

Metodika parametrického modelovania otvoreného mechanizmu robota

ANDREJ ČERVEŇAN^{1*}, FRANTIŠEK PALČÁK²

Parametric modelling methodology of open mechanism for a robot

Parametrization of virtual model is an effective way how to shorten its development time. In this paper the robotic arm is represented by open kinematic chain consisting of rigid or flexible parts connected by geometrical joints. The parametric modelling methodology for the robotic arm is based on local reference frame variable coordinates considering initial and desired configuration of a model. A set of rules was prepared for development of initial model. Required configuration of the robotic arm is achieved by the change of variable parameters representing the local reference frame coordinates of each part. The calculation of suitable values for coordinates is realized using special algorithm for inverse transformation.

Key words: parametric modelling, open mechanism

1. Úvod

V súčasnosti používané CAE programové systémy predstavujú veľmi efektívny nástroj nielen pre návrh samotného výrobku, ale stále viac sa uplatňujú aj pri projektovaní výrobných pracovísk a liniek či pri optimalizácii spôsobu výroby. Vysoké nasadzovanie priemyselných robotov, ako jedného z prostriedkov čiastočnej, resp. úplnej automatizácie výroby, prináša so sebou v etape návrhu pracoviska či linky potrebu riešiť rôzne úlohy, ako napr. overenie dostupnosti periférnych zariadení, kontrolu bezkolíznosti plánovaných dráh efektora, verifikáciu riadiaceho programu a pod. Mnohí výrobcovia robotov ponúkajú špeciálne „robotické“ CAD systémy [1,

¹ Ústav výrobných systémov, environmentálnej techniky a manažérstva kvality, Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava, Slovenská republika

² Ústav aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava, Slovenská republika

* Kontaktný autor, e-mail: andrej.cervenjan@stuba.sk

2], ktoré umožňujú riešiť tieto úlohy. Ich spoločným znakom je však to, že sú zamerané len na programovanie technologickej operácie pre daný typ priemyselného robota. Väčšinou neumožňujú uskutočniť analýzy s cieľom optimalizovať parametre mechanického a riadiaceho systému. Napríklad pomocou nich sa nedá určiť, aký je priebeh zrýchlenia či rýchlosti koncového efektora počas manipulačného cyklu, aké je silové pôsobenie medzi technologicou hlavicou a obrobkom a pod. Tieto údaje, potrebné pre optimálny výber, resp. návrh koncového efektora robota, však možno určiť pomocou „univerzálnych“ CAE programových systémov. Kým parametrizácia modelu v prostredí CAD je vhodná na aktualizáciu konštrukčných rozmerov, parametrizácia virtuálneho modelu v prostredí programu na dynamické simulácie umožňuje využiť najnovšie matematické metódy na optimalizáciu a pritom brať do úvahy aj náhodné zmeny vnútorných vlastností či vonkajšieho zaťaženia na stanovenie vyžadovaného stupňa robustnosti, teda odolnosti proti týmto zmenám na zachovanie spoľahlivej prevádzkovej funkčnosti.

Programový systém ADAMS [3] predstavuje CAE nástroj určený na analýzu virtuálnych mechanických a mechatronických systémov so zameraním na multidisciplinárny prístup pri vývoji výrobku z pohľadu konfigurácie štruktúry, dynamiky, pružnosti aj riadenia. Jeho možnosti uplatnenia pri návrhu robotizovaného pracoviska sú široké, lebo okrem už spomínaných úloh súvisiacich s pohybom efektora umožňuje aj riešenie inverznej kinematickej a dynamickej úlohy. Čiže na základe namodelovaného požadovaného pohybu efektora, napr. pri oblúkovom zváraní, sa pomocou programu dá určiť potrebný priebeh zmeny polohy, rýchlosti a zrýchlenia členov v jednotlivých väzbách. Riešením inverznej dynamickej úlohy sa získa potrebný priebeh hnacieho momentu v pohonoch robota na realizáciu predpísaného priebehu pohybu pracovnej hlavice, na základe čoho je možné rozhodnúť o aplikovateľnosti zvoleného robota, o umiestnení prípravku so zváranou súčiastkou a pod.

Pri návrhu robotizovaného pracoviska sa na základe rôznych kritérií porovnávajú alternatívne dispozičné riešenia. Ak sa problém návrhu zúži len na hľadanie optimálneho usporiadania pre vopred zvolený robot, tak hlavné odlišnosti pracovných cyklov prislúchajúcich jednotlivým alternatívam budú najmä v dĺžke trvania a v postupnosti jednotlivých pohybov. Na vykonanie simulačnej analýzy je potrebné vytvoriť niekoľko modelov robota, vo všeobecnosti pre každú alternatívu iný, ktoré sa budú vzájomne líšiť najmä:

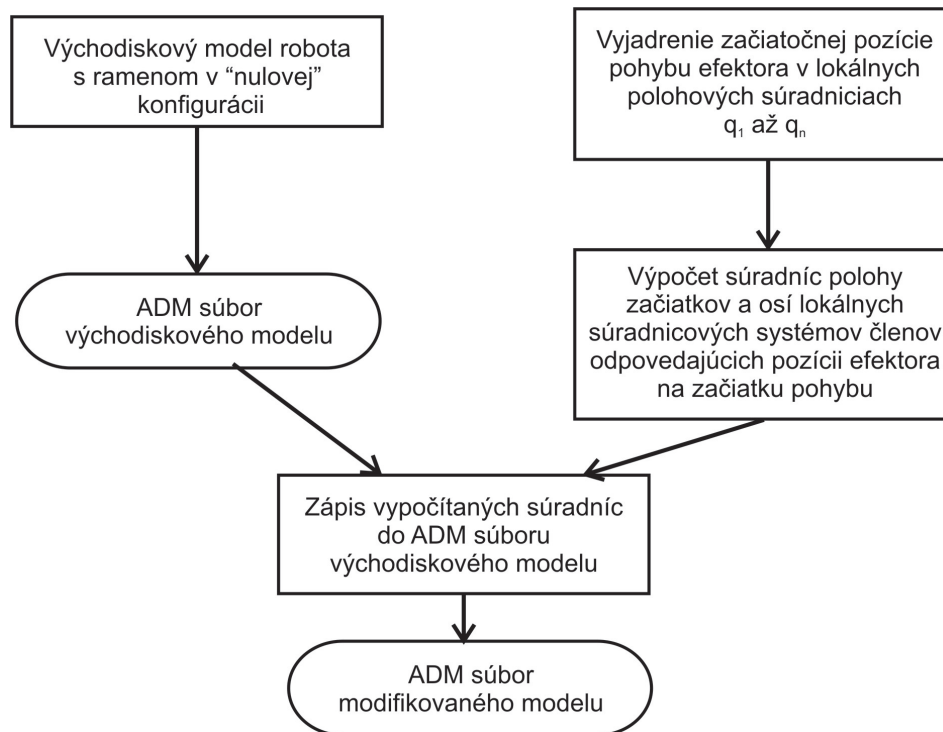
- konfiguráciou ramena zodpovedajúcou pozícií efektora na začiatku pracovného cyklu,
- postupnosťou pohybov efektora (začiatočná a koncová pozícia, dĺžka, priebeh rýchlosti a pod.).

Proces utvárania týchto modelov možno výrazným spôsobom zjednodušiť a urýchliť parametrizáciou, keďže konfigurácie ramien zodpovedajúce rôznym pozíciám efektora na začiatku pracovného cyklu sa líšia iba vzájomnou polohou členov ramena. Podobne aj pohybové možnosti robota zodpovedajú príkazom riadiaceho

systému, čiže pre každý typ pohybu treba utvoriť zodpovedajúci parametrický model, kde parametre predstavujú vstupné údaje zadávané operátorom robota.

2. Princíp parametrizácie virtuálneho modelu v programe ADAMS

Návrh metodiky parametrizácie modelovania ramena robota vychádza zo štruktúry modelu v programe ADAMS. Mechanizmus ramena robota s koncovým efektorm je reprezentovaný sústavou tuhých, resp. pružných členov, pospájaných rotačnými alebo translačnými geometrickými väzbami, ktorým sa priradia kinematické parametre predpísaného pohybu. Každý člen je reprezentovaný lokálnym súradnicovým systémom (LCS), ktorý slúži na určenie polohy člena, t. j. polohy začiatku LCS a polohy osí LCS (tzv. orientácie) voči vzťažnému (globálnemu) súradnicovému systému na ráme. Model člena je vytvorený pomocou tzv. markerov – pomocných súradnicových systémov, ktoré slúžia na definíciu dôležitých bodov člena, napr. ťažiska, miesta spojenia s iným členom, bodov potrebných na vytvorenie jeho grafickej prezentácie a pod. Poloha markerov je implicitne stanovená voči LCS člena, ktorému sú priradené. Pri zmene polohy lokálneho súradnicového systému člena



Obr. 1. Schematické znázornenie postupu parametrického modelovania ramena robota.

Fig. 1. Schematic flowchart of parametric modelling of robot arm.

voči globálnemu súradnicovému systému automaticky dôjde aj k zodpovedajúcej zmene polohy všetkých markerov patriacich tomuto členu tak, aby ich pôvodná poloha v lokálnom súradnicovom systéme člena ostala nezmenená.

Zmena pozície efektora sa pri reálnom robote dosahuje riadenou zmenou vzájomnej polohy členov, ktoré sa voči sebe podľa typu väzby natáčajú alebo posúvajú. Vzhľadom na štruktúru a vzájomnú prepojenosť modelovacích prvkov v programe ADAMS možno v etape tvorby či modifikácie modelu docieľiť rýchlu zmenu polohy jednotlivých členov zmenou, teda prepísaním súradníc polohy začiatku a polohy osí lokálnych súradnicových systémov týchto členov. Súradnice polohy lokálnych súradnicových členov sa považujú za parametre, ktorých zmenou možno modifikovať model robota tak, aby sa dosiahla konfigurácia ramena s požadovanou polohou koncového efektora.

Celý postup parametrického modelovania ramena robota možno zhrnúť do nasledujúcich štyroch bodov [4]:

1. Vytvorenie východiskového modelu robota.
2. Výpočet lