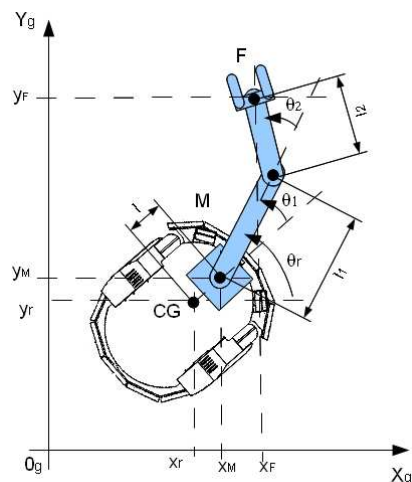


Figura 2.a.7. Manipulator mobil

Coordonatele carteziene ale punctului final (end-effector) aflat la capătul manipulatorului sunt date de ecuațiile:

$$\begin{aligned}x_F &= x_M + l_1 \cos(\theta_r + \theta_1) + l_2 \cos(\theta_r + \theta_1 + \theta_2) \\y_F &= y_M + l_1 \sin(\theta_r + \theta_1) + l_2 \sin(\theta_r + \theta_1 + \theta_2)\end{aligned}$$

unde  $(x_M, y_M)$  este poziția de prindere a manipulatorului de baza mobilă,  $\theta_r$  este orientarea bazei,  $\theta_1, \theta_2$  reprezintă unghiurile brațelor manipulatorului iar  $l_1, l_2$  sunt lungimile brațelor manipulatorului.

Ecuțiile de mai sus arată că poziția end-effectorului depinde de poziția și orientarea platformei mobile. Acest lucru indică faptul că manipulatorul mobil are un spațiu infinit de lucru în comparație cu un manipulator fix. Ecuțiile cinematice descrise mai sus pot fi inversate. Mai exact, putem calcula  $\theta_1$  și  $\theta_2$  funcție de poziția punctului final al manipulatorului (end-effector),  $(x_F, y_F)$ , și de poziția și orientarea platformei mobile,  $(x_r, y_r)$ ,  $\theta_r$ .

Unghiurile  $\theta_2$  și  $\theta_1$  sunt dat de expresiile:

$$\begin{aligned}\theta_2 &= a \tan 2 \left( \frac{\sqrt{1 - \frac{(x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}}, \frac{(x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}}{\frac{(l_1 + l_2 \cos(\theta_2))(y_F - y_M) - l_2 \sin(\theta_2)(x_F - x_M)}{(x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2}, \right. \\ &\left. \frac{(l_1 + l_2 \cos(\theta_2))(x_F - x_M) - l_2 \sin(\theta_2)(y_F - y_M)}{(x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2} \right) - \theta_r\end{aligned}$$

Soluția există dacă și numai dacă:

$$|\cos(\theta_r)| \leq 1 \Rightarrow (x_F - x_M)^2 + (y_F - y_M)^2 \leq (l_1 + l_2)^2$$

Dacă inegalitatea de mai sus nu este îndeplinită atunci ținta se află în afara razei manipulatorului și în consecință platforma mobilă trebuie să se miște astfel încât să aducă ținta în spațiul de lucru al manipulatorului. De îndată ce platforma mobilă se află în preajma punctului țintă final (inecuația de mai sus este respectată) unghiurile brațelor pot fi calculate cu ajutorul ecuațiilor date.

Platforma mobilă se mișcă utilizând două roți motoare diferențiale independente așa cum se vede și în Figura 2.a.6. Presupunem că viteza de deplasare a sistemului este scăzută și prin urmare cele două roți motoare nu alunecă în lateral.

