APLICAREA METODELOR DE MODELARE CINEMATICĂ DIN DOMENIUL ROBOȚILOR PENTRU AUTOMATIZAREA PODURILOR RULANTE MONOGRINDĂ

APPLICATION OF KINEMATIC MODELLING METHODS FOR THE AUTOMATION OF MONO-BEAM BRIDGE CRANE

Cătălin FRÂNCU[1], Cristina SESCU-GAL[1]

[1] Universitatea Tehnică de Construcții, Bucuresti, Romania Facultatea de Utilaj Tehnologic
frâncu@utcb.ro; cristi.sescu@yahoo.com

Rezumat: *Metodele de modelare a traiectoriilor utilizate în domeniul roboților industriali pentru automatizarea proceselor tehnologice, se pot aplica și la alte sisteme mecanice, prin asimilarea acestor sisteme unor roboți. Prezenta lucrare prezintă modelele cinematice directă și invesă aplicate pentru podul rulant din cadrul laboratorului de Mașini de ridicat al Facultății de Utilaj Tehnologic. Scopul urmărit este dat de posibilitatea de automatizare a operațiilor efectuate de aceste instalații de ridicat, particularizat procesului tehnologic din locul de montare.*
Cuvinte cheie: roboți industriali, modelare cinematică directă și inversă, poduri rulante

Abstract: *Trajectory modeling techniques used in the field of industrial robots for the automation of technological processes can be applied to other mechanical systems by assimilating these systems into robots. This paper presents the direct kinematic models and investes applied for the mono-beam bridge crane in the Laboratory of Lifting machinery of the Faculty of Technological Equipment. The aim is to automate the operations of these lifting equipment, customized to the technological process at the assembly site.*
Keywords: industrial robots, direct and inverse kinematic modelling, bridge cranes

1. INTRODUCERE

Automatizarea proceselor de producție în serie impune, pe lângă introducerea roboților industriali în liniile de fabricație și automatizarea proceselor secundare de manipulare și transport inrterfazic. Astfel, aceste procese sunt realizate cu echipamente care depind de cantitatea, dimensiunile, forma și greutatea pieselor, de posibilitățile de suspendare, de prindere și distanțele de transport, inclusiv funcție de mediul de lucru. Echipamentele care sunt utilizate cu precădere pentru manipularea și transportul maselor, sunt de tipul transportoarelor continue, poduri rulante și mai rar macaralele portal sau semiportal. În prezent, ponderea instalațiilor de ridicat dintr-un flux de producție la care a fost implementat un sistem automat de comandă și control, este redusă. Cele mai multe sisteme automatizate sunt transportoarele suspendate din cadrul industriei constructoare de mașini.

În prezenta lucrare se prezintă modelarea cinematică directă și inversă a unui pod rulant, utilizând metode de modelare din domeniul roboților industriali. În acest sens, se consideră podul rulant un robot cu un spațiu de lucru determinat de parametrii geometrici ai acestuia, la care efectorul final este reprezentat de dispozitivul mecanismului de ridicare (cârlig, graifăr etc.).

2. ASPECTE ALE AUTOMATIZĂRII ȘI PREZENTAREA MODELULUI ANALIZAT

Avantajele introducerii controlului automat al operațiilor de ridicare și transport al sarcinilor sunt date de:

- creșterea productivității producției prin reducerea timpilor ciclului de lucru la manevrarea și transportul materialelor/pieselor (podurile rulante sunt mașini de lucru cu funcționare ciclică);
- creșterea securității muncii datorită reducerii riscurilor de accidentare a lucrătorilor;
- îmbunătățirea condițiilor de lucru prin eliminarea personalului uman pentru deservirea instalațiilor de ridicat care lucrează în medii nocive sau periculoase: depozite de deșeuri periculoase/nepericuloase.

