Љубинко Б. Кевац

МОДЕЛОВАЊЕ И УПРАВЉАЊЕ КАБЛОВСКИ ВОЂЕНИМ РОБОТСКИМ СИСТЕМИМА

Докторска дисертација

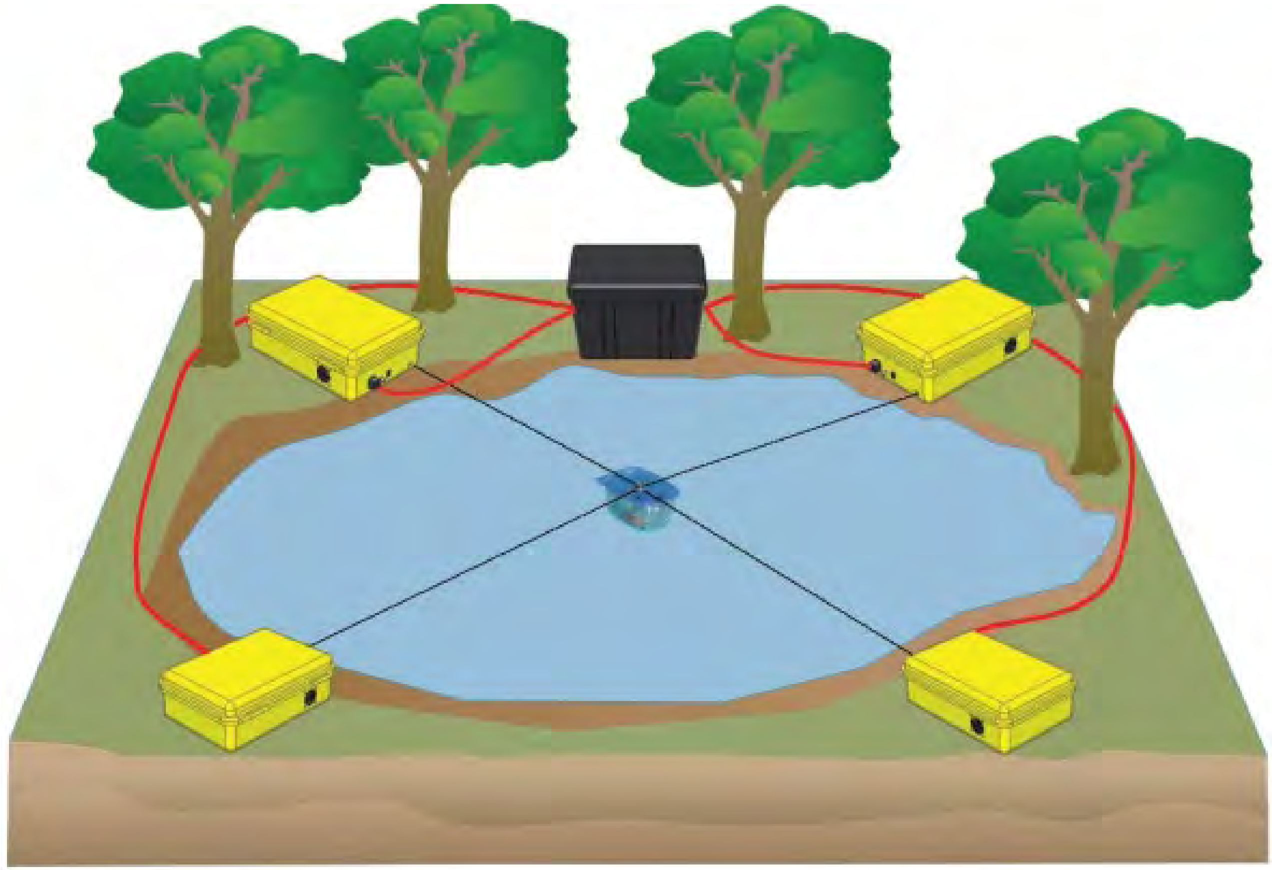
Смисао и циљ истраживања и развоја робота

- Робот је сложени мехатронички систем са најмање два степена слободе који су спрегнути и који поседује елементе вештачке интелигенције тако да може самостално да обавља планиране задатке без учешћа човека
- Циљ је да кроз истраживање и његов развој да се робот што више осамостали у извршавању својих задатака и то је урађено кроз откривање свих феноме који карактеришу роботски систем као сложени мехатронички систем, итд.

1. УВОД

- CPR систем (енг. Cable-suspended Parallel Robot) представљају подгрупу сервисних робота
- CPR системи су сложени роботски системи који користе ужад (каблове) као преносинике кретања
- Пионирски CPR системи су настали у Јапану и САД
- Један од најпознатијих CPR система је NIMS робот
- На основу детаљне анализе доступне литературе дефинисане су нове конфигурације CPR система и њихових подсистема
- Ови систем су детаљно анализирани и на њима су примењене нове методе за управљање, моделовање и сл.

1. УВОД



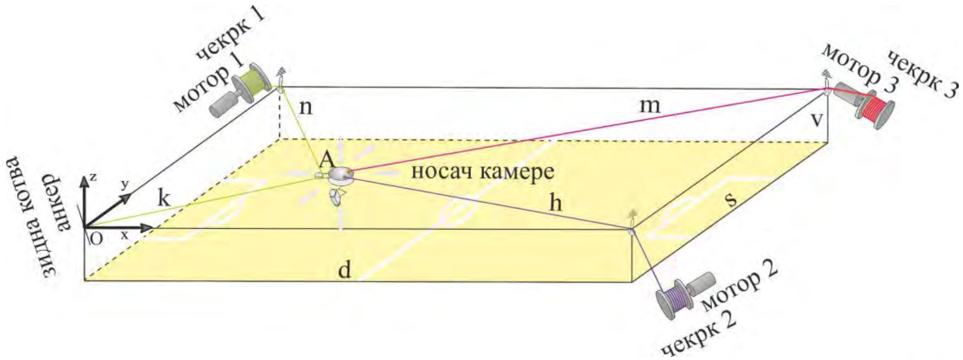
NIMS робот

1. УВОД

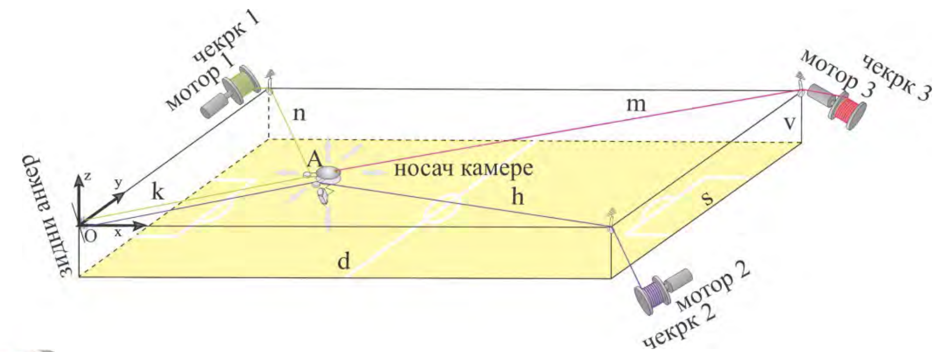
- Дисертација је подељења у следеће целине:
- У Глави 2 су приказане различите конфигурације CPR система
- У Глави 3 је приказан приницп дефинисања математичког модела CPR система
- У Глави 4 ће бити приказан утицај употребе стандардног облика чекрка за једноредо намотавање (одмотавање) ужета (кабла) на рад CPR система
- У Глави 5 ће бити приказано решење подсистема за намотавање (одмотавање) ужета на нови облик чекрка
- Системи приказани у Главама 2 до 5 су дизајнирани тако да није могуће контролисати оријентацију носача терета CPR система. Управо тај проблем ће бити анализиран у Глави 6
- У Глави 7 ће бити дата анализа и синтеза проблема дефинисања радног простора CPR система, односно величине његовог изводљивог радног простора
- У Глави 8 ће бити генерисана нова управљачка структура за контролу кретања носача терета CPR система
- У Глави 9 ће бити приказан нови алгоритам за креирање трајекторије носача камере једне структуре CPR система
- У Глави 10 су дати закључци и ауторова разматрања и планови за будуће истраживање.

2. Нове конфигурације CPR система

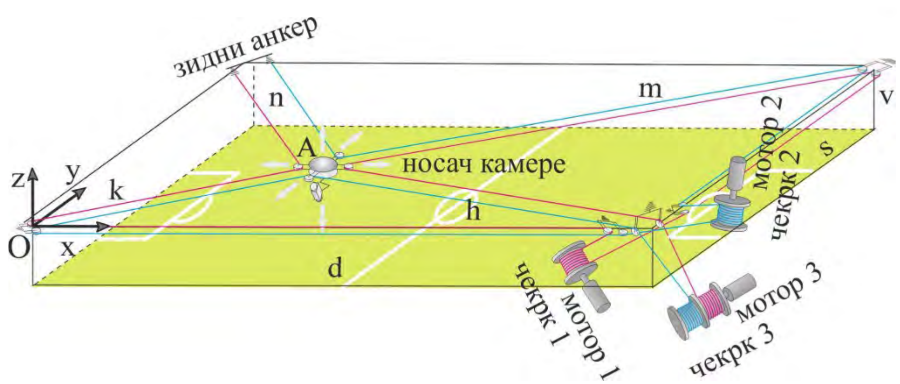
- RSCPR систем



- RFCPR систем

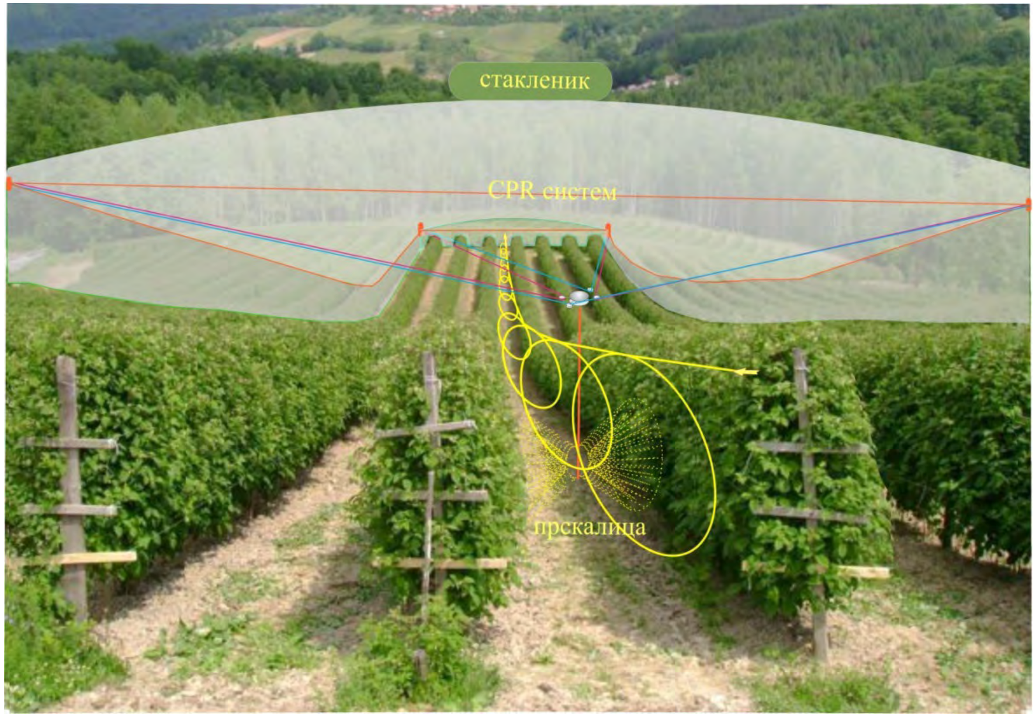


- CPR-A систем



2. Нове конфигурације CPR система

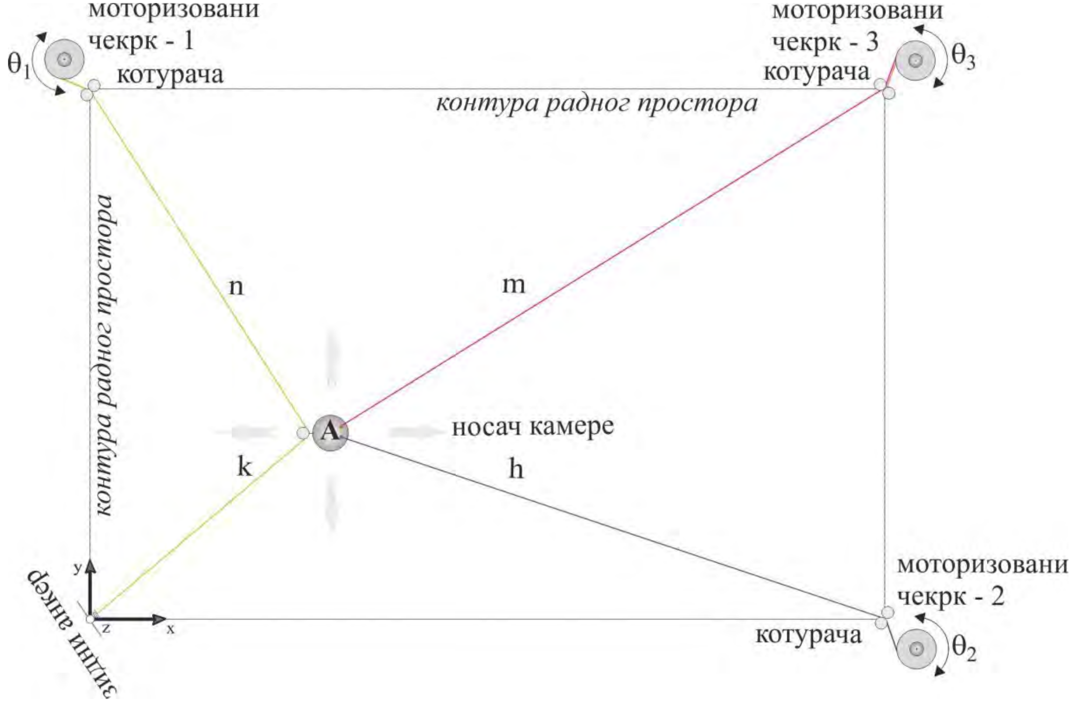
- CPR системи могу бити употребљени у различитим областима: војне и полицијске сврхе, надгледање великих спортских и сличних догађаја помоћ одраслима и деци, грађевинарство, Пољопривреда, итд.



3. Математичко моделовање CPR система

- Биће приказано моделовање RSCPR систем
- Детаљна анализа и моделовање овог система је дато у:

[] Filipovic, M., Djuric, A. and Kevac, L.: The rigid S-type cable-suspended parallel robot design, modelling and analysis. ROBOTICA, 34(9), 1948–1960. doi: 10.1017/S0263574714002677, (2016).