Ecuațiile cinematice de mișcare a platformei mobile sunt:

$$\dot{x}_r = v_r \cos(\theta_r)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin(\theta_r)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega$$

cu restricția:

$$\dot{x}_r \sin(\theta_r) - \dot{y}_r \cos(\theta_r) = 0.$$

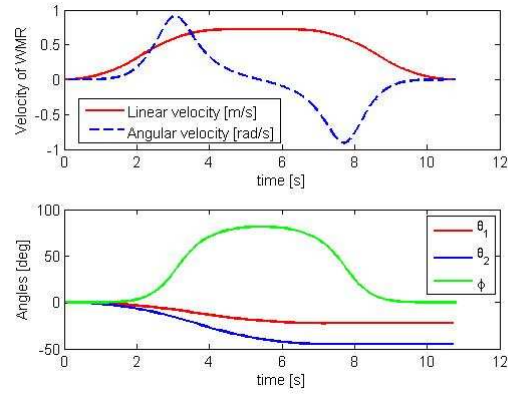
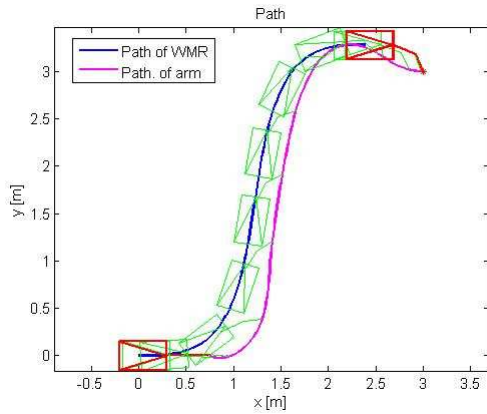
Pentru punctul de conectare a manipulatorului cu platforma mobilă ( $x_M, y_M$ ) se poate scrie:

$$\dot{x}_M \sin(\theta_r) - \dot{y}_M \cos(\theta_r) + \dot{\theta}_r l_M = 0$$

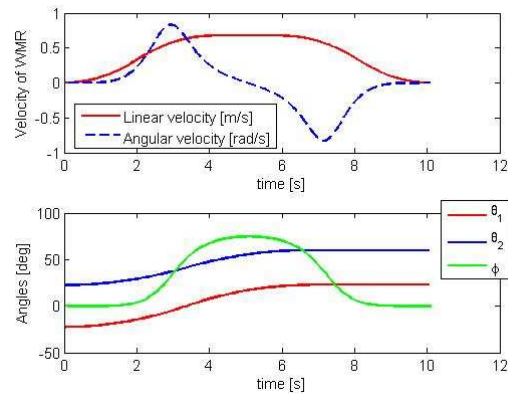
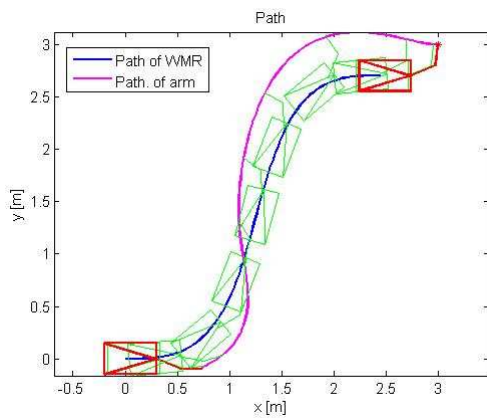
O condiție inițială pentru folosirea cu succes a unui sistem de manipulator mobil este existența unei strategii de planificare a traiectoriei care să genere un traseu fezabil pentru end-effector fără a încălca sistemul de ecuații nonholonomice.

Având în vedere că, în general, este cunoscută poziția și orientarea inițială atât a platformei mobile cât și a manipulatorului trebuie găsit un traseu care să ducă întregul sistem într-o poziție finală specificată. Este de dorit ca această cale să fie lină și ușor de calculat prin utilizarea unor metode de calcul simple și necostisitoare. Pentru a rezolva această problemă, trebuie să găsim un traseu care să conecteze poziția inițială a manipulatorului mobil cu poziția de final.