Echipamentul utilizat pentru studiu este un pod rulant monogrindă montat în laboratorul de Mașini de ridicat din cadrul Facultății de Utilaj Tehnologic. Comparativ cu macaralele cu braț din domeniul construcțiilor, care au ca particularitate momentul capabil constant, macaralele rulante au capacitatea de a ridica și deplasa sarcina nominală în tot spațiul de lucru al dispozitivului de ridicare. Parametri principali ai podului rulant analizat sunt:

- sarcina nominală	1600 kg
- ecartamentul	3000 mm
- lungimea căii de rulare	10 000 mm (mărime adoptată)
- înălțimea de ridicare	5000 mm (mărime adoptată conform caracteristicilor palanului de ridicare)

3. ELABORAREA MODELULUI CINEMATIC DIRECT AL PODULUI RULANT MONOGRINDĂ

3.1. PREZENTAREA METODEI

Pentru realizarea studiului, în prezenta lucrare s-a folosit metoda Denavit-Hartenberg, aplicată pe larg în cinematica roboților mobili. Metoda are avantajul utilizării unui număr redus de parametri necesari pentru trecerea de la un sistem de referință la altul și presupune atașarea unui sistem de referință fiecărui element cinematic notat conform convenției Denavit-Hartenberg [1]. Astfel, pentru lanţul cinematic deschis format de elementele consecutive *i-2, i-1, i* şi *i+1* şi respectiv cuplele cinematice prin care sunt legate între ele, figura 1, alegerea sistemelor de coordonate legate de elementele *i-1* şi *i* se face în modul următor:

1. axa z_{i-1} are direcţia axei cuplei cinematice care leagă elementul *i-1* de elementul *i*;

2. axa x_{i-1} este legată de elementul *i-1* şi se alege pe perpendiculara comună a axelor z_{i-1} şi z_{i-2} orientată de la O_{i-2} la O_{i-1};

3. similar, se alege axa x_i ca perpendiculară comună a axelor de rotaţie z_{i-1} şi z_i orientată de la O_{i-1} la O_i;
4. originile sistemelor de coordonate se aleg în punctele de intersecţie al perpendicularei comune cu axa cuplei de rotaţie, respectiv O_{i-2} şi O_{i-1};
5. denumirea cuplei este dată de elementul cu cifra mai mare care intră în componenţa ei;
6. axele y sunt astfel alese ca triedrul să fie ortonormat.

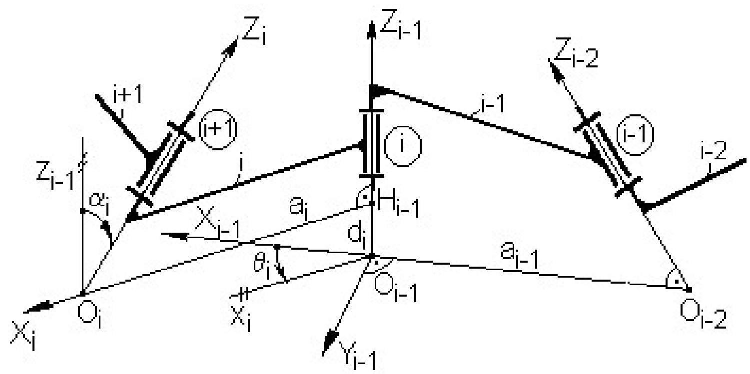


Figura 1- lanţ cinematic deschis

În cazul modelului cinematic direct se cunosc caracteristicile geometrice ale *„robotului”* și legile de variație ale cuplelor conducătoare, fiind necesar determinarea poziției orientării efectorului final. Parametri geometrici care descriu complet orice articulaţie de rotaţie sau translaţie din lanţul cinematic sunt următorii:

θ_i - unghiul articulației de la axa x_{i-1} la axa x_i măsurat în sens trigonometric, în jurul axei z_{i-1}

d_i - distanța de la originea O_{i-1} la intersecția axei z_{i-1} cu axa x_i, măsurată de-a lungul axei z_{i-1}

a_i - distanța de la intersecția axei z_{i-1} cu axa x_i la originea O_i, măsurată de-a lungul axei x_i

α_i - unghiul făcut de axa z_{i-1} cu axa z_i, prin rotire în jurul axei x_i în sens trigonometric

Trecerea de la sistemul de coordonate *„i-1”*, ataşat elementului *i-1*, la sistemul de coordonate *„i”*, ataşat elementului *i*, se face astfel:
1. rotaţie în jurul axei z_{i-1} cu unghiul θ_i, în vederea suprapunerii axei x_{i-1} cu x_i;
2. o translaţie de-a lungul axei z_{i-1} cu distanţa d_i, ce aduce originea O_{i-1} în punctul intermediar H_{i-1} (vezi fig.2);
3. o nouă translaţie în lungul axei x_{i-1} cu distanţa a_i, suprapunând astfel originea O_{i-1} cu O_i;
4. în final, a doua rotaţie în jurul axei x_i cu unghiul α_i, în vederea suprapunerii axei z_{i-1} cu z_i.

Fiecare dintre cele patru mişcări se pot exprima cu ajutorul unei matrici elementare de rotaţie sau de translaţie iar mişcarea rezultantă este dată de produsul matricilor (1):

$$_{i-1}T^i = Rot(z_{i-1}, \theta_i) \cdot Trans(z_{i-1}, d_i) \cdot Trans(x_{i-1}, a_i) \cdot Rot(x_i, \alpha_i) \qquad (1)$$

şi efectuând produsul matricilor elementare:

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

rezultă matricea de trecere de la sistemul de coordonate *„i-1”*, ataşat elementului *i-1*, la sistemul de coordonate „*i”,* ataşat elementului *i*,

$$_{i-1}T^i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cdot\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\cdot\sin(\alpha_i) & a_i\cdot\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cdot\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\cdot\sin(\alpha_i) & a_i\cdot\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Matricea de trecere (3) astfel obţinută, stabileşte poziţia şi orientarea sistemului de coordonate „*i”,* ataşat elementului *i* în raport cu sistemul de coordonate „*i-1”,* ataşat elementului *i-1.*

3.2. REALIZAREA MODELULUI DIRECT AL PODULUI RULANT MONOGRINDĂ

În figura 2 este prezentată schema cinematică a podului rulant monogrindă, iar în figura 3, podul rulant din laborator.

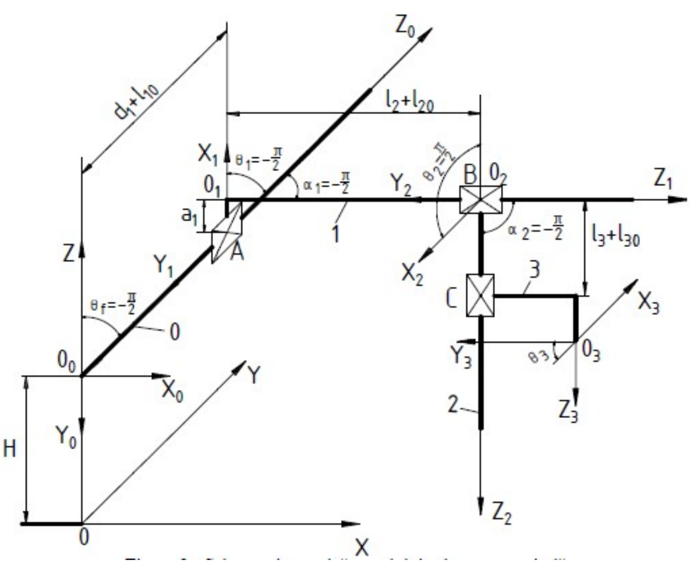


Figura 2 - Schema cinematică a podului rulant

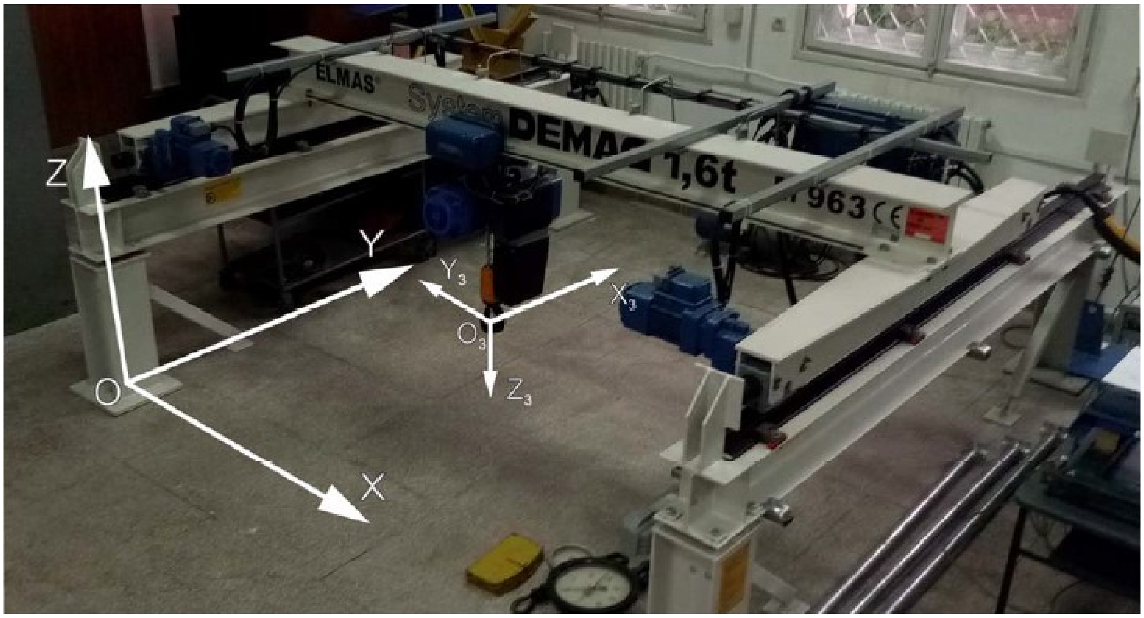


Figura 3 – Podul rulant

Pentru calculul matricilor de trecere sunt identificați parametri care descriu cuplele lanțului cinematic, prezentanți în tabelul 1:

Tabelul 1

Parametri lanțului cinematic

Cupla	**θ_1**	**d_1**	**a_1**	**α_1**	**Variabila q_1**
A (0-1)	$-\frac{\pi}{2}$	d_1	A_1	$-\frac{\pi}{2}$	d_1
B (1-2)	$\frac{\pi}{2}$	d_2	0	$-\frac{\pi}{2}$	d_2
C (2-3)	π ($-\pi$)	d_3	0	0	d_3

Înlocuind în relația (3) parametri din tabelul 1, se obține:

$$ {}_0T^1 = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & A_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -A_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4) $$

$$ {}_1T^2 = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5) $$

$$ {}_2T^3 = \begin{pmatrix} \cos(\pi) & -\sin(\pi) & 0 & 0 \\ \sin(\pi) & \cos(\pi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(0) & -\sin(0) & 0 \\ 0 & \sin(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6) $$

Prin analogie cu mecanismele roboților industriali, se poate considera calea de rulare, grinda, căruciorul de sarcină și cârligul, împreună cu cuplele A, B și C că formează mecanismul de poziționare, cu trei grade de libertate.

Cu aceste considerente, matricea de transformare a mecanismului de poziționare este:

$$ {}_0T^3 = {}_0T^1 \cdot {}_1T^2 \cdot {}_2T^3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 - A_1 \\ 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7) $$

Matricea de transformare (7) stabileşte poziţia sistemului de referinţă mobil, legat de cârlig, $O_3\ X_3\ Y_3\ Z_3$ în raport cu sistemul de referinţă fix solidar cu şasiul $O_0\ X_0\ Y_0\ Z_0$, semnificaţia elementelor din această matrice fiind dată de relaţia următoare:

$$ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 - A_1 \\ 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8) $$

adică primele trei coloane ale matricii de transformare dau cosinuşii directori ai axelor sistemului de referinţă mobil, iar ultima coloană dă coordonatele originii sistemului mobil solidar cu efectorul final.

Cosinușii directori nu sunt de interes în acest studiu întrucât orientarea sistemului de referință a efectorului final nu se modifică. Coordonatele originii sistemului prin identificare rezultă:

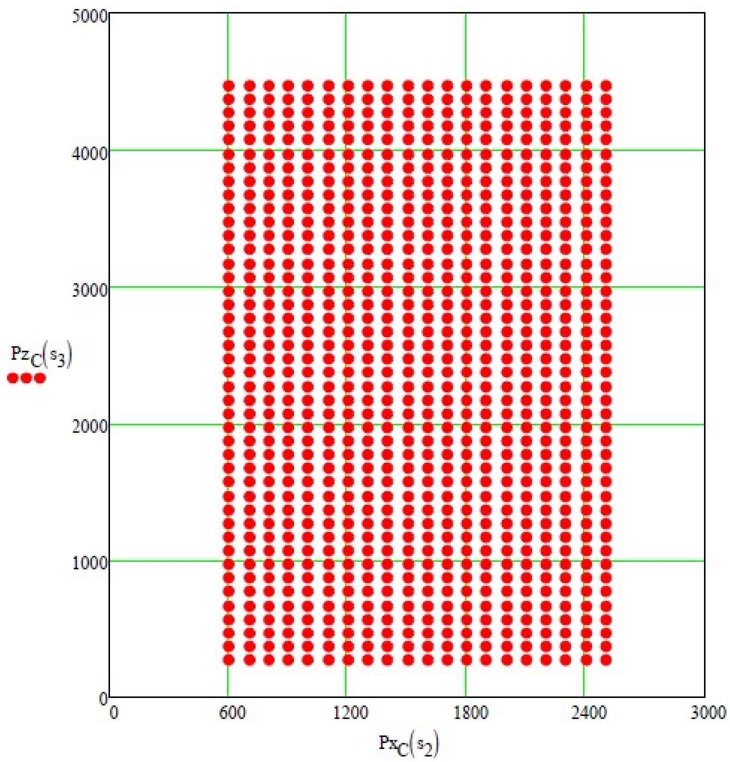
$$ \begin{aligned} p_{x0} &= d_2 \\ p_{y0} &= d_3 - A_1 \\ p_{z0} &= d_1 \end{aligned} \quad (9) $$

Pentru trecerea de la sistemul de referință $O_0\ X_0\ Y_0\ Z_0$ la sistemul de referință OXYZ, se mai aplică următoarea transformare: O rotație cu unghiul $\theta_f = -\frac{\pi}{2}$ și respectiv, o translație de lungime H (fig.2). Rezultă matricea de transformare (10):

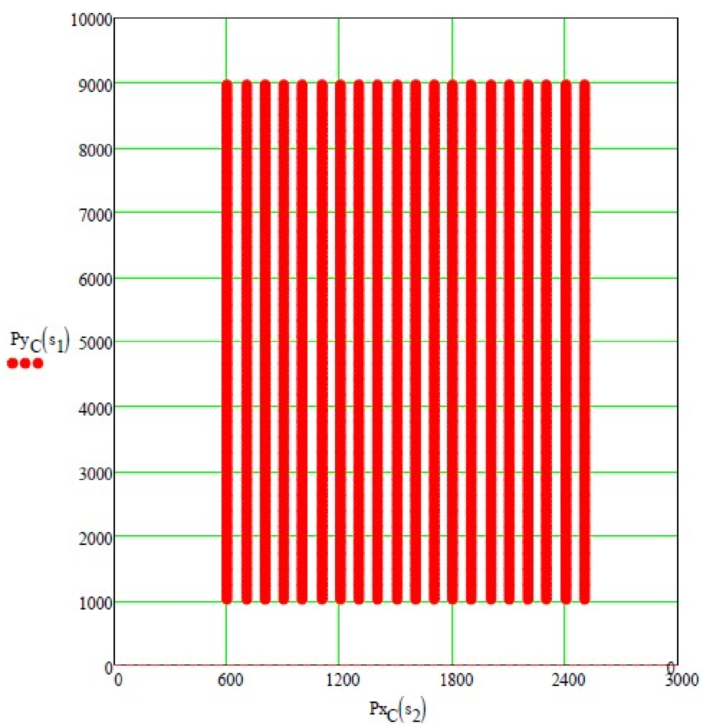
$$ {}_{fix}T^0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 1 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & -1 & A_1 + H - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10) $$

În ultima coloană identificăm coordonatele originii sistemului mobil solidar cu efectorul final:

$$ \begin{aligned} p_x &= d_2 \\ p_z &= A_1 + H - d_3 \\ p_y &= d_1 \end{aligned} \quad (11) $$



a)



b)

Figura 4 – Spațiul de lucru al podului rulant monogrindă

Relaţiile (11) reprezintă modelul cinematic direct al echipamentului de lucru al podului rulant monogrindă prin care se stabileşte poziţia organului de lucru (efectorul final) p_x, p_y, p_z în funcție de variabilele corespunzătoare gradelor de mobilitate ale mecanismului d_1, d_2, d_3.

3.2. STUDIU DE CAZ: DETERMINAREA SPAȚIULUI DE LUCRU

Pentru podul rulant monogrindă [2], s-au determinat următoarele caracteristici geometrice: L = 10 000 mm; l = 3000 mm; H = 5000 mm; l_{10} = 1040 mm; ; l_{20} = 600 mm; l_{30}= 721 mm; l_{11} = 1040 mm; ; l_{21} = 500 mm; A_1 = 195 mm.

Cursele deplasărilor pentru fiecare sunt (12):

$$\begin{aligned} s_1 &= l_{10}, l_{10} + 60 \ldots (l - l_{11}) \\ s_2 &= l_{20}, l_{20} + 100 \ldots (l - l_{21}) \\ s_3 &= l_{30}, l_{30} + 100 \ldots (H) \end{aligned} \tag{12}$$

Aceste valori se introduc în expresiile (11). Rezultatele obținute sunt prezentate în figura 4.

4. ELABORAREA MODELULUI CINEMATIC INVERS AL PODULUI RULANT MONOGRINDĂ

4.1. PREZENTAREA METODEI

Spre deosebire de modelul cinematic direct, calculul cinematicii inverse constă în determinarea variabilelor cuplelor conducătoare astfel încât efectorul final să se găsească în poziția dorită. Pentru elaborarea modelului cinematic invers, în prezenta lucrare se utilizează metoda matricială, în cadrul căreia se cunoaște matricea de poziționare a efectorului final, relația (13) reprezentată de poziția cârligului de sarcină, în raport cu sistemul de referință fix.

$$U = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \cdot x_3 & x_0 \cdot y_3 & x_0 \cdot z_3 & p_x \\ y_0 \cdot x_3 & y_0 \cdot y_3 & y_0 \cdot z_3 & p_y \\ z_0 \cdot x_3 & z_0 \cdot y_3 & z_0 \cdot z_3 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{13}$$

Mecanismul de poziționare al podului rulant monogrindă are trei grade de mobilitate ce cuprinde mecanismul de poziționare. Astfel, pentru mecanismul de poziționare avem ecuația (14).

$$U_D = {}_0T^1 \cdot {}_1T^2 \cdot {}_2T^3 \tag{14}$$

Relația (14) se înmulțește la dreapta cu inversa matricii ${}_0T^1$ adică matricea ${}_1T^0$ și se obține relația (15):

$${}_1T^0 \cdot U_D = {}_1T^2 \cdot {}_2T^3 \tag{15}$$

Membrul drept acestei ecuații conține o singură necunoscută, d_1, iar membrul stâng celelalte necunoscute.

Efectuând calculele rezultă:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & -A_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & -A_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & -A_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_x \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{16}$$

sau

$$\begin{pmatrix} -n_y & -o_y & -a_y & -A_1 - p_y \\ -n_z & -o_z & -a_z & d_1 - p_z \\ n_x & o_x & a_x & p_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Prin compararea elementelor din liniile 1, 2 și 3 din coloana 4 ale celor două matrici, rezultă sistemul:

$$\begin{aligned} -A_1 - p_y &= -d_3 \\ d_1 - p_z &= 0 \\ p_x &= d_2 \end{aligned} \tag{17}$$

care are soluția:

$$\begin{aligned} p_x &= d_2 \\ p_y &= A_1 - d_3 \\ p_z &= d_1 \end{aligned} \tag{18}$$

În consecință, modelul cinematic invers al echipamentului de lucru, respectiv cârligul de sarcină atașat mecanismului de ridicare al podului rulant monogrindă, este:

$$\begin{aligned} d_1 &= p_y \\ d_2 &= p_x \\ d_3 &= A_1 - p_z \end{aligned} \tag{19}$$

4.2. STUDIU DE CAZ: PROGRAMAREA TRAIECTORIILOR DE POZIȚIONARE PENTRU EFECTORUL FINAL – CÂRLIGUL DE SARCINĂ

În vederea efectuării operațiilor de programare a podului rulant monogrindă, s-a considerat efectuarea unei mișcări compuse pe cele trei axe prin efectuarea unei traiectorii liniare între două puncte care se află în spațiul de lucru al podului rulant. Pentru aceasta, s-au considerat următoarele date inițiale:

x_i = 2500 mm; y_i = 8500 mm; z_i = 2500 mm; x_f = 1500 mm; y_f = 1500 mm; z_f = 0 mm.

S-a determinat distanța de la punctul inițial la punctul final:

$$d = \sqrt{\left(x_i - x_f\right)^2 + \left(y_i - y_f\right)^2 + \left(z_i - z_f\right)^2}\,; d = 7500mm \tag{19}$$

S-au determinat pantele pe axele sistemului de referință fix.

$$l = \frac{x_i - x_f}{d};m = \frac{y_i - y_f}{d};n = \frac{z_i - z_f}{d} \tag{20}$$

S-a generat traiectoria liniară între cele două puncte, inițial și final.

$t = 0,\ 100...d$

$$\begin{aligned} x(t) &= x_i + l \cdot t \cdot v \\ y(t) &= y_i + m \cdot t \cdot v \\ z(t) &= z_i + n \cdot t \cdot v \end{aligned} \tag{21}$$

În figura 5 sunt prezentate proiecțiile pe cele trei planuriale traiectoriei generate. Utilizând modelul cinematic invers din relația (19), rezultă valorile variabilelor articulare

$$\begin{aligned} d_1(t) &= p_y C(t) \\ d_2(t) &= p_x C(t) \\ d_3(t) &= p_z C(t) \end{aligned} \tag{22}$$

În figura 6 sunt prezentate variațiilor variabilelor articulare d_1, d_2, d_3.

5. CONCLUZII

Alcătuirea podurilor rulante este caracterizată de aceea că mișcările efectuate sunt perpendiculare unele pe altele, astfel încât cârligul are acces într-un spațiu cu volum paralelipipedic. Drept urmare, aplicarea metodelor pentru modelarea cinematică poate fi aplicată cu succes.

Modelul cinematic direct al echipamentului de lucru al podului rulant monogrindă, este dedus prin analogie cu mecanismele roboţilor industriali şi folosind convenţia de notaţie Denavit - Hartenberg.

Modelul cinematic invers pentru echipamentul de lucru al podului rulant monogrindă poate fi stabilit din modelul cinematic direct.

Automatizarea podurilor rulante a fost concepută inițial pentru optimizarea timpului de deplasare al podului rulant, ținând cont de condițiile locale dar și pentru a elimina factorului uman din lanțul de comandă. Procesul de automatizare cuprinde în general două aspecte:

- îmbunătățirea mediului de lucru și siguranța muncii, prin scăderea volumului de muncă fizică, creșterea siguranței muncii prin eliminarea contactului dintre operator – pod rulant, creșterea productivității muncii prin scurtarea ciclurilor de lucru etc.;
- apariția unor noi riscuri: stresul privind creșterea responsabilităților în procesul de automatizare, procesul solicită un grad înalt de pregătire profesională al operatorilor, creșterea gradului de complexitate al podului rulant cumulat în prima etapă cu creșterea costurilor.