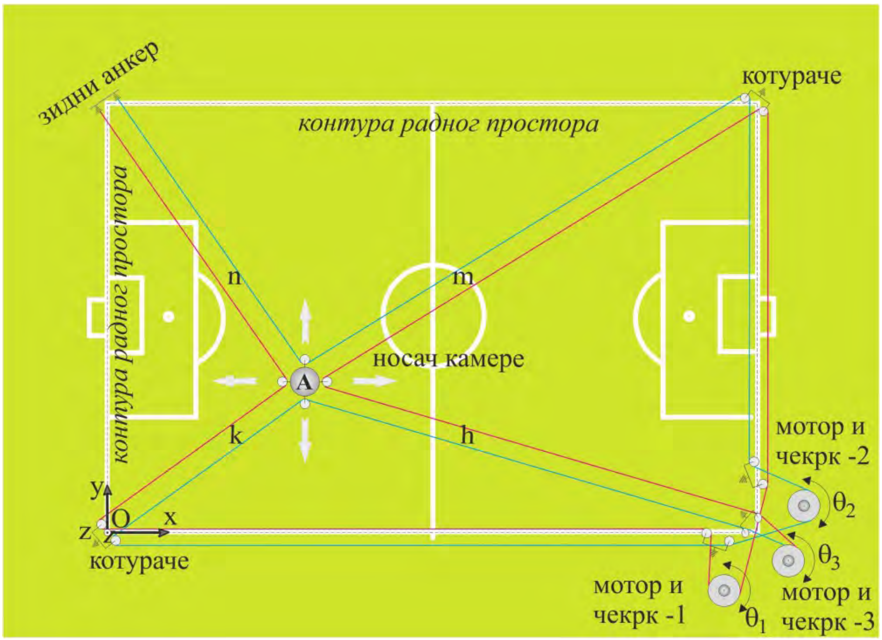
3. Математичко моделовање CPR система

- $k = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, (3.1)
- $h = \sqrt{(d - x)^2 + y^2 + z^2}$, (3.2)
- $m = \sqrt{(d - x)^2 + (s - y)^2 + z^2}$, (3.3)
- $n = \sqrt{x^2 + (s - y)^2 + z^2}$, (3.4)
- $p = [x \quad y \quad z]^T$ су Картезијанске координате тачке А (спољашње координате)
- $\begin{bmatrix} \dot{k} \\ \dot{n} \\ \dot{h} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x}{k} & \frac{y}{k} & \frac{z}{k} \\ \frac{x}{n} & -\frac{s-y}{n} & \frac{z}{n} \\ -\frac{d-x}{h} & \frac{y}{h} & \frac{z}{h} \\ -\frac{d-x}{m} & -\frac{s-y}{m} & \frac{z}{m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}$. (3.5)
- Скраћено: $\dot{e} = E \cdot \dot{p}$, где је: $\dot{e} = [\dot{k} \quad \dot{n} \;\; \dot{h} \quad \dot{m}]^T$. (3.6)

3. Математичко моделовање CPR система

- $\dot{\theta}_1 \cdot R_1 = \dot{k} + \dot{n}, \quad \dot{\theta}_2 \cdot R_2 = \dot{h}, \dot{\theta}_3 \cdot R_3 = \dot{m},$ (3.7)- (3.9)
- Даљим комбиновањем се добија:
- $\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x}{R_1 \cdot k} + \frac{x}{R_1 \cdot n} & \frac{y}{R_1 \cdot k} - \frac{s-y}{R_1 \cdot n} & \frac{z}{R_1 \cdot k} + \frac{z}{R_1 \cdot n} \\ -\frac{d-x}{R_2 \cdot h} & \frac{y}{R_2 \cdot h} & \frac{z}{R_2 \cdot h} \\ -\frac{d-x}{R_3 \cdot m} & -\frac{s-y}{R_3 \cdot m} & \frac{z}{R_3 \cdot m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}$. (3.10) – Кинематички модел
- Односно: $\dot{\phi} = J_S \cdot \dot{p}$ (3.11), где J_S представља Јакобијеву матрицу RSCPR система и $\dot{\phi}$ је вектор угаоних брзина које се још називају унутрашње координате
- Потребно је одредити динамички модел система у форми:
- $u = G_v \cdot \ddot{\phi} + L_v \cdot \dot{\phi} + S_v \cdot M_S,$ (3.12)
- Није нам познато M_S, а познате су нам спољашње силе које делују на носач камере:
- $F = F_p + P_p,$ (3.14), $F_p = m \cdot (\ddot{p} + a_{cc}),$ (3.15), где је: $a_{cc} = [0 \quad 0 \quad -g]^T$
- Применом Лагранжовог принципа виртуелног рада се добија:
- $M_s = \left((J_s)^T\right)^{-1} F,$ (3.20)

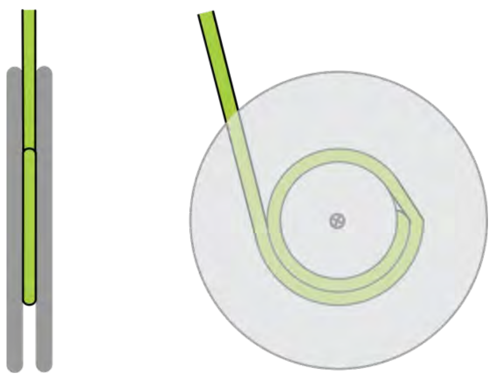
3. Математичко моделовање CPR система



- CPR-A поседује два ужета и због тога је матица која учествује у Лагранжовом принципу: $J_{\Delta A} = \begin{bmatrix} \Delta \cdot J_{A11} & \Delta \cdot J_{A12} & \Delta \cdot J_{A13} \\ \Delta \cdot J_{A21} & \Delta \cdot J_{A22} & \Delta \cdot J_{A23} \\ 2 \cdot \Delta \cdot J_{A31} & 2 \cdot \Delta \cdot J_{A32} & 2 \cdot \Delta \cdot J_{A33} \end{bmatrix}$, (3.36)
- Па је: $M_A = \left((J_{\Delta A})^T \right)^{-1} F$, (3.37)
- Детаљније у:

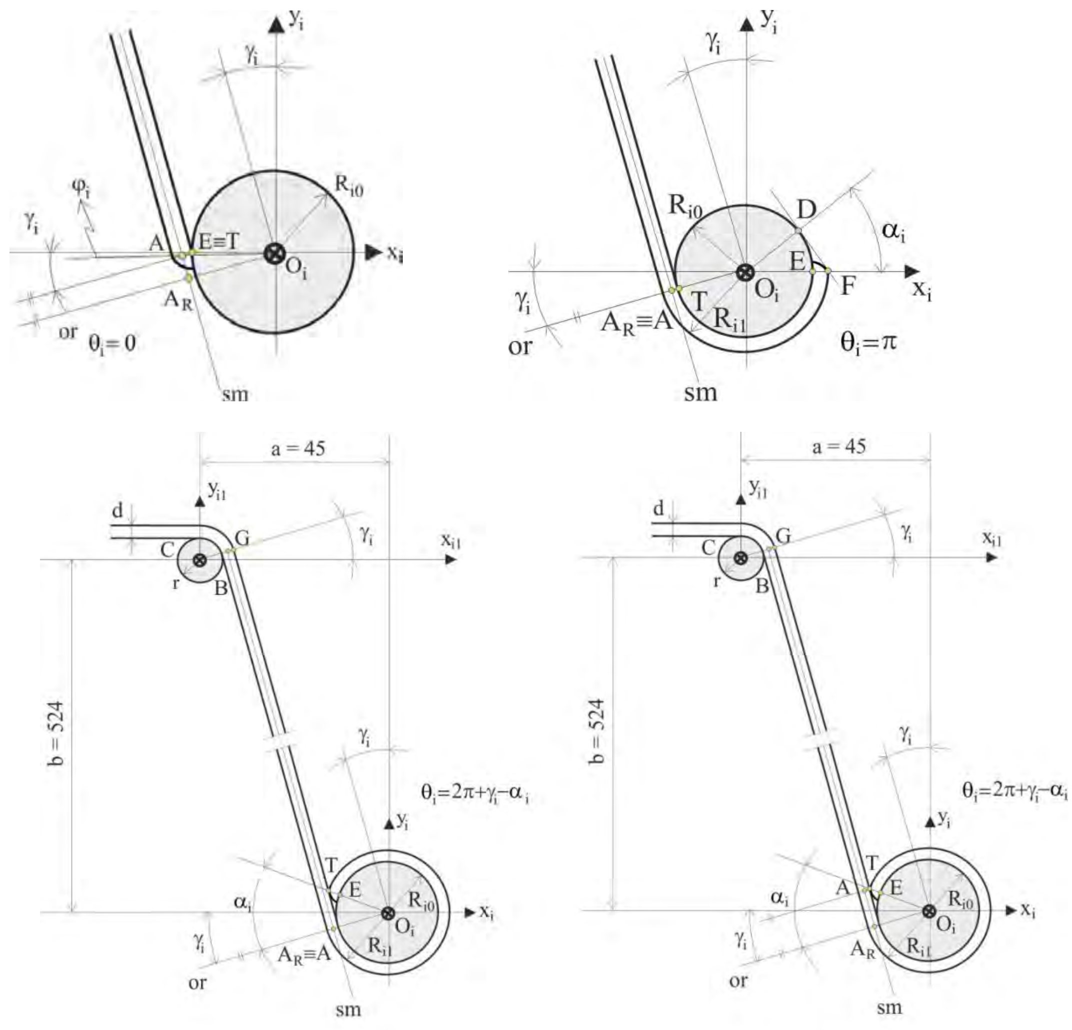
[] Filipovic, M., Djuric, A., Kevac, L.: The significance of adopted Lagrange principle of virtual work used for modeling aerial robots, APPL MATH MODEL, S0307-904X(14)00445-4, submitted 2012, published online in October 2014, ISSN 0307-904X, DOI: 10.1016/j.apm.2014.09.019, (2014).

4. Анализа утицаја типа чекрка за једноредо намотавање (одмотавање) ужета на рад CPR система



- Детаљно описано у :

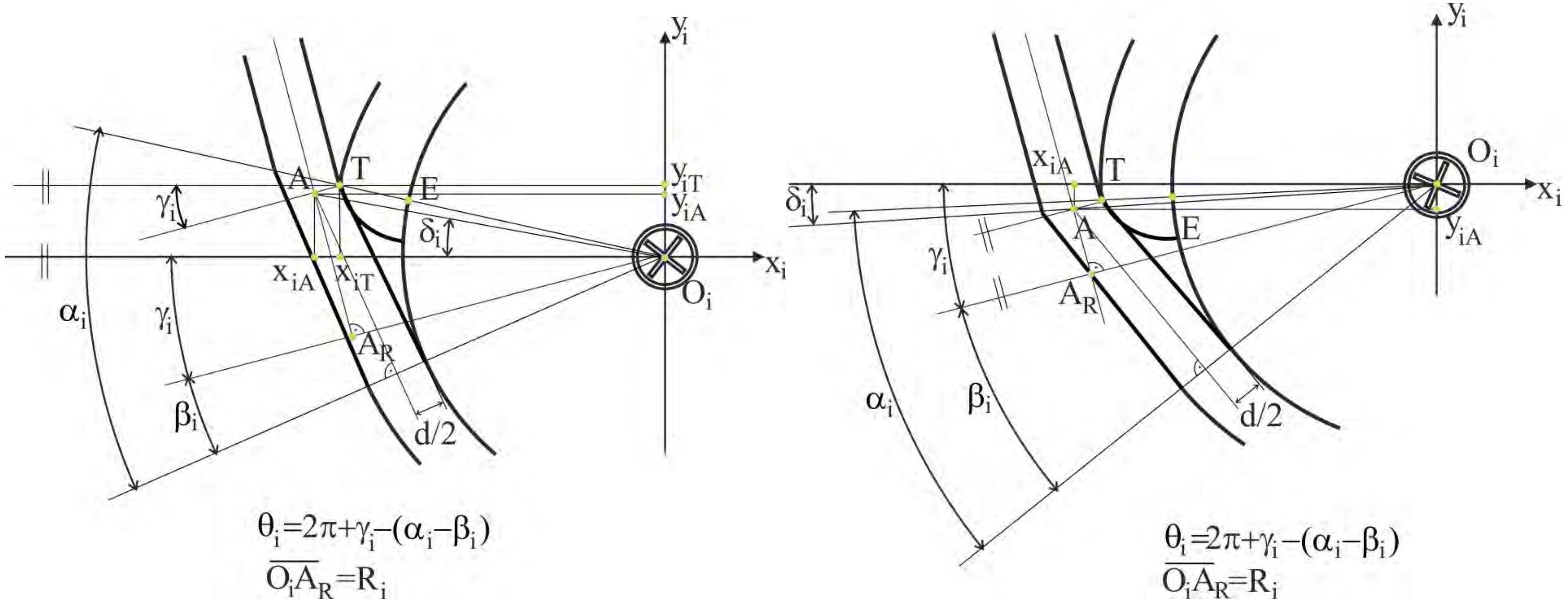
Kevac, L., Filipovic, M., Rakic, A.: Dynamics of the process of the rope winding (unwinding) on the winch, APPL MATH MODEL 48C, 821-843, DOI: 10.1016/j.apm.2017.02.023, (2017).



а) б)

4. Анализа утицаја типа чекрка за једноредо намотавање (одмотавање) ужета на рад CPR система

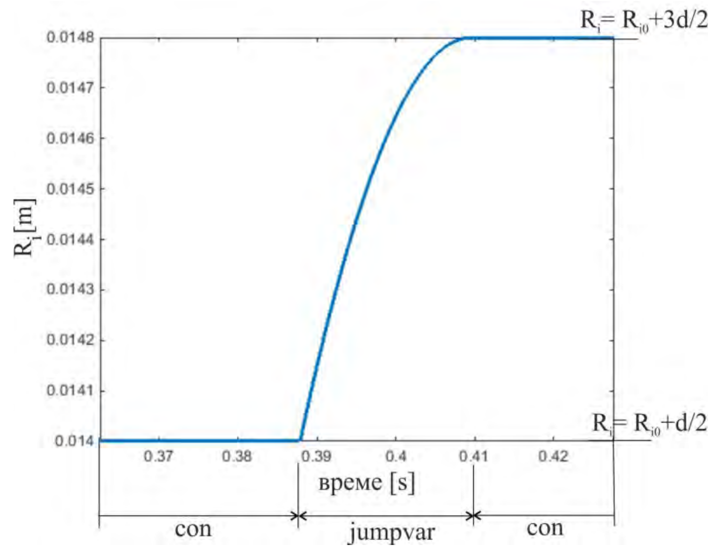
- Полупречник током константног дела: $R_i = \overline{O_iA} = \overline{O_iA_R} = R_{i0} + d/2$.

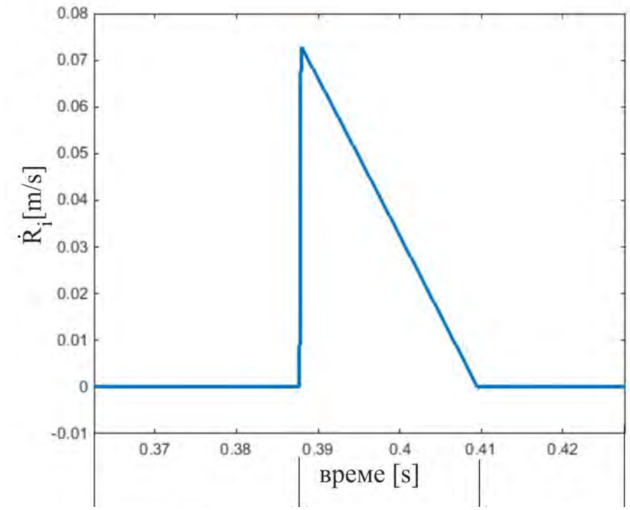


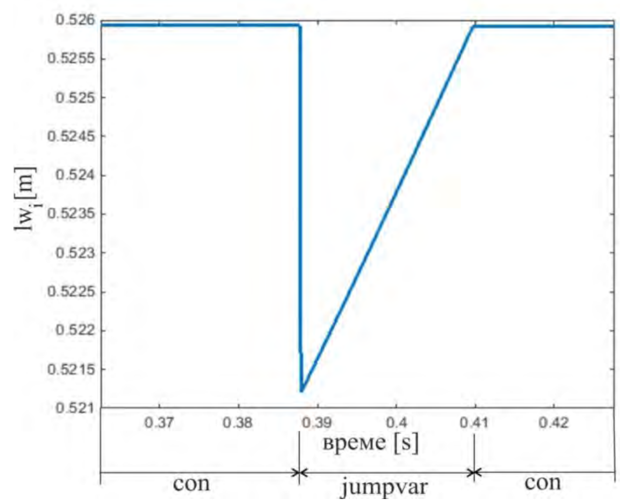
$R_i = \overline{O_i\,A_R} = \overline{O_iA}\cdot\cos(|\delta_i| + \gamma_i)$. (4.12)

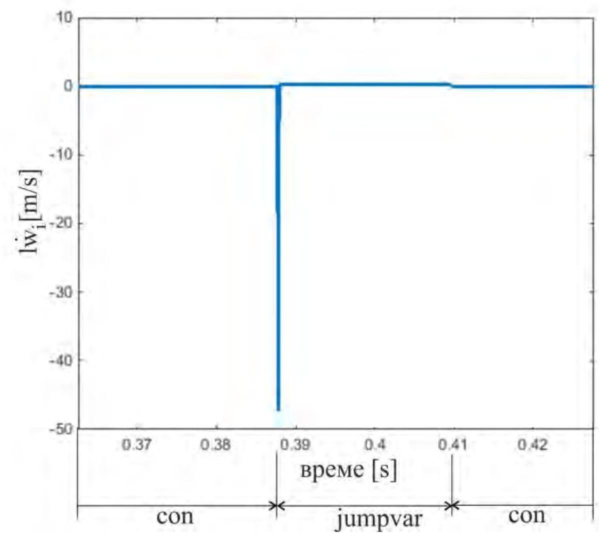
$R_i = \overline{O_i\,A_R} = \overline{O_iA}\cdot\cos(\gamma_i - |\delta_i|)$. (4.13)

4. Анализа утицаја типа чекрка за једноредо намотавање (одмотавање) ужета на рад CPR система

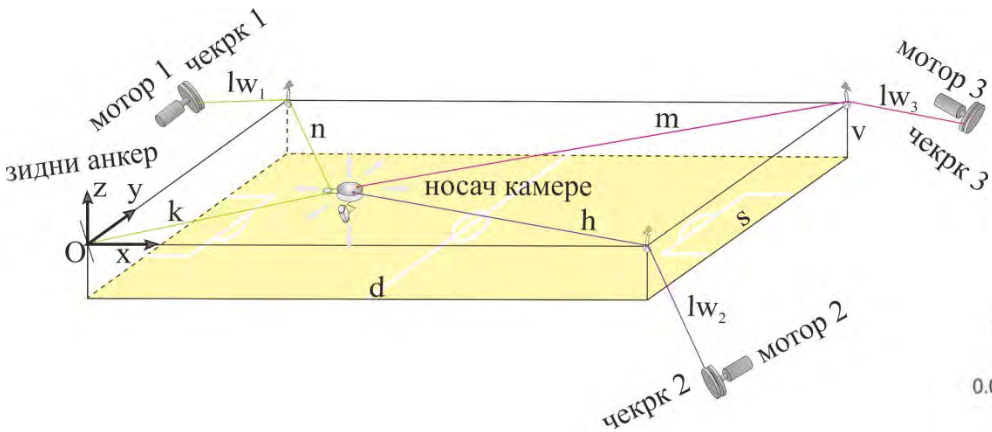


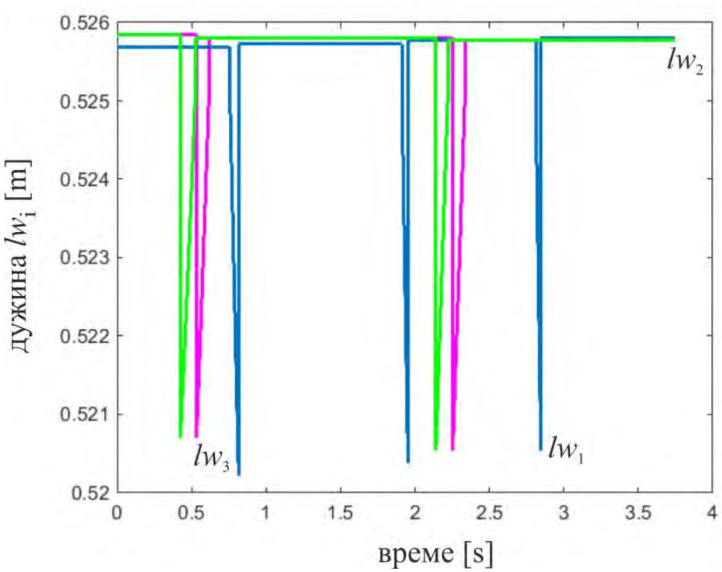


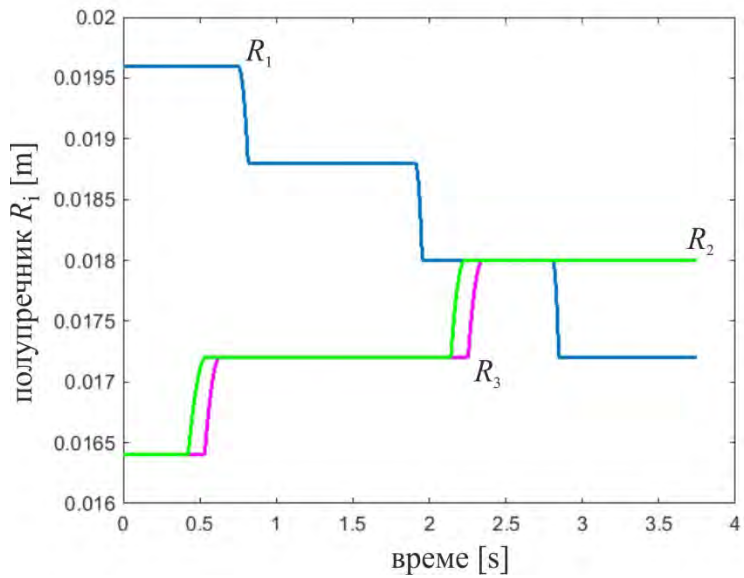




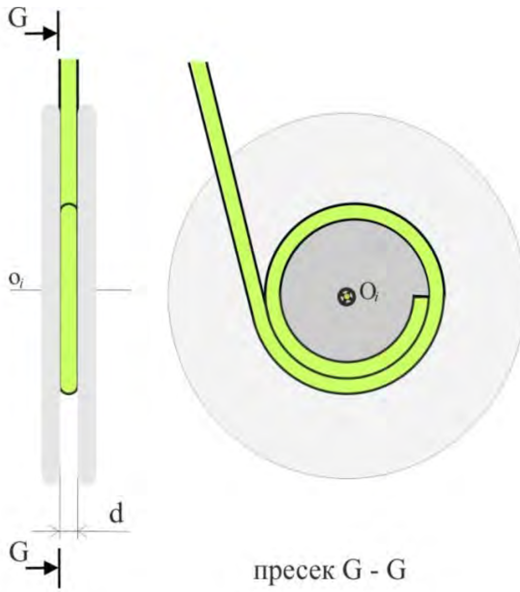
4. Анализа утицаја типа чекрка за једноредо намотавање (одмотавање) ужета на рад CPR система



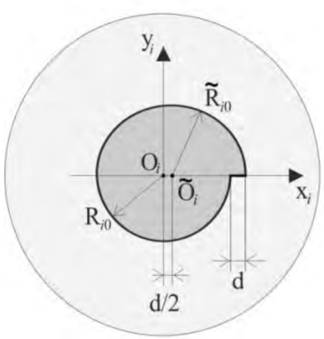




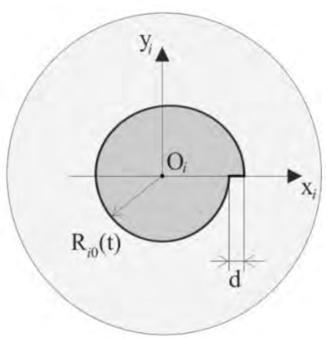
5. Нови дизајн чекрка за једноредо глатко намотавање (одмотавање) ужета



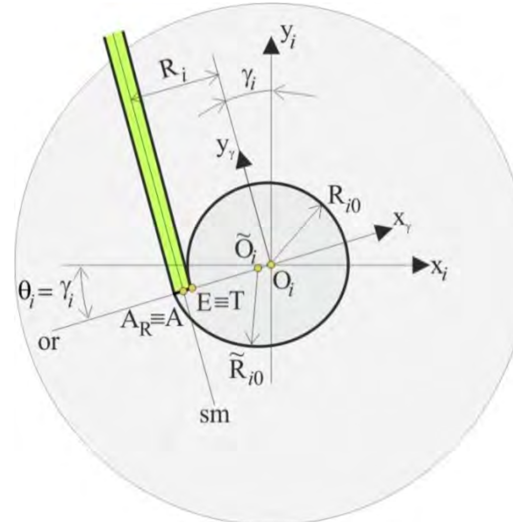
а)



б)



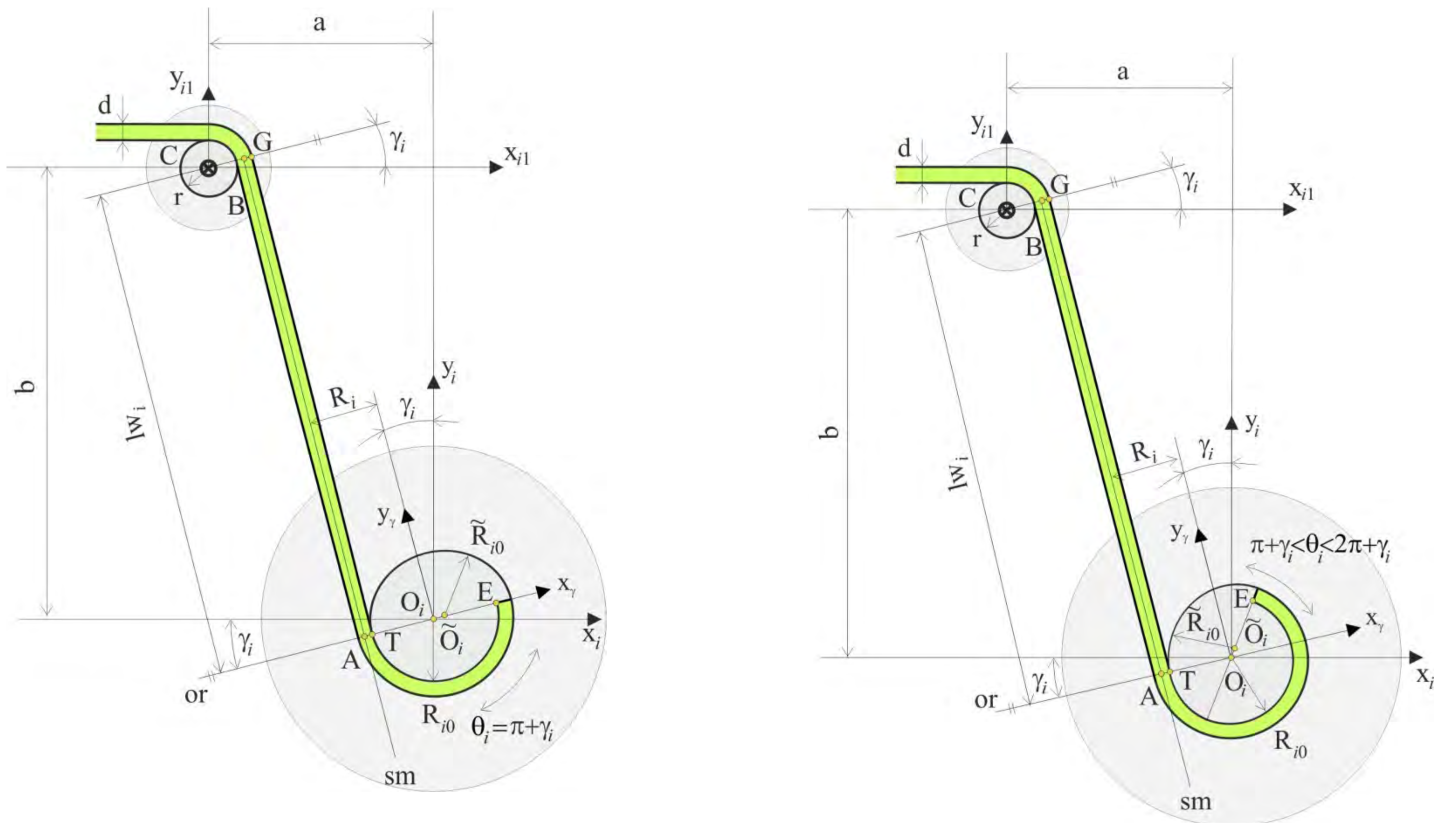
в)



- Патентирано у:

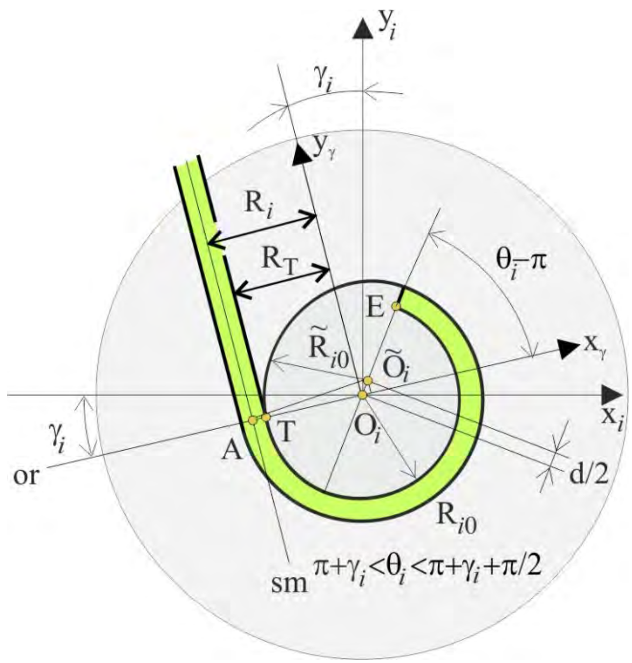
Kevac, L., Filipovic, M., Stikic, Z. Institut Mihajlo Pupin (2015). Glatko jednoredno višeslojno radijalno namotavanje užeta na čekrk, Smooth single-rowed multilayered radial winding of the rope on the winch. Serbia. Application number П-2015/0598 ((A1) 31.03.2017. 8/2017, Pending), (2015).

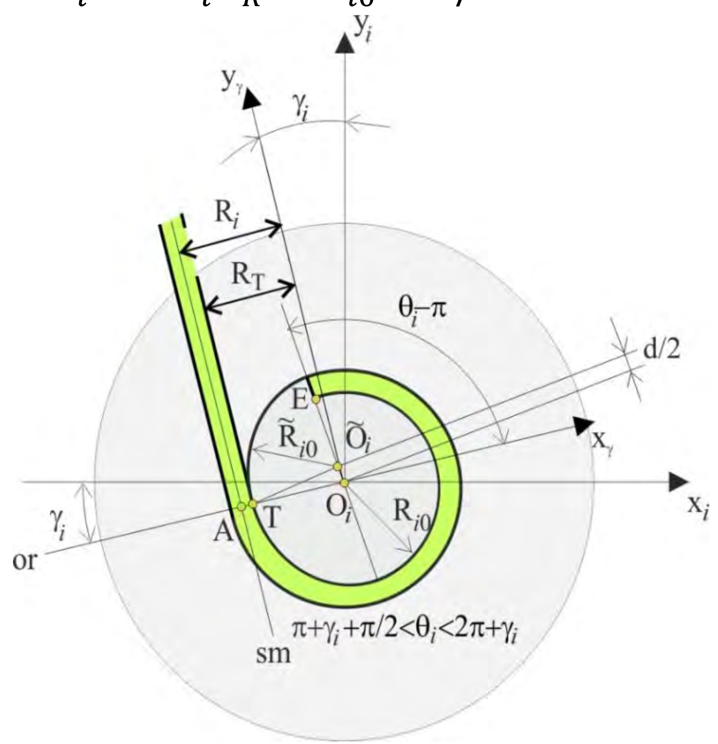
5. Нови дизајн чекрка за једноредо глатко намотавање (одмотавање) ужета



5. Нови дизајн чекрка заједноредо глатко намотавање (одмотавање) ужета

- Полупречник током константног дела: $R_i = \overline{O_i A} = \overline{O_i A_R} = R_{i0} + d/2$.