În continuare sunt prezentate câteva exemplificări ale planificării mișcării robotului echipat cu manipulatorul mobil care pleacă dintr-o poziție inițială cunoscută ( $x_{r\_init}, y_{r\_init}, \psi_{r\_init}, \theta_{1\_init}, \theta_{2\_init}$ ), și se deplasează către o poziție finală dorită ( $x_{F\_final}, y_{F\_final}, \psi_{r\_final}, \theta_{1\_final}, \theta_{2\_final}$ ). În figurile din partea dreaptă sunt reprezentate viteza liniară (roșu), viteza unghiulară (albastru punctat) și orientarea ( $\theta_r$  – verde) a platformei mobile, respectiv unghiurile manipulatorului ( $\theta_1$  - roșu,  $\theta_2$  – albastru).



Caz I:  $x_{r\_init} = 0, y_{r\_init} = 0, \theta_{r\_init} = 0, \theta_{1\_init} = 0, \theta_{2\_init} = 0;$   
 $x_{F\_final} = 3, y_{F\_final} = 3, \theta_{r\_final} = 0, \theta_{1\_final} = -\pi/8, \theta_{2\_final} = -\pi/4.$



Se poate vedea că algoritmi utilizați au condus la atingerea obiectivului, în absența obstacolelor și a altor perturbații. Rezultatele obținute pot fi oricând extinse și sunt oferite ca serviciu de cercetare <https://erris.gov.ro/Process-Control-Systems>.

## 2.b Activitatea 1.9 Proiectarea și implementarea structurilor de conducere a SAC-VAM, conducere cu tehnici avansate, bazată pe modelele cinematice și dinamice.

Există mai multe cazuri pentru care se face sinteza legilor de comanda neliniare. Schema bloc folosită pentru structura de conducere cu controler neliniar este dată în Figura 2.b.1

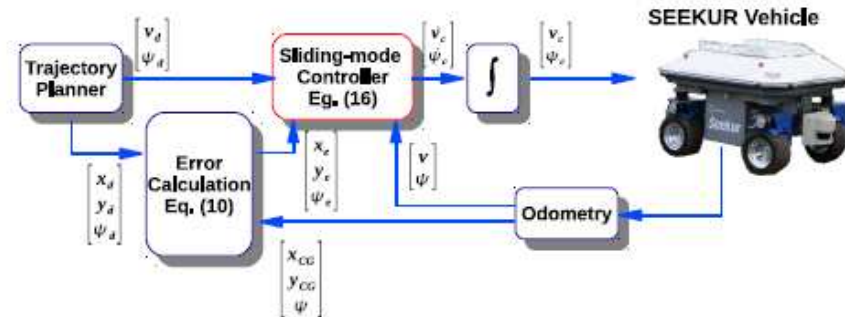


Figura 2.b.1. Schema bloc utilizată pentru testarea controlerului neliniar.

O formă practică pentru legea de comandă este:

$$\dot{s} = -Q \cdot \text{sgn}(s) - P \cdot s$$

unde  $P$  și  $Q$  sunt constante.

Suprafața de comutație:

$$s = \dot{y}_{Lh} + \gamma_y \cdot y_{Lh} + \gamma_0 \cdot \text{sgn}(y_{Lh}) \cdot |\varepsilon_{Lh}|$$

unde  $\gamma_y$  și  $\gamma_0$  sunt parametri constanți pozitivi.

Comenzile controllerului sliding mode sunt:

$$\delta_{fc} = \frac{Q \cdot \text{sgn}(s) + P \cdot s + \gamma_y \cdot \dot{y}_{Lh} + E}{b_{11} + b_{12} + (b_{21} + b_{22}) \cdot Lh}$$

$$E = \dot{v}_x \cdot \varepsilon_{Lh} + v_x \cdot \dot{\varepsilon}_{Lh} - v_y \cdot (a_{11} + a_{21} \cdot Lh) - r \cdot (a_{12} + a_{22} \cdot Lh) + \gamma_0 \cdot \text{sgn}(y_{Lh} \cdot \varepsilon_{Lh}) \cdot \dot{\varepsilon}_{Lh}$$

Simularea a fost făcută utilizând un program în C++ și ARIA pentru o perioadă de eșantionare de 100ms.

Traseul utilizat pentru testare este dat în Figura 2.b.2, precum și vitezele liniare și unghiulare dorite (impuse).