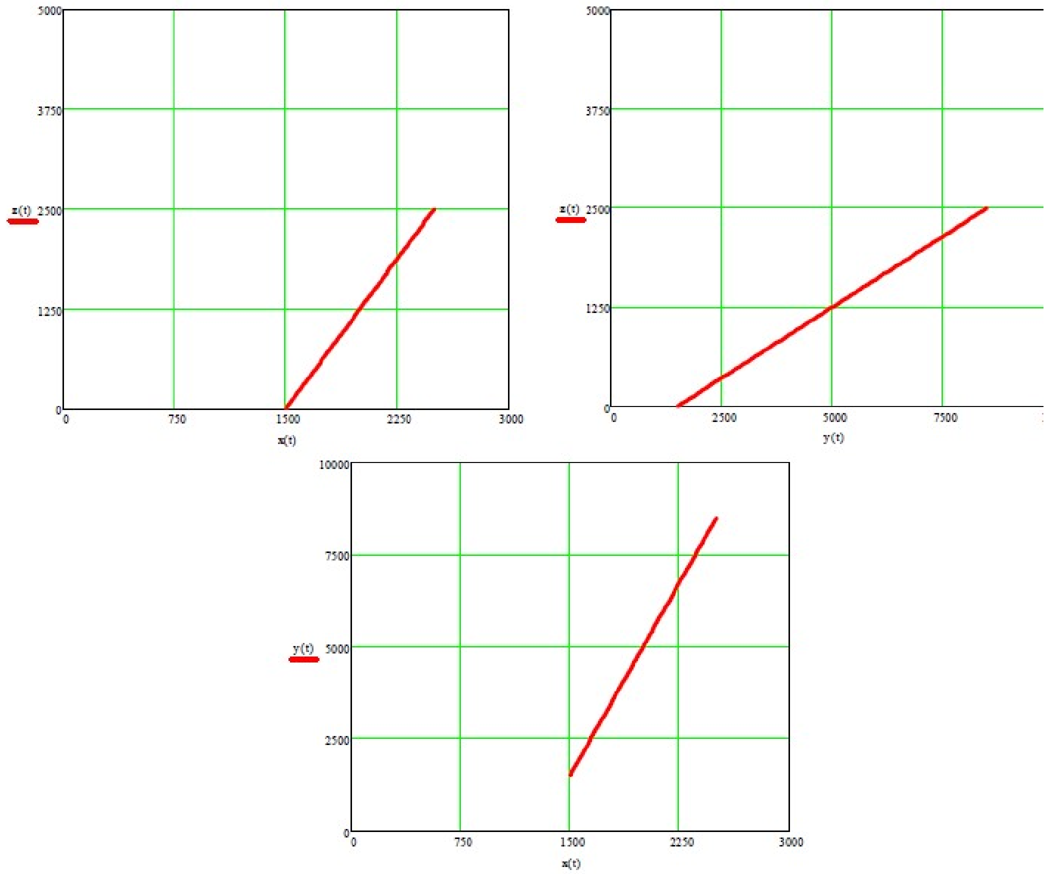


Figura 5 – Traiectoria liniară generată între punctul inițial și punctul final

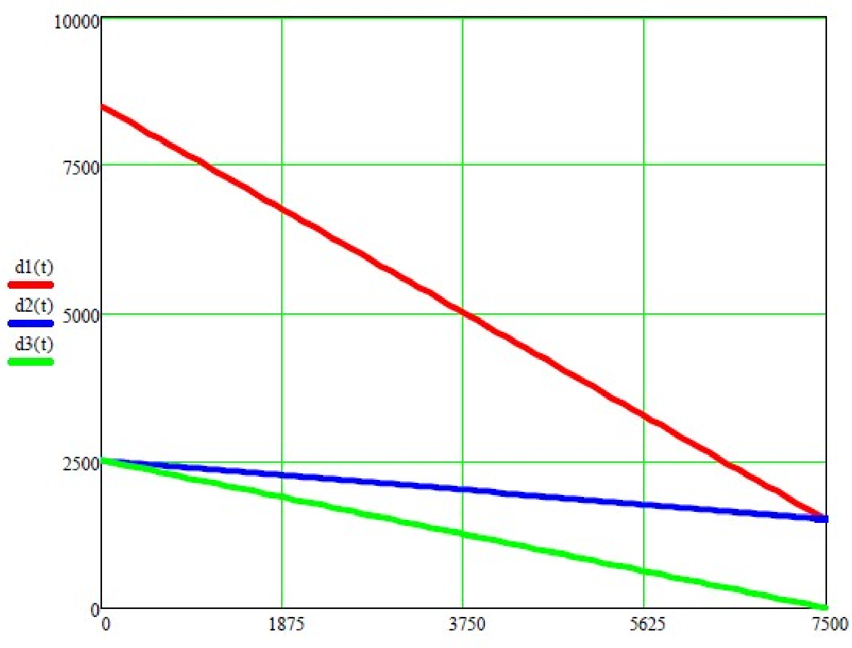


Figura 6 – Variațiile variabilelor articulare

BIBLIOGRAFIE

[1] **Richard S. Hartenberg, Jacques Denavit** - *Kinematic synthesis of linkages. McGraw Hill, 1964*

[2] *Documentație Pod rulant monogrindă 1.6t ecartament 3m*

[3] **Carlos Balaguer, Mohamed Abderrahim** - *Robotics and Automation in Construction*. InTech Europe, 2008, ISBN 978-953-7619-13-8.

[4] **Raicu, A., Bruja, A**. – *Mecanisme*. UTCB, 1996.

[5] *Robots and automated machines in construction*. IAARC Catalogue, 1998, www.iaarc.org.