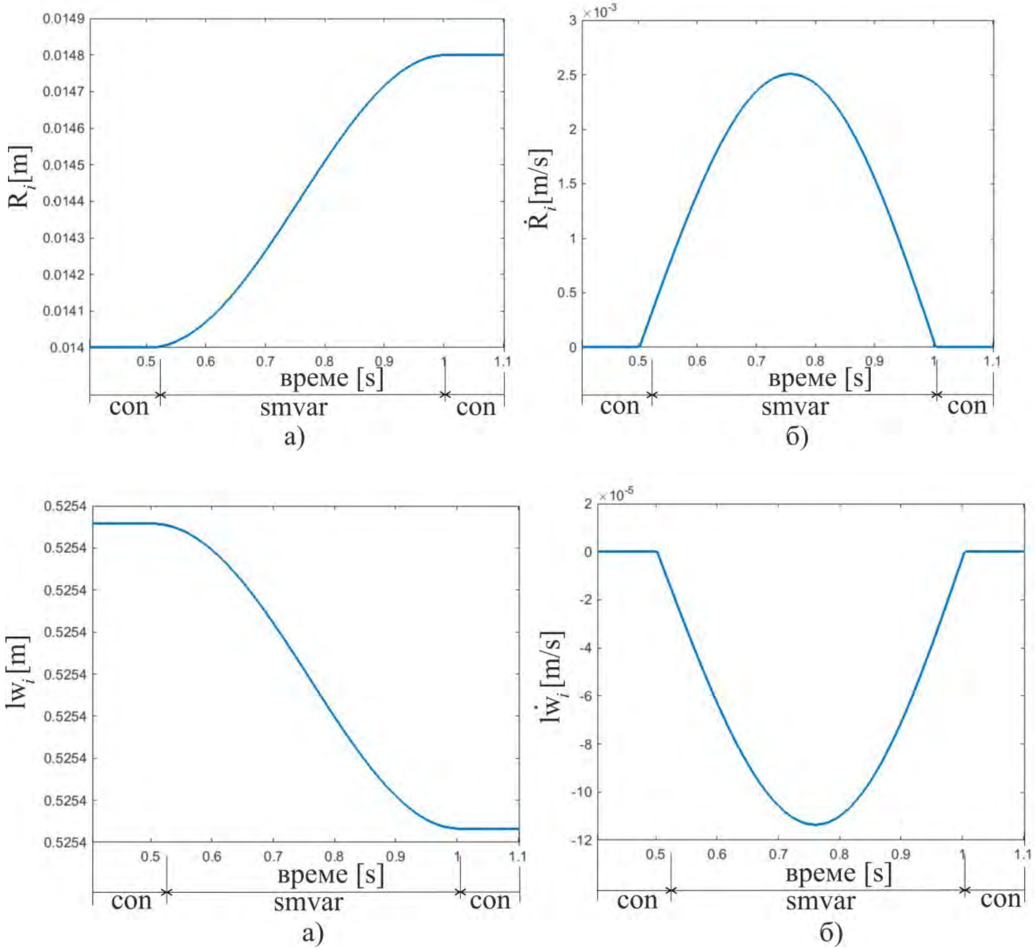




$R_i = \sqrt{(R_{i0} + d/2)^2 - (d/2 \cdot \sin(\theta_i - \pi))^2} - d/2 \cdot \cos(\theta_i - \pi) + d/2.$ (5.10)

$R_i = \sqrt{(R_{i0} + d/2)^2 - (d/2 \cdot \sin(\theta_i - \pi))^2} + |d/2 \cdot \cos(\theta_i - \pi)| + d/2.$ (5.11)

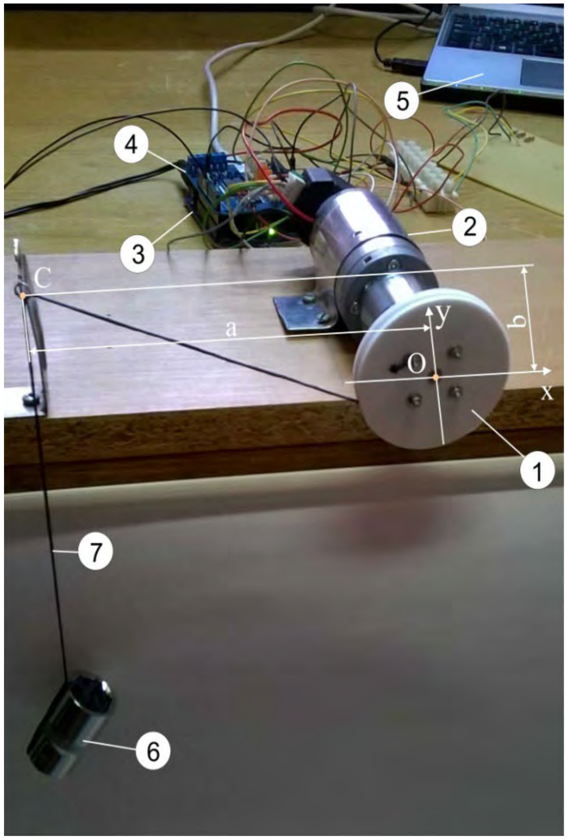
5. Нови дизајн чекрка за једноредо глатко намотавање (одмотавање) ужета

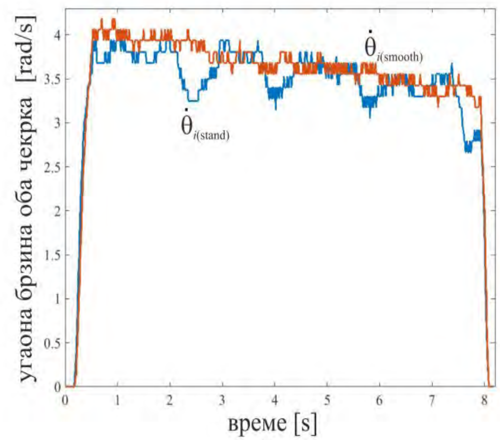


- Део резултата и математички модел у:

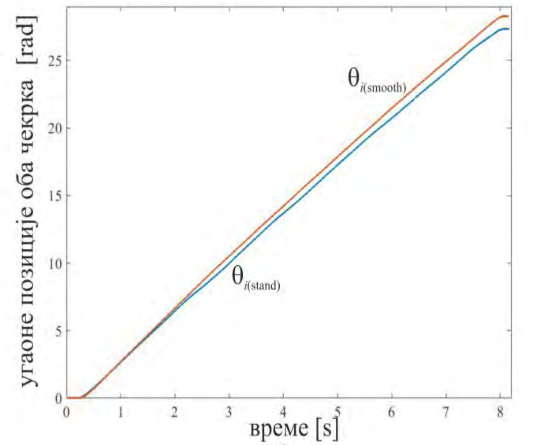
Kevac, L., Filipovic, M.: Mathematical model of cable winding/unwinding system, J MECH, accepted for publication on 15.06.2017, DOI: https://doi.org/10.1017/jmech.2017.59, (2017).

5. Нови дизајн чекрка за једноредо глатко намотавање (одмотавање) ужета



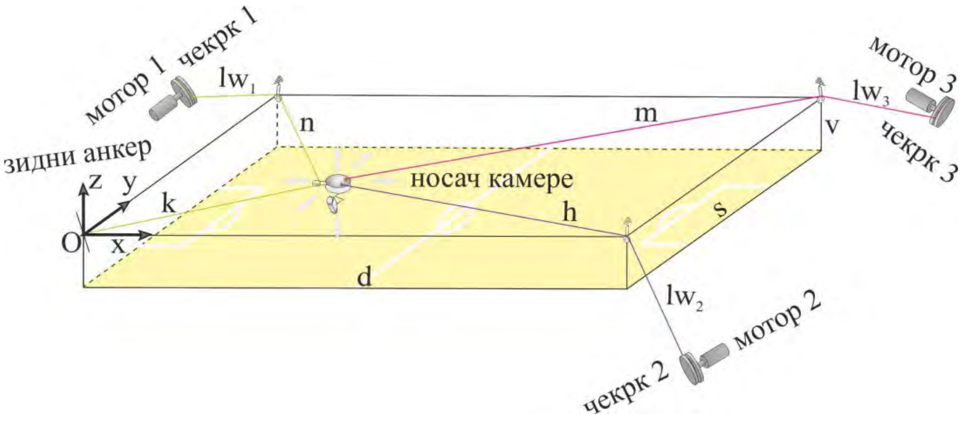


а)



б)

5. Нови дизајн чекрка за једноредо глатко намотавање (одмотавање) ужета



$\rho_1 = k + n$, (5.21)
$\rho_2 = h$, (5.22)
$\rho_3 = m$. (5.23)

$\Delta\rho_1 = \Delta k + \Delta n$, (5.24)
$\Delta\rho_2 = \Delta h$, (5.25)
$\Delta\rho_3 = \Delta m$. (5.26)

$(\Delta\theta_i \cdot R_i + \theta_i \cdot \Delta R_i) = -\Delta\rho_i - \Delta lw_i$. (5.27)

$$\begin{bmatrix}\dot\theta_1\\ \dot\theta_2\\ \dot\theta_3\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\frac{x}{R_1\cdot k}+\frac{x}{R_1\cdot n} & \frac{y}{R_1\cdot k}-\frac{s-y}{R_1\cdot n} & \frac{z}{R_1\cdot k}+\frac{z}{R_1\cdot n}\\ -\frac{d-x}{R_2\cdot h} & \frac{y}{R_2\cdot h} & \frac{z}{R_2\cdot h}\\ -\frac{d-x}{R_3\cdot m} & -\frac{s-y}{R_3\cdot m} & \frac{z}{R_3\cdot m}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\dot x\\ \dot y\\ \dot z\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\frac{\dot{lw}_1+\theta_1\cdot\dot R_1}{R_1}\\ \frac{\dot{lw}_2+\theta_2\cdot\dot R_2}{R_2}\\ \frac{\dot{lw}_3+\theta_3\cdot\dot R_3}{R_3}\end{bmatrix},$$

$\dot\phi = -J_S \cdot \dot p - E$, (5.37) и (5.39)

Кинематички модел

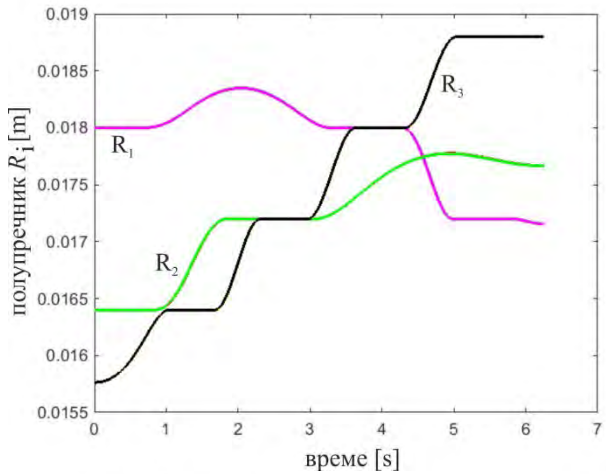
$F^T \cdot \dot p = M_{SW}{}^T \cdot \dot\phi$, $F^T \cdot \dot p = -M_{SW}{}^T \cdot (J_S \cdot \dot p + E)$. (5.40) и (5.41) Ако се дефинишу:

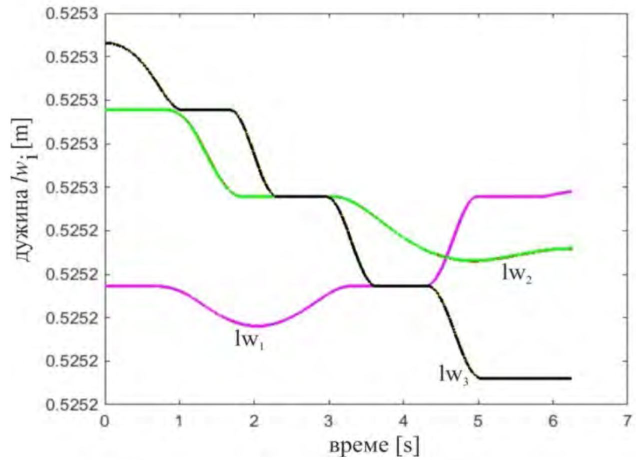
$P_d = diag(\dot p)$ и $E_d = diag(E)$. (5.42) и (5.43)

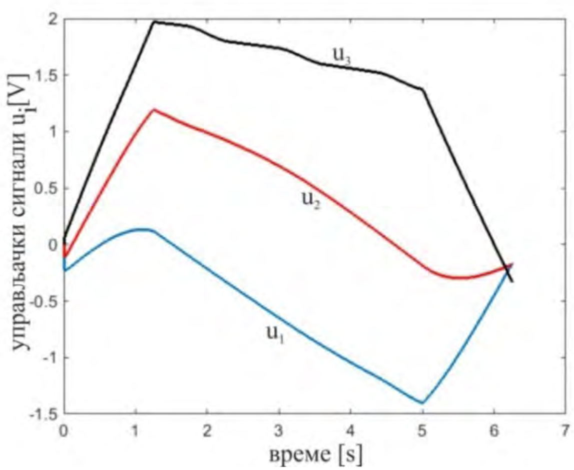
- Сређивањем се добија: $M_{SW} = -((J_S + E_d \cdot (P_d)^{-1})^T)^{-1} \cdot F$. (5.47)

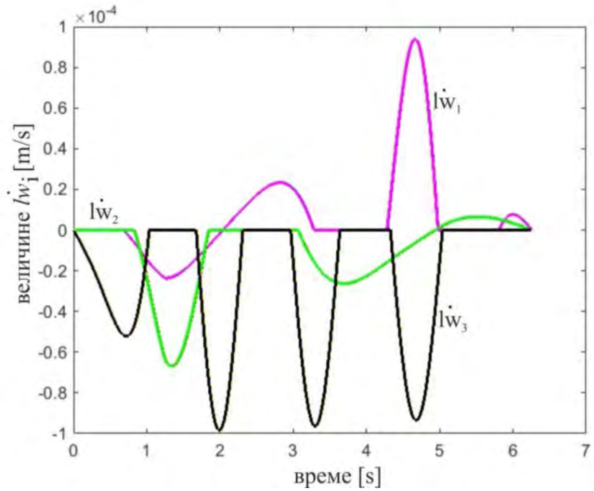
5. Нови дизајн чекрка за једноредо глатко намотавање (одмотавање) ужета

$u = G_v \cdot \ddot{\phi} + L_v \cdot \dot{\phi} + S_v \cdot M_{SW},$ Динамички модел