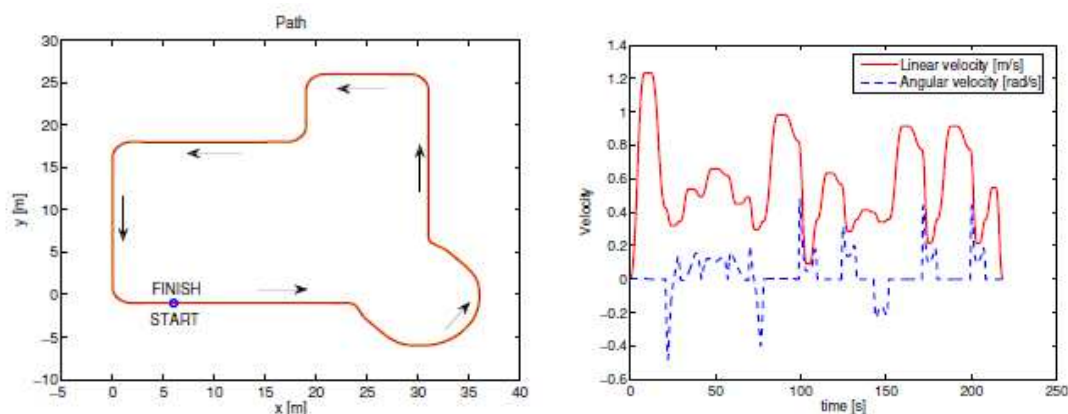


Figura 2.b.2. Traseul testat și vitezele impuse (dorite).



Rezultatele experimentale sunt arătate în figurile următoare:

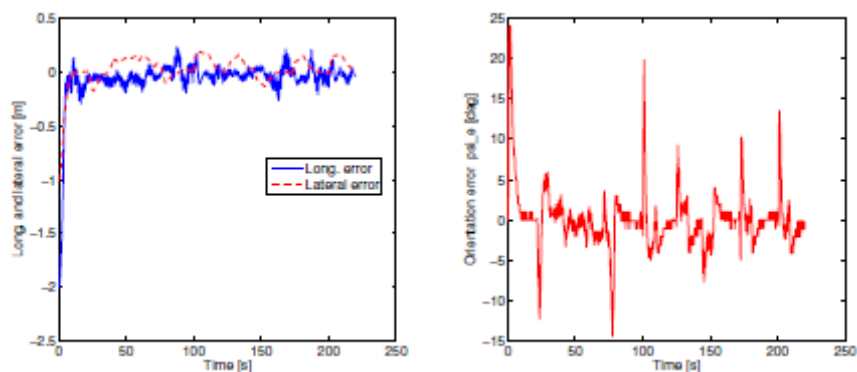


Figura 2.b.3. Rezultatele experimentale în cazul când robotul are erori inițiale de poziție – erorile longitudinale și laterale, precum și eroarea de orientare.

Tot pentru cazul cu erori staționare inițiale sunt reprezentate comenzile date de către controlerul nelinier precum și vitezele reale ale robotului cu patru roți motoare și directoare.

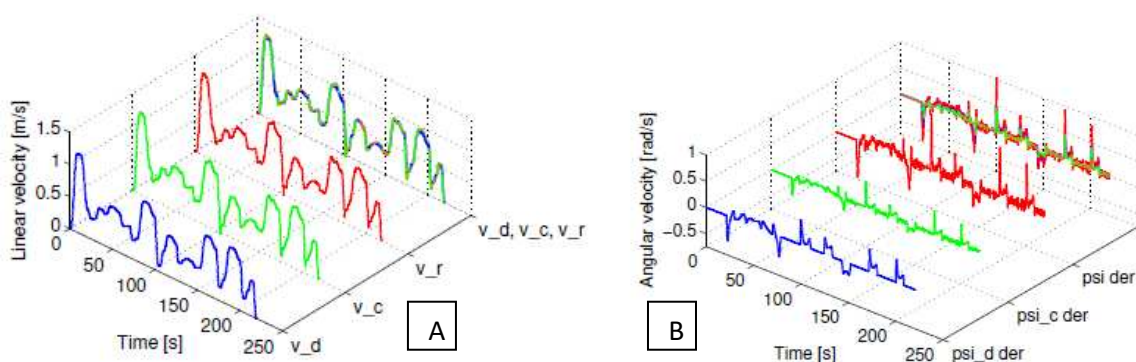


Figura 2.b.3. Vitezele liniare (A) și unghiulare (B) dorite, de comandă și reale.

Se poate vedea că algoritmi utilizați au condus la atingerea obiectivului, în absența obstacolelor și a altor perturbații. Rezultatele obținute pot fi oricând extinse și sunt oferite ca serviciu de cercetare <https://erris.gov.ro/Process-Control-Systems>.



## Concluzii

Raportul științific pune în evidență soluțiile pe care echipa de lucru a Proiectului 3 le oferă pentru cerințele Etapei 1. În Raportul științific detaliat încărcat pe platforma proiectului P3 (<http://cidsacteh.ugal.ro/>), se pot vizualiza soluțiile și rezultatele cercetărilor aferente Etapei 1 pentru Proiect 3

## Rezultate Etapa 1

- Modele cinematice și dinamice ale sistemului autonom complex SAC-ARP
- Modele cinematice și dinamice ale sistemului autonom complex SAC-VAM
- Structură de conducere inteligentă și distribuită a SAC-ARP și SAC-VAM
- Proiectarea legilor de comandă pentru regulatorul neliniar care să asigure deplasarea în spațiul de lucru în condiții de respectare a condițiilor de robustețe la variația parametrilor

## Livrabile:

### Activitatea 1.7

- Modele cinematice și dinamice ale sistemului autonom complex SAC-ARP;
- Modele cinematice și dinamice ale sistemului autonom complex SAC-VAM;

### Activitatea 1.8

- Structură de conducere inteligentă și distribuită a SAC-ARP

### Activitatea 1.9

- Structură de conducere inteligentă și distribuită a SAC-VAM.

Servicii ERRIS <https://erris.gov.ro/Process-Control-Systems> :

**2.2.** Serviciu de cercetare pe platforma SAC-ARP pentru asistare personală medico-socială în spital și acasă

-Researches for the Autonomous Complex System - Personal Robotic Assistant platform to ensure the medical and social assistance in the hospital and at home

**2.3.** Serviciu de cercetare pe platforma SAC-VAM pentru asistare personală intra/extra Spitalicească și salvare în teren accidentat

-Researches for the Autonomous Complex System- Multidirectional Autonomous Vehicle platform for personal assistance in/out the hospital and rescue in rough terrain

Tehnologii ERRIS oferite ca rezultat al cercetărilor <https://erris.gov.ro/Process-Control-Systems>

**Teh.1.** Tehnologia hibridă de fabricație flexibilă, de precizie, pe linii de laborator și industriale, cu Sistemul Autonom Complex – Vehicul Autonom Multidirecțional (SAC-VAM) integrat;

-Hybrid flexible manufacturing systems control technologies for precision flexible assembly/manufacturing lines for laboratory or industrial use, integrating the Autonomous Complex System -Multidirectional Autonomous Vehicle

**Teh.2.**Tehnologia hibridă de fabricație felxibilă, de precizie, pe linii de laborator și industriale, cu Sistem Autonom Complex - Asistent Robotic Personal (SAC-ARP) integrat;

Hybrid flexible manufacturing systems control technologies for precision flexible assembly/manufacturing lines for laboratory or industrial use, Hybrid flexible manufacturing systems control technologies for precision flexible assembly/manufacturing lines for laboratory or industrial use, integrating the Autonomous Complex System - Personal Robotic Assistant

Echipamentele centrului de cercetare:

- [1. Hera flexible assembly line – 6 workstations](#)
- [2. Autonomous electric robot with 2 motor wheels - PIONEER 3DX](#)
- [3. Manipulator structure with 7 degrees of freedom](#)
- [4. Autonomous electric wheelchair for disabled people](#)
- [5. Modular Systems for Mechatronics Training System - FESTO](#)