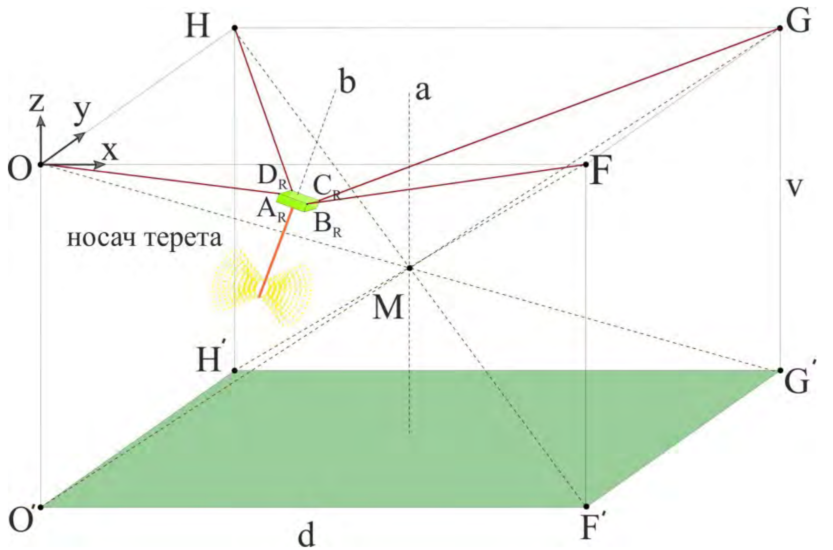


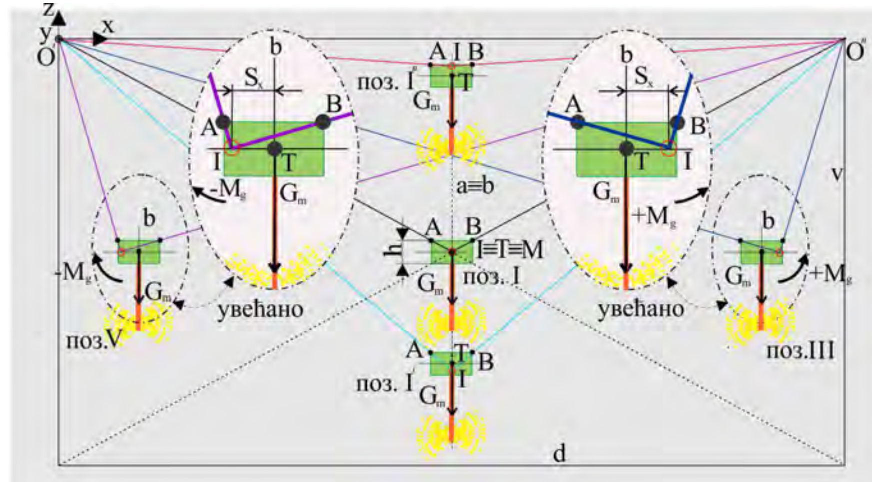


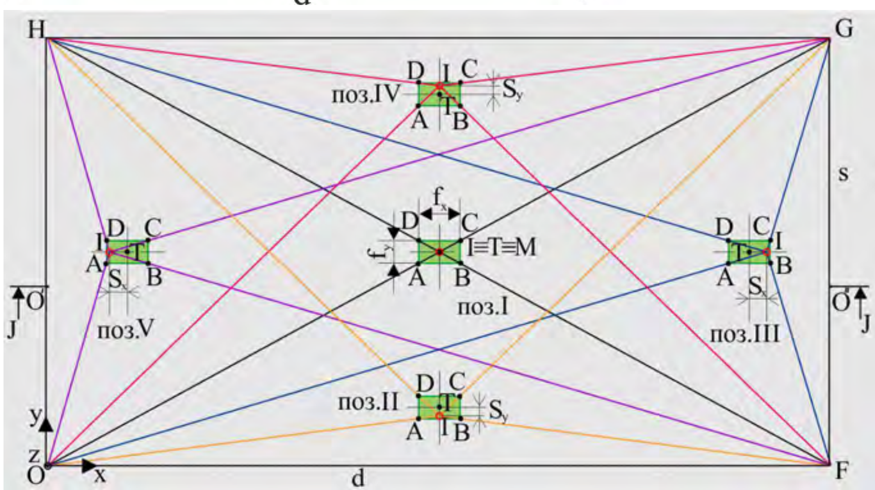


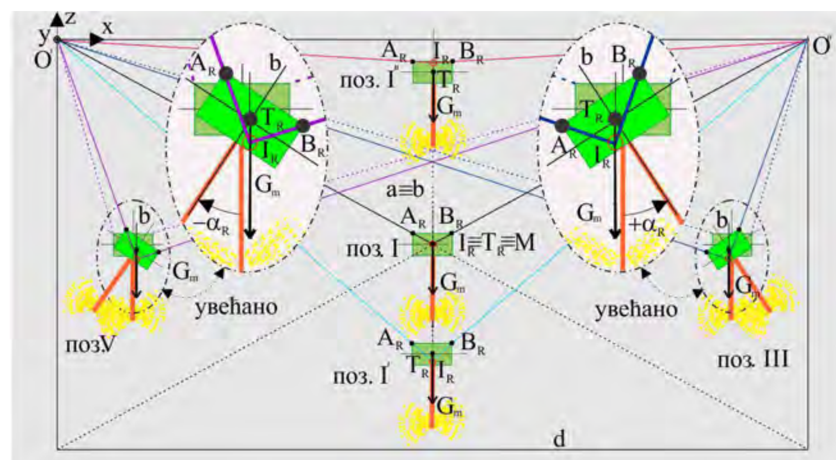


6. Анализа оријентације носача терета CPR система

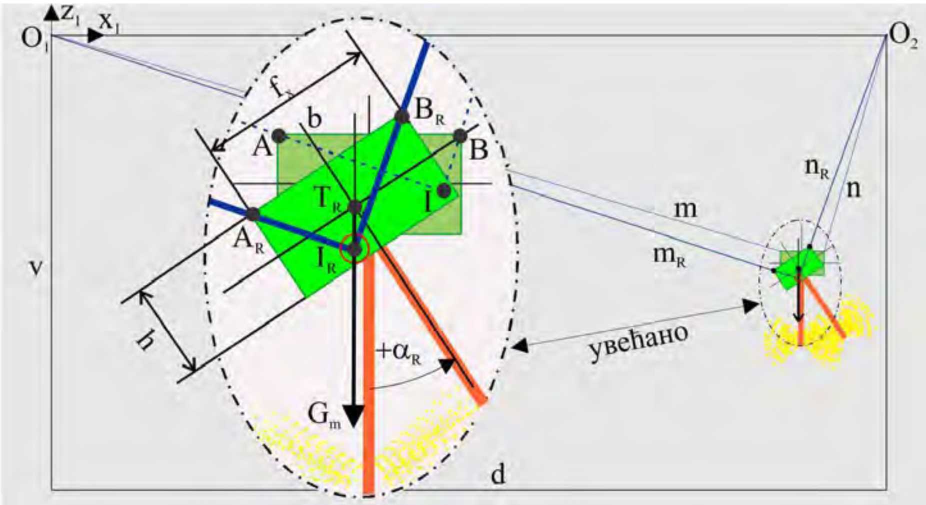








6. Анализа оријентације носача терета CPR система



$$1.\ f_x = (x_{BR} - x_{AR})^2 + (z_{BR} - z_{AR})^2, \ (6.1)$$
$$2.\ m_R^2 = x_{AR}^2 + z_{AR}^2, \ (6.2)$$
$$3.\ n_R^2 = (x_{BR} - d)^2 + z_{BR}^2. \ (6.3)$$

$$x_{TR} = x_{IR}. \ (6.4)$$

$$x_{TR} = x_{AR} + \frac{\frac{f_x}{2}}{\sqrt{1+\left(\frac{z_{BR}-z_{AR}}{x_{BR}-x_{AR}}\right)^2}} + \frac{\frac{h}{2}}{\sqrt{1+\left(\frac{x_{BR}-x_{AR}}{z_{BR}-z_{AR}}\right)^2}}.$$
(6.5)

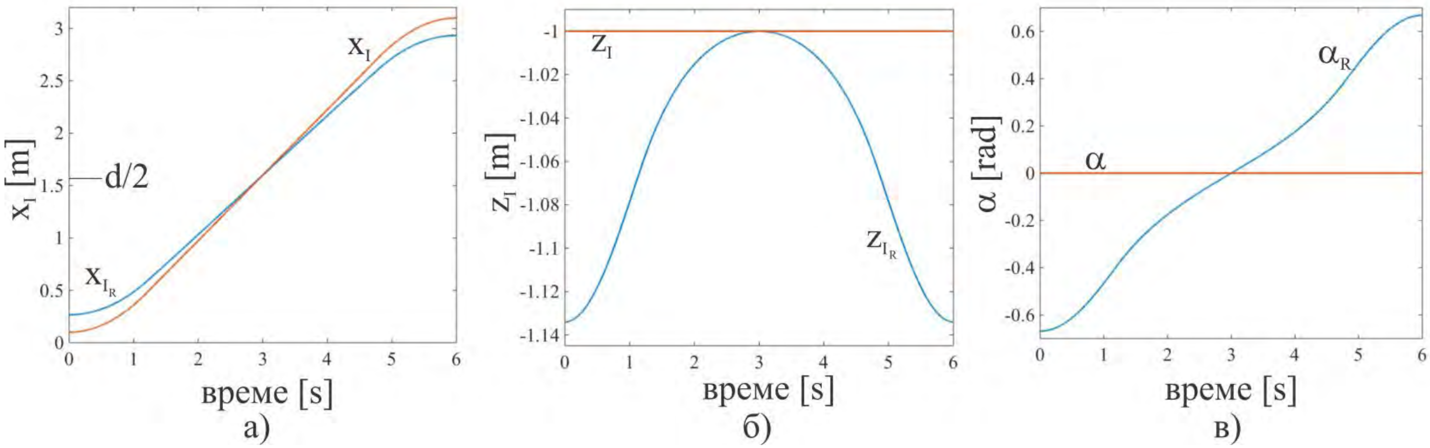
- Из услова пресека између линија $O_1 I_R$ (смер линије m_R) и $O_2 I_R$ (смер линије n_R), добија се:

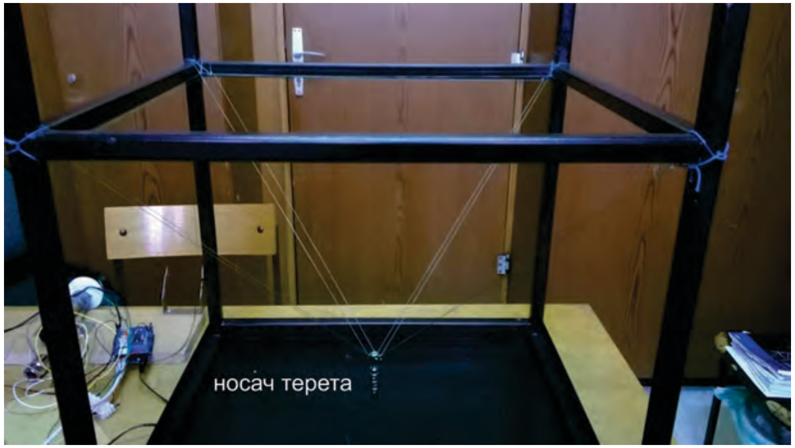
$$x_{IR} = \frac{x_{AR} z_{BR} d}{x_{AR} z_{BR} + z_{AR}(d - x_{BR})}. \ (6.6)$$

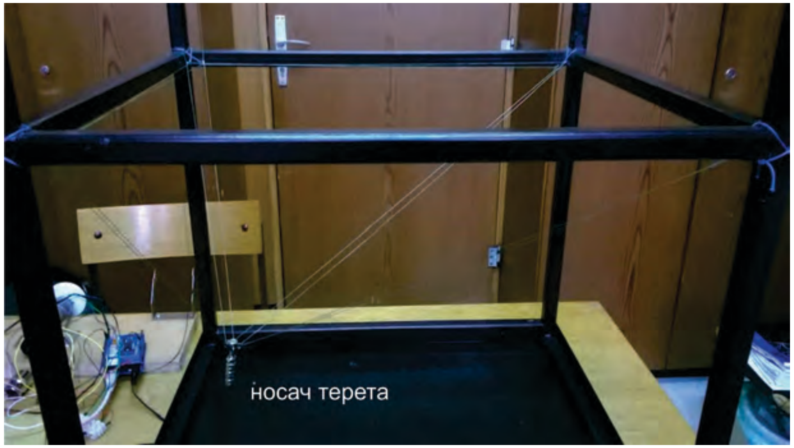
$$4.\ x_{AR} + \frac{\frac{f_x}{2}}{\sqrt{1+\left(\frac{z_{BR}-z_{AR}}{x_{BR}-x_{AR}}\right)^2}} + \frac{\frac{h}{2}}{\sqrt{1+\left(\frac{x_{BR}-x_{AR}}{z_{BR}-z_{AR}}\right)^2}} = \frac{x_{AR} z_{BR} d}{x_{AR} z_{BR} + z_{AR}(d - x_{BR})}.$$
(6.7)

$$5.\ \alpha_R = \operatorname{atan}\left(\frac{z_{BR}-z_{AR}}{x_{BR}-x_{AR}}\right).$$
(6.8)

6. Анализа оријентације носача терета CPR система

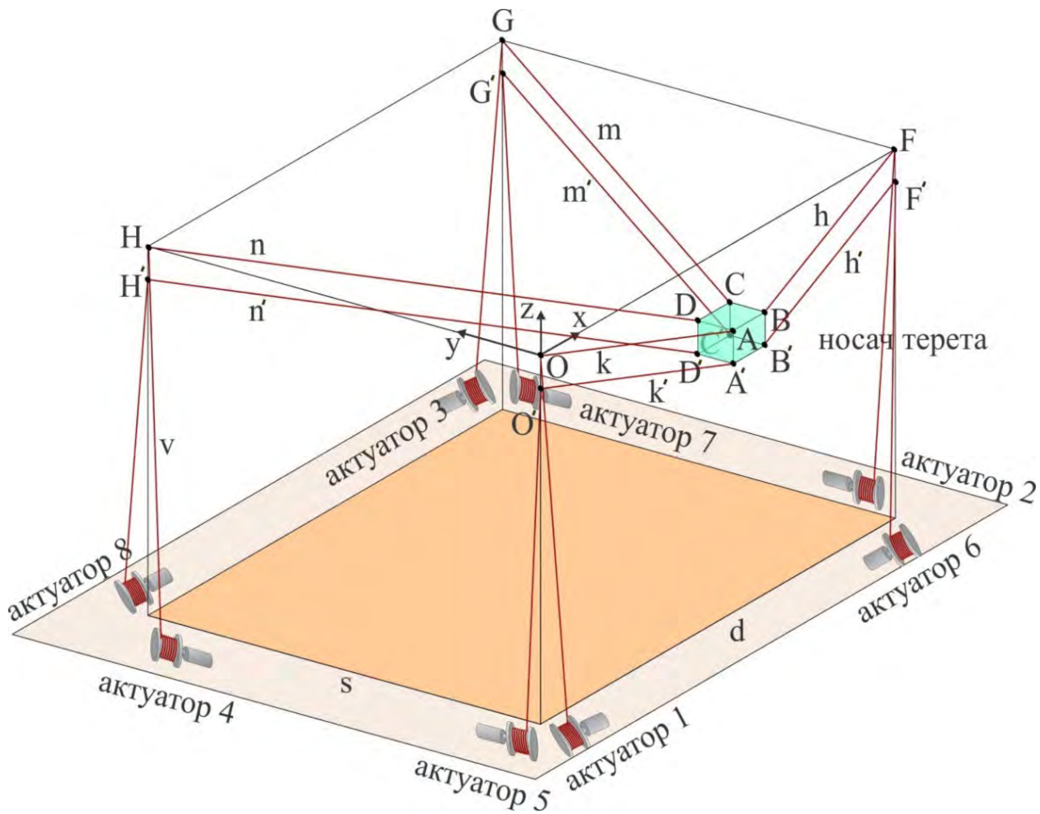






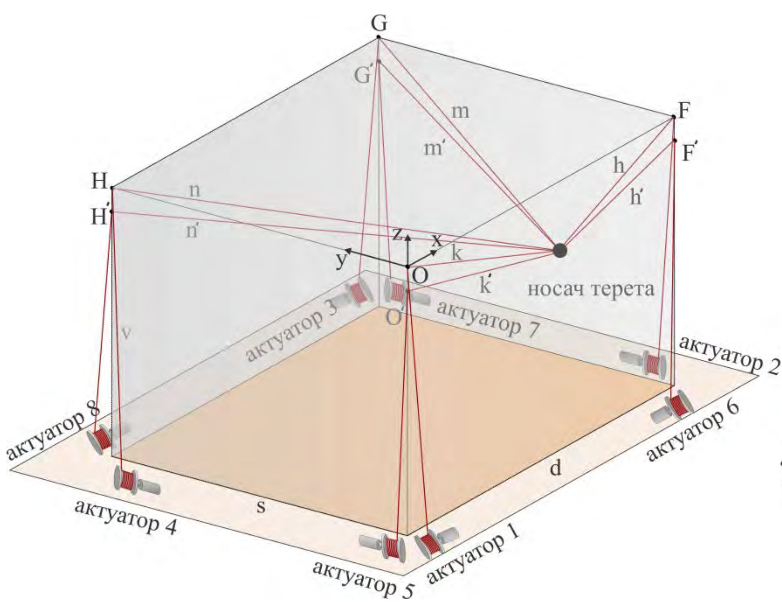
- Позиција I
- Позиција V

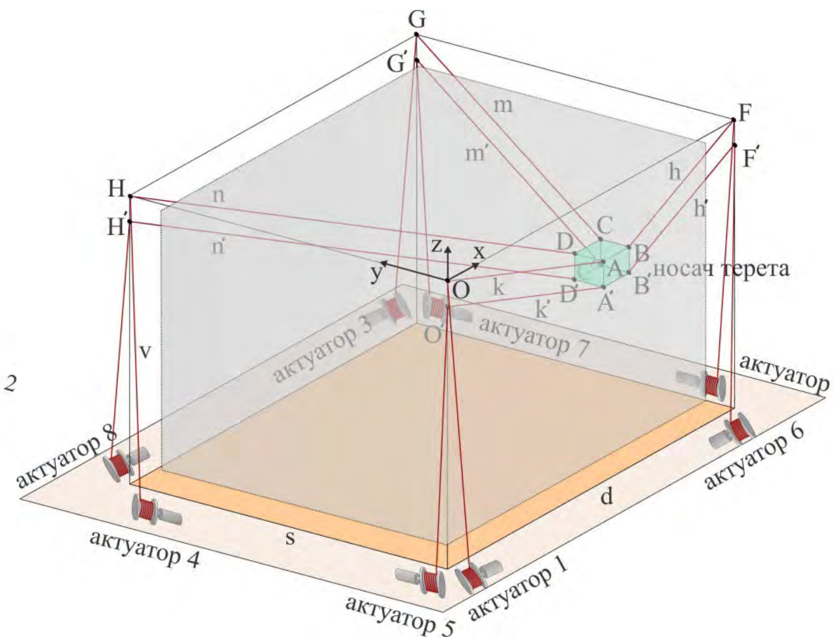
6. Анализа оријентације носача терета CPR система



- CPR-8 систем представља једно од могућих решења
- $\dot{\Phi} = J_{8\times 6} \cdot \dot{p}$, (6.27) је Кинематички модел CPR-8 система
- Сада је $p = [x\ y\ z\ \varphi\ \theta\ \psi]^T$
- $u = G_v \cdot \ddot{\Phi} + L_v \cdot \dot{\Phi} + S_v \cdot M$, (6.29) је Динамички модел CPR-8 система , где је $M = (J_{8\times 6}{}^T)^{\dagger} \cdot F_P$, (6.28)

7. Анализа радног простора и избор актуатора CPR система





- Теоријски и геометријски радни простори CPR-8 система

$$\dot{x} = \left\{-V_{cmax} \colon \frac{2V_{cmax}}{N} \colon +V_{cmax}\right\}, \text{(7.2)}$$

$$\dot{y} = \left\{-V_{cmax} \colon \frac{2V_{cmax}}{N} \colon +V_{cmax}\right\}, \text{(7.3)} \qquad v_c(k) \leq V_{cmax}. \text{(7.5)}$$

$$\dot{z} = \left\{-V_{cmax} \colon \frac{2V_{cmax}}{N} \colon +V_{cmax}\right\}, \text{(7.4)}$$

7. Анализа радног простора и избор актуатора CPR система

$\ddot{x} = \left\{\frac{-V_{cmax}}{t_{dec}}, \frac{+V_{cmax}}{t_{acc}}\right\}$, (7.6) $\ddot{y} = \left\{\frac{-V_{cmax}}{t_{dec}}, \frac{+V_{cmax}}{t_{acc}}\right\}$, (7.7)

$\ddot{z} = \left\{\frac{-V_{cmax}}{t_{dec}}, \frac{+V_{cmax}}{t_{acc}}\right\}$. (7.8)

$\left|\dot{\theta}_i(k)\right| \leq \frac{\omega_{mot}}{9.5493 \cdot N_{Vi}}$, (7.9)

$F(k) = [\, m \cdot \ddot{x}(k)\ m \cdot \ddot{y}(k)\ m \cdot (\ddot{z}(k) - g)\ 0\ 0\ 0]^T$, (7.10)

$|M_i(k)| \leq M_{mot} \cdot N_{mi}$. (7.11)

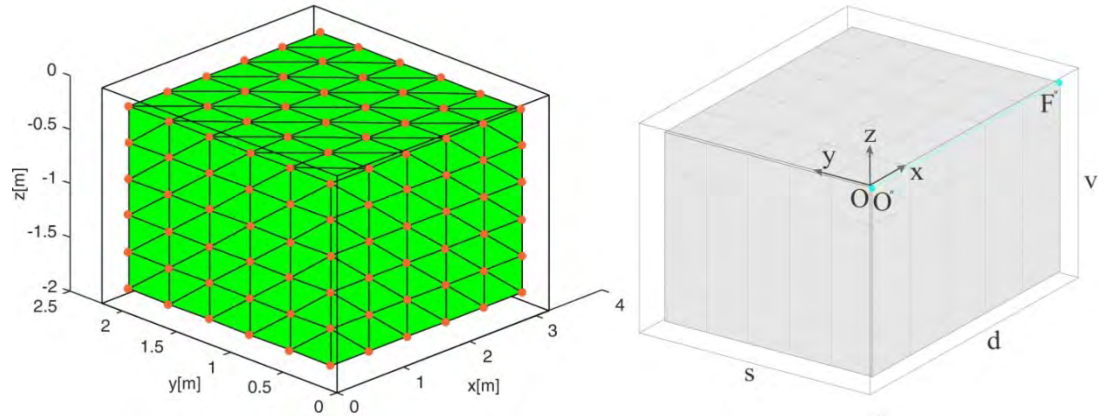
$\left|\ddot{\theta}_i\right| = \left\{\frac{-M_{mot} \cdot N_{mi}}{J_{ri}}, \frac{+M_{mot} \cdot N_{mi}}{J_{ri}}\right\}$, (7.12)

$|u_i(k)| \leq U_{mot}$. (7.13)

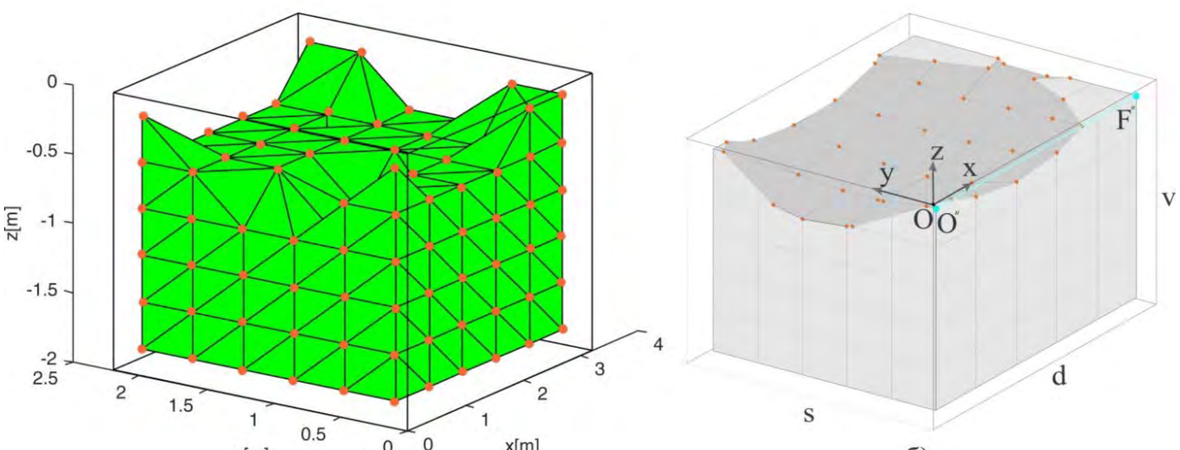
$G_{vi} = \frac{J_{ri} \cdot R_{ri}}{C_{Mi}}$, $L_{vi} = \frac{B_{Ci} \cdot R_{ri}}{C_{Mi}} + C_{Ei}$ и $S_{vi} = \frac{R_{ri}}{C_{Mi}}$. (7.1)

	Актуатор 1	Актуатор 2	Актуатор 3	Актуатор 4	Актуатор 5
Излазна снага $P_{mot}[W]$	300	100	50	20	10
Напон $U_{mot}[V]$	48	48	24	24	18
Брзина $\omega_{mot}[RPM]$	4700	3970	4500	5060	4777
Момент $M_{mot}[Nm]$	0.6	0.319	0.131	0.212	0.03
ЕМ константа $C_{ei}\left[\frac{V}{\frac{rad}{s}}\right]$	0.0945	0.1145	0.0356	0.0352	0.029
Константа момента $C_{mi}\left[\frac{Nm}{A}\right]$	0.095	0.114	0.0357	0.0352	0.0299
Коеф. вискозног трења $B_{ci}\left[\frac{Nm}{\left(\frac{rad}{s}\right)}\right]$	0	0	0	0	0
Отпорност ротора $R_{ri}[\Omega]$	0.369	1.1	0.567	3.99	3.01
Инерција актуатора $J_{Mi}[gcm^2]$	3579	1210	181	45.3	9.26
Преносни однос N_{Vi}	30	25	26	30	26
Коеф. ефикасности актуатора ξ_i	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
Полупречник чекрка $R_i[m]$	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

7. Анализа радног простора и избор актуатора CPR система

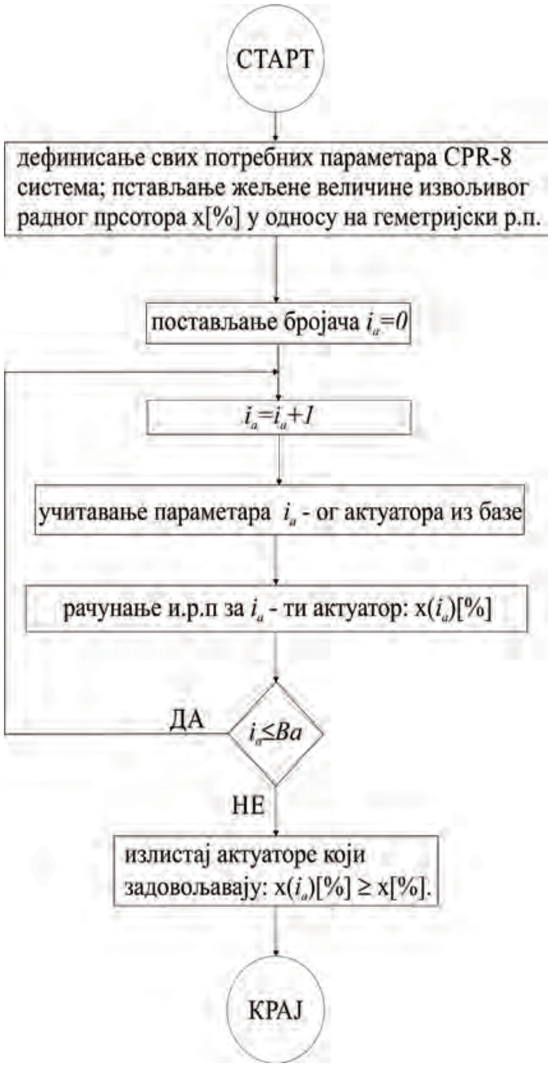


а) б)



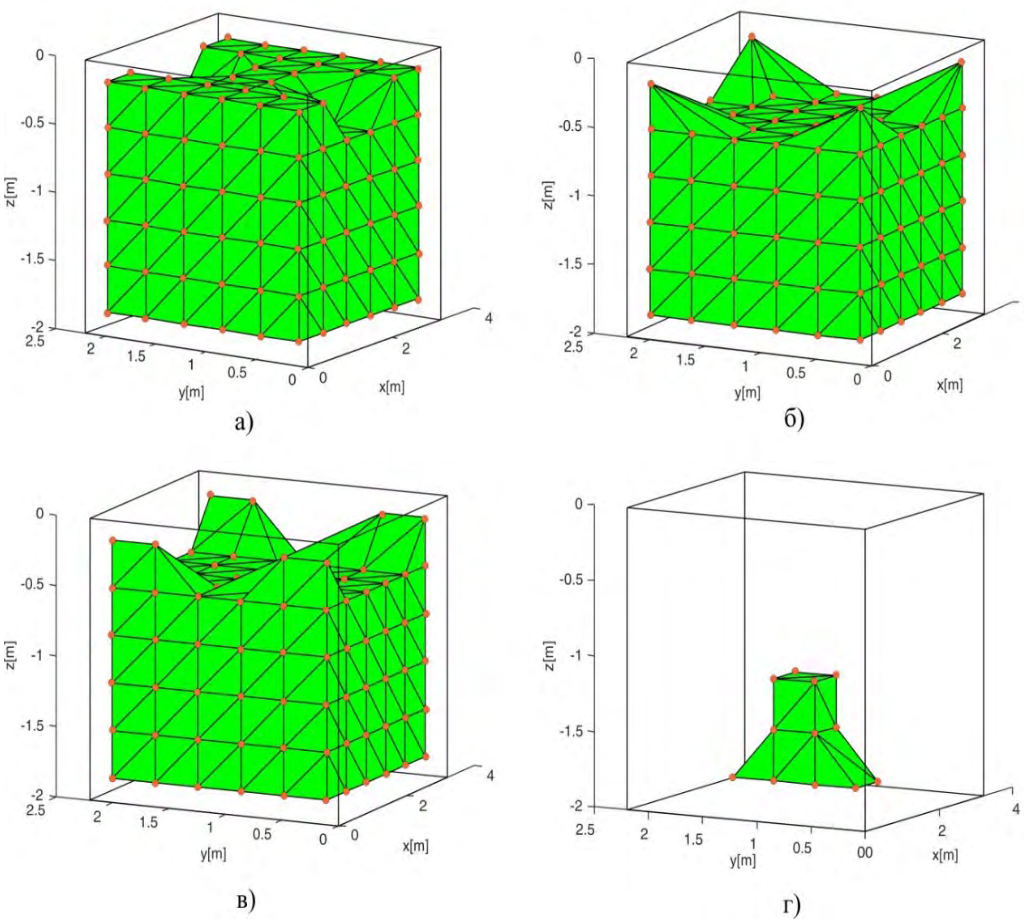
а) б)

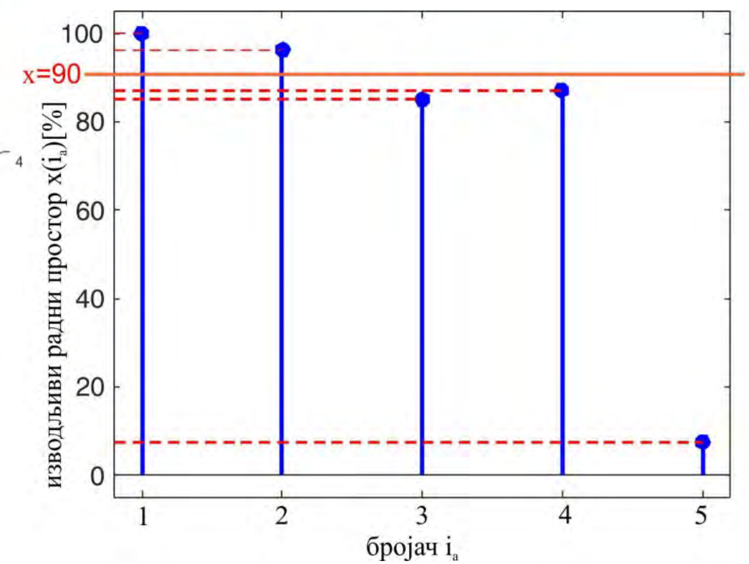
7. Анализа радног простора и избор актуатора CPR система



	Актуатор 1 $(i_a = 1)$	**Актуатор 2**$(i_a = 2)$	**Актуатор 3** $(i_a = 3)$	**Актуатор 4** $(i_a = 4)$	**Актуатор 5** $(i_a = 5)$
Изводљив и радни простор $x(i_a)[\%]$ **за** $\psi = 0, \theta = 0$ **и** $\varphi = 0$	100	96.3	85.19	87.04	7.41

7. Анализа радног простора и избор актуатора CPR система





8. Пројектовање управљачке структуре за CPR систем егзактном линеаризацијом

$u = G_v\ddot{\phi} + L_v\dot{\phi} + S_v(J^T)^{-1}F$, (8.1)
$\dot{\phi} = J\dot{p}, J = J(p)$, (8.2)
$F = m(\ddot{p} + a_{cc}) + P_p$. (8.3)

$u = G_v\ddot{\phi} + L_v\dot{\phi} + mS_v(J(p)^T)^{-1}\ddot{p} + S_v(J(p)^T)^{-1}\left(ma_{cc} + P_p\right)$, (8.4)

$\ddot{\phi} = \dot{J}(p)\dot{p} + J(p)\ddot{p}$, (8.5)
$\ddot{p} = J(p)^{-1}\left(\ddot{\phi} - \dot{J}(p)\dot{p}\right)$. (8.6)

$\dot{J}(p) = \frac{dJ(p)}{dt} = \frac{\partial J(p)}{\partial p} \cdot \begin{bmatrix} \dot{p} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{p} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{p} \end{bmatrix}$, (8.7)

$\ddot{p} = J(p)^{-1}\left(\ddot{\phi} - \frac{\partial J(p)}{\partial p} \cdot \begin{bmatrix} \dot{p} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{p} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{p} \end{bmatrix} \cdot \dot{p}\right)$. (8.8)

8. Пројектовање управљачке структуре за CPR систем егзактном линеаризацијом

$K(p) = \frac{\partial J(p)}{\partial p}$, (8.9)

$M(\dot{p}) = \begin{bmatrix} \dot{p} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{p} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{p} \end{bmatrix} \cdot \dot{p} = [(\dot{x})^2\ \dot{x}\dot{y}\ \dot{x}\dot{z}\ \dot{x}\dot{y}\ (\dot{y})^2\ \dot{y}\dot{z}\ \dot{x}\dot{z}\ \dot{y}\dot{z}\ (\dot{z})^2]^T$. (8.10)

$\ddot{p} = J(p)^{-1}\big(\ddot{\phi} - K(p)M(\dot{p})\big)$, (8.11)

$\ddot{p} = J(p)^{-1}\big(\ddot{\phi} - K(p)M(J(p)^{-1}\dot{\phi})\big)$. (8.13)

$u = (G_v + mS_v(J(p)^T)^{-1}J(p)^{-1})\ddot{\phi} + L_v\dot{\phi} - mS_v(J(p)^T)^{-1}J(p)^{-1}K(p)M\big(J(p)^{-1}\dot{\phi}\big)$
$+S_v(J(p)^T)^{-1}\big(ma_{cc} + P_p\big)$. (8.14)

$N(p) = (J(p)^T)^{-1}J(p)^{-1} = (J(p)J(p)^T)^{-1}$, (8.15)

$u = (G_v + mS_vN(p))\ddot{\phi} + L_v\dot{\phi} - mS_vN(p)K(p)M\big(J(p)^{-1}\dot{\phi}\big) + S_v(J(p)^T)^{-1}d, d = ma_{cc} + P_p$.
(8.16)

8. Пројектовање управљачке структуре за CPR систем егзактном линеаризацијом

$$x = [x_1\ x_2\ x_3]^T = \left[p\ \phi\ \dot{\phi}\right]^T = \left[\underbrace{x\ y\ z}_{x_1^T}\ \underbrace{\theta_1\ \theta_2\ \theta_3}_{x_2^T}\ \underbrace{\dot{\theta}_1\ \dot{\theta}_2\ \dot{\theta}_3}_{x_3^T}\right]^T. \quad (8.18)$$

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1)x_3$$
$$\dot{x}_2 = x_3 \quad (8.19)$$
$$\dot{x}_3 = f_{31}(x_1)x_3 + f_{32}(x_1, x_3) + g_3(x_1)u + \gamma_3(x_1)d,$$

где су изрази за означене векторске функције следећи:

$$g_3(x_1) = \left(G_v + mS_vN(x_1)\right)^{-1}$$
$$f_1(x_1) = J(x_1)^{-1}(x_1)$$
$$f_{31}(x_1) = -g_3(x_1)L_v \quad (8.20)$$
$$f_{32}(x_1, x_3) = g_3(x_1)mS_vN(x_1)K(x_1)M(J(x_1)^{-1}x_3)$$
$$\gamma_3(x_1) = -g_3(x_1)S_v(J(x_1)^T)^{-1}$$

Потпуни матрични запис једначина стања је:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + \gamma(x)d, \quad (8.21)$$

где су припадајуће компоненте:

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x_1)x_3 \\ x_3 \\ f_{31}(x_1)x_3 + f_{32}(x_1, x_3) \end{bmatrix}, g(x) = \begin{bmatrix} 0_{3\times1} \\ 0_{3\times1} \\ g_3(x_1) \end{bmatrix},\ \gamma(x) = \begin{bmatrix} 0_{3\times1} \\ 0_{3\times1} \\ \gamma_3(x_1) \end{bmatrix}. \quad (8.22)$$

8. Пројектовање управљачке структуре за CPR систем егзактном линеаризацијом

- Прва фаза – feedback линеаризација

$J(x_1)\ddot{p} = \ddot{\phi} - K(x_1)M(J(x_1)^{-1}x_3) = \ddot{\phi} - K(x_1)M(x_1, x_3)$. (8.23)

$J(x_1)\ddot{p} = g_3(x_1)[-L_v x_3 + mS_v N(x_1)K(x_1)M(x_1, x_3) + u] - K(x_1)M(x_1, x_3)$. (8.24)

$g_3(x_1)^{-1}J(x_1)\ddot{p} = -L_v x_3 + mS_v N(x_1)K(x_1)M(x_1, x_3) +$
$u - g_3(x_1)^{-1}K(x_1)M(x_1, x_3)$. (8.25)

$u = L_v x_3 - mS_v N(x_1)K(x_1)M(x_1, x_3) + g_3(x_1)^{-1}K(x_1)M(x_1, x_3) + g_3(x_1)^{-1}J(x_1)v = L_v x_3 +$
$G_v K(x_1)M(x_1, x_3) + \left(G_v + mS_v N(x_1)\right)J(x_1)v$, (8.26)

$\ddot{p} = v$, (8.27)

- врши се егзактна линеаризација RSCPR система од новоуведеног управљачког улаза *v* до излаза *y*=*p*.

8. Пројектовање управљачке структуре за CPR систем егзактном линеаризацијом

- Друга фаза – пројектовање контролера за канале – двоструке интеграторе

$\ddot{p}_j = v_j,\ j = 1,2,3.$ (8.28)

У простору грешке праћења референтне вредности дефинисаном као:

$er = [e_1\ e_2]^T = \left[p_j - p_{j\,ref}\ \ \dot{p}_j - \dot{p}_{j\,ref}\ \right]^T$, (8.29), једначина модела простора стања гласи:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= v_j - \ddot{p}_{j\,ref}\end{aligned}.\ (8.30)$$

Увођењем интеграла грешке праћења једначином:

$e_0 = \int_0^t e_1(\tau)d\tau$, (8.31)

добија се проширени вектор грешке:

$err = [e_0\ e_1\ e_2]^T$, (8.32)

за који је простор стања описан као:

$$\begin{aligned}\dot{e}_0 &= e_1 \\ \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= v_j - \ddot{p}_{j\,ref}\end{aligned}.\ (8.33)$$

$v = -K_i e_0 - K_p e_1 - K_d e_2 + \ddot{p}_{J\,ref}$, (8.34)

$f(s) = s^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i$, (8.35)

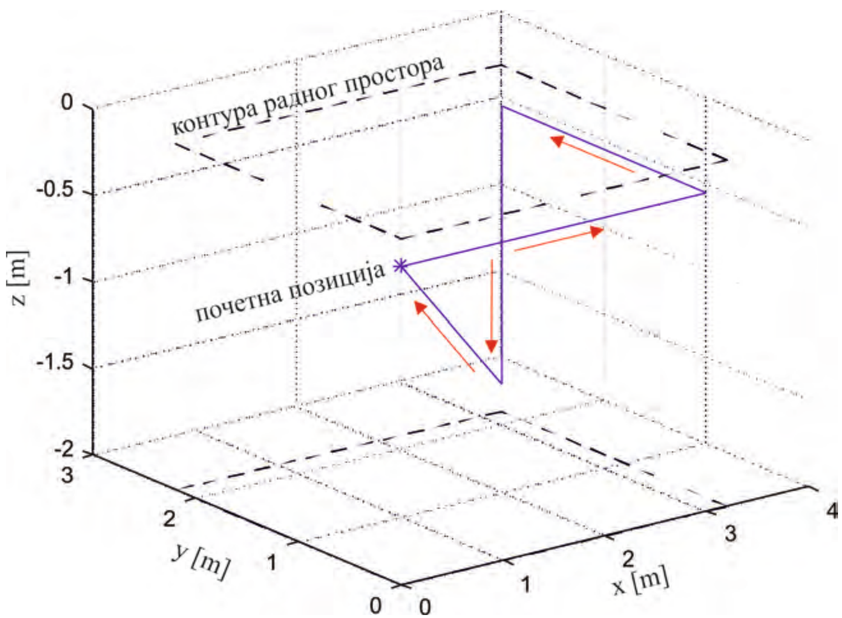
$f(s) = (s + 3\omega_0)^3$. (8.36)

8. Пројектовање управљачке структуре за CPR систем егзактном линеаризацијом

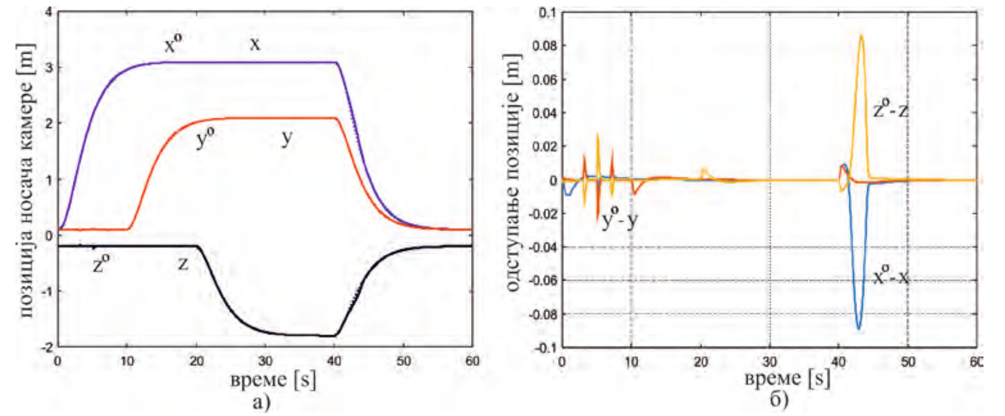
- Трећа фаза - имплементација

$K(x_1)M(x_1, x_3) \approx 0.$ (8.37) - Апроксимација.
Њеном заменом се добија:
$u = L_v x_3 + \big(G_v + mS_v N(x_1)\big)J(x_1)v.$ (8.38)
$v_j = K_{pj}\big(p_{j\,ref} - p_j\big) + K_{ij}\int_0^t \big(p_{j\,ref} - p_j\big)d\tau + K_{dj}\big(\dot{p}_{j\,ref} - \dot{p}_j\big) + \ddot{p}_{j\,ref}, j = 1{,}2{,}3.$ (8.39)
$v_j = K_{pj}\big(p_{j\,ref} - p_j\big) + \int_0^t \big[K_{ij}\big(p_{j\,ref} - p_j\big) + \omega_{aw}\big(v_{j\,sat} - v_j\big)\big]d\tau + K_{dj}\big(\dot{p}_{j\,ref} - \dot{p}_j\big) + \ddot{p}_{j\,ref}, j = 1{,}2{,}3,$ (8.40), где су $v_{j\,sat}$ компоненте вектора v_{sat} ограниченог управљања v, као последице засићења u_{sat} укупног вектора управљања u, а ω_{aw} представља пропусни опсег anti-windup деловања. У литератури се обично означава $\omega_{aw} = 1/T_t$, где T_t представља временску констатну праћења
Идејно, пошто feedback-линеаризациони закон управљања, врши трансформацију вектора v у вектор u, један могући начин реконструкције вектора v_{sat} је помоћу инверзне релације, на основу модела засићења. $v_{sat} = J(x_1)^{-1}\big(G_v + mS_v N(x_1)\big)^{-1}[sat(u) - L_v x_3 - G_v K(x_1)M(x_1, x_3)],$ (8.40)
односно, за примењени апроксимативни закон управљања се добија:
$v_{sat} = J(x_1)^{-1}\big(G_v + mS_v N(x_1)\big)^{-1}[sat(u) - L_v x_3].$ (8.41)

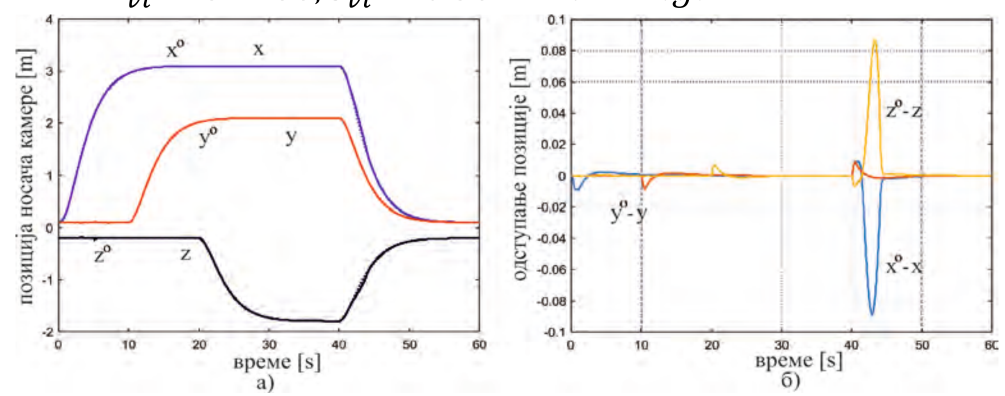
8. Пројектовање управљачке структуре за CPR систем егзактном линеаризацијом



- Референтна трајекторија

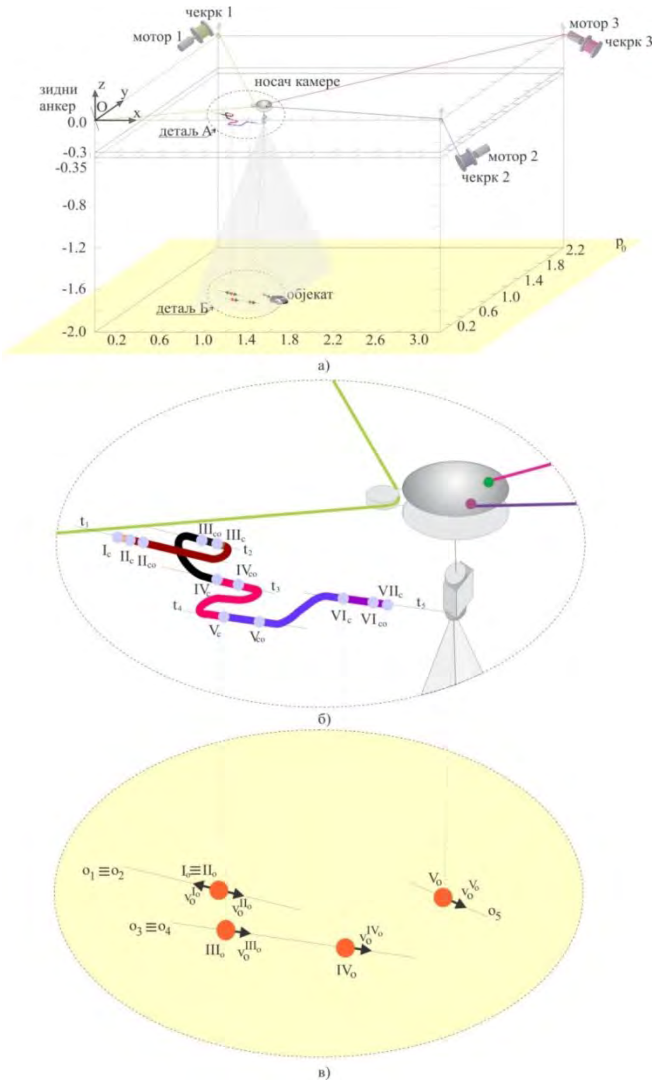


- Параметри: $R_i = 0.15m\ (i = 1,2,3)$, $G_{vi} = 0.1787$, $L_{vi} = 3.4186$, $S_{vi} = 0.364$ и $m = 1kg$.



- Параметри: $\hat{R}_i = 0.1 \cdot R_i = 0.015m\ (i = 1,2,3)$, $\hat{G}_{vi} = 4.5 \cdot G_{vi} = 0.804$, $\hat{L}_{vi} = 5.5 \cdot L_{vi} = 18.8021$ и $\widehat{m} = 2.5 \cdot m = 2.5kg$

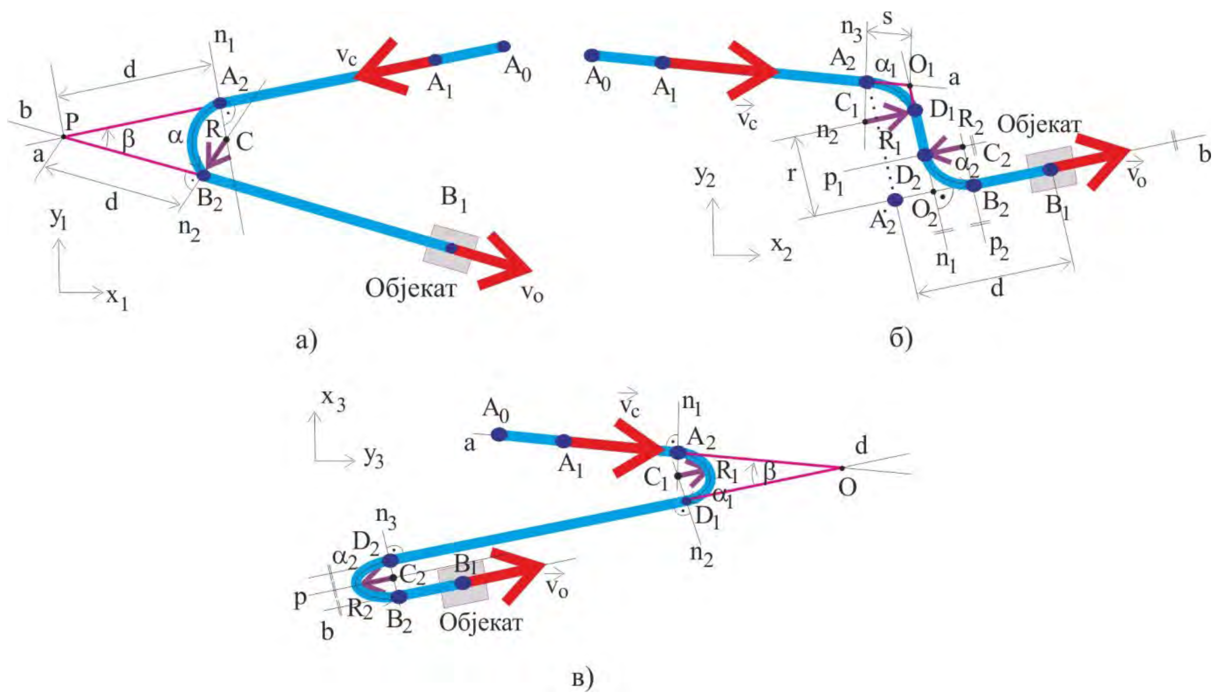
9. Алгоритам за генерисање трајекторија за CPR систем са камером



- Овај алгоритам је детаљно описан у:

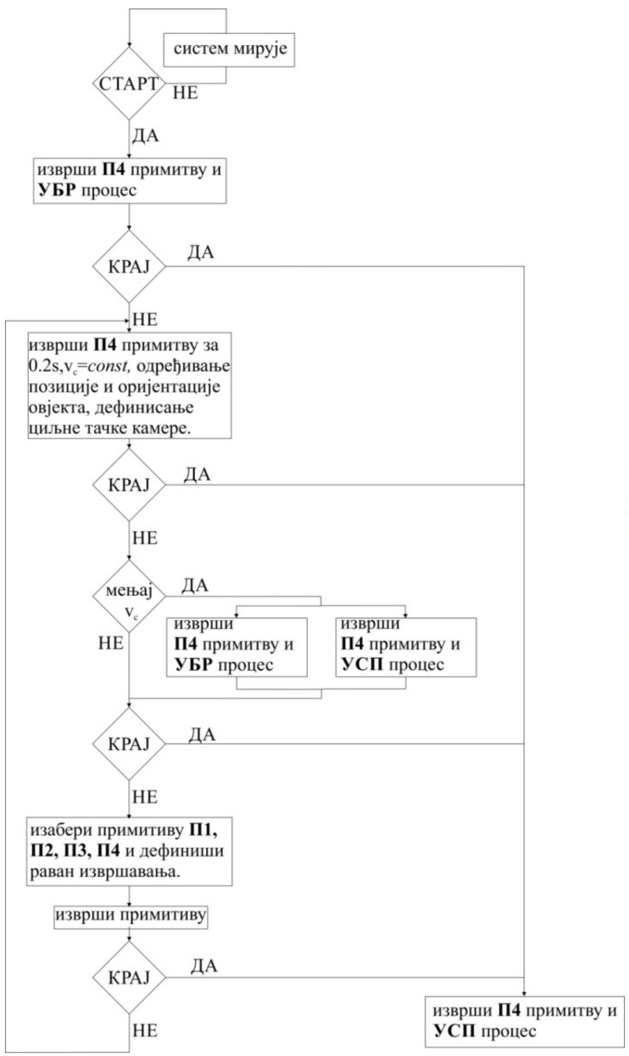
Kevac, L., Filipovic, M., Rakic, A: The trajectory generation algorithm for the cable-suspended parallel robot—The CPR Trajectory Solver, ROBOT AUTON SYST 94C, 25-33, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2017.04.018, (2017).

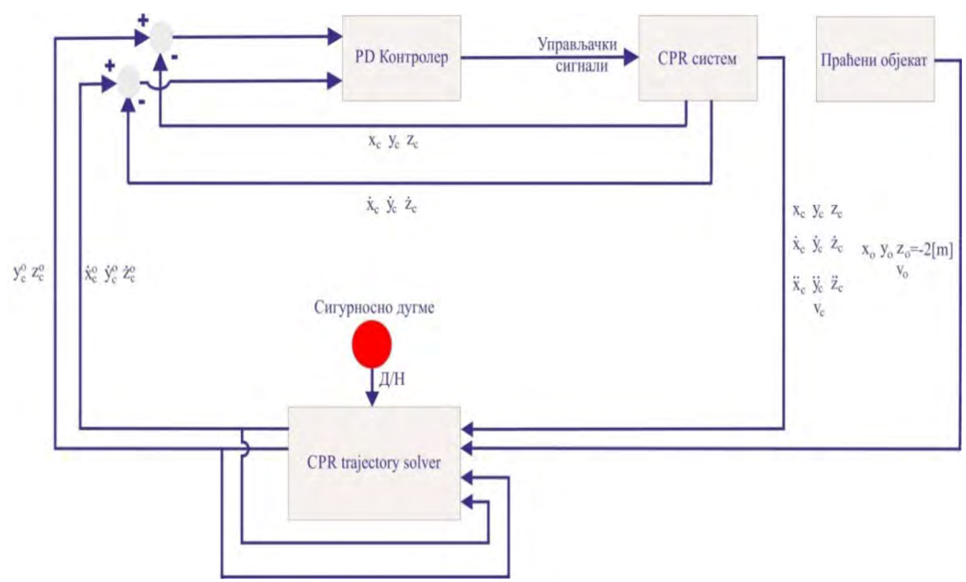
9. Алгоритам за генерисање трајекторија за CPR систем са камером



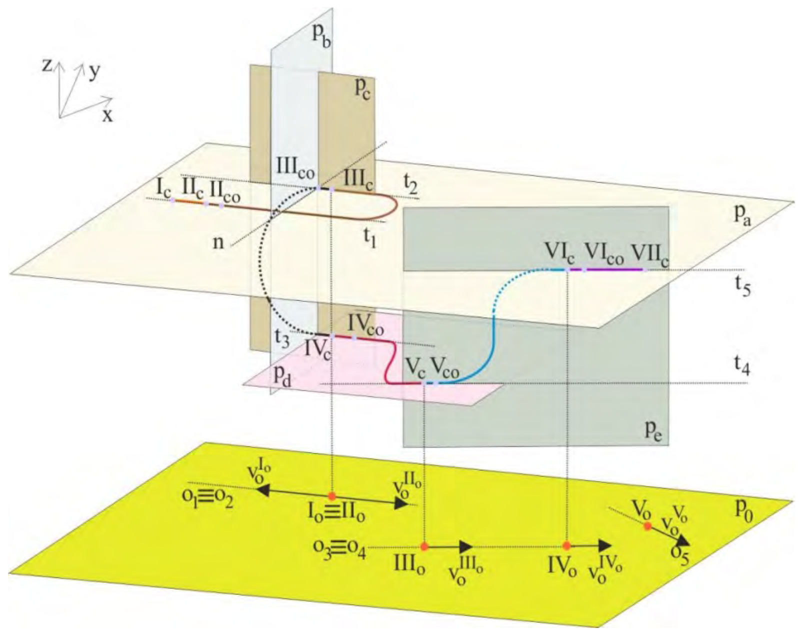
- Алгоритам користи примитиве да би глатко спајао референтне трајекторије

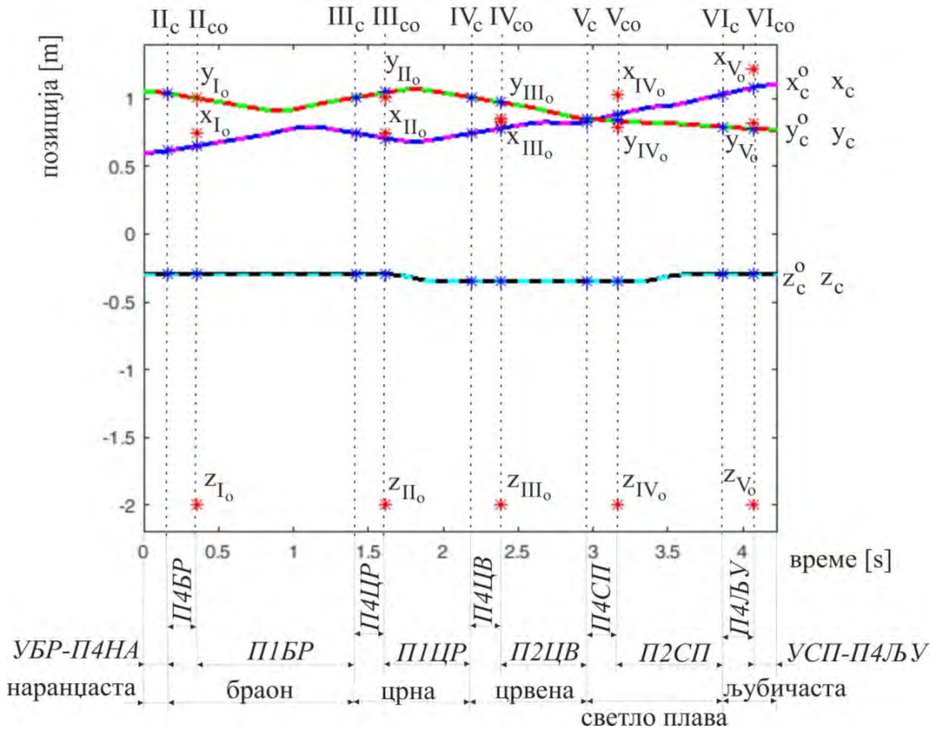
9. Алгоритам за генерисање трајекторија за CPR систем са камером





9. Алгоритам за генерисање трајекторија за CPR систем са камером





10. Закључак

- На основу уочених особина CPR система из доступне литературе, аутор ове дисертације је закључио да је ова област мултидисциплинарна
- Дефинисан је низ нових конфигурација које су приказане кроз другу Главу ове дисертације
- У дисертацији је реферисано и неколико конфигурација CPR система које користе ужад са особинама еластичности
- Након дефинисања нових конфигурација CPR система, у трећој Глави је приказан поступак креирања математичког модела CPR система. Дефинисани су кинематички и динамички модели две различите конфигурације CPR система: RSCPR и CPR-A система
- CPR системи дефинисани у Главама 2 и 3 су реализовани тако да користе подсистеме за намотавање/одмотавање ужади са непроменљивим полупречником намотавања
- У Глави 4 је приказан рад подсистема који користи стандардни облик чекрка за једноредо вишеслојно радијално намотавање/одмотавање ужета и његов утицај на рад одабране конфигурације CPR система, RSCPR систем
- У Глави 5 је детаљно представљен и моделован нови облик чекрка за глатко једноредо вишеслојно радијално намотавање/одмотавање ужета
- CPR системи анализирани у Главама 2-5 су реализовани тако да је могуће управљати само позицијом носача терета у Декартовом координатном систему радног простора. Ипак, у многим ситуацијама није довољно управљати само позицијом носача у простору и због тога је у Глави 6 анализирана потреба за контролом оријентације носача терета CPR система

10. Закључак

- У Глави 7 ове докторске дисертације је дефинисана нова процедура за анализу радног простора носача терета CPR система
- Дефинисана је нова методологија која дизајнеру и конструктору омогућава избор одговарајућег актуатора за одабрани CPR систем
- У овој дисертацији је дефинисана нова управљачка структура егзактном линеаризацијом од улаза до спољашњих координата за RSCPR систем
- Новонастала управљачка структура зависи од параметара система јер делимично укључује његов математички модел
- У Глави 9 ове дисертације је приказан нови алгоритам за генерисање глатке референтне трајекторије камере CPR система која има задатак да прати покретни објекат у реалном времену. Овај алгоритам се зове CPR Trajectory Solver
- Анализа овог алгоритма на различитим системима и његово унапређење је један од задатака за будуће истраживање аутора ове дисертације
- Сви теоријски доприноси као и динамика одзива система су потврђени кроз нове генерисане програмске пакете кроз симулационе резултате
- Током истраживања на овој докторској дисеретацији аутор је објавио 22 коауторска рада из области CPR система од којих су 5 публиковани у часописима са SCI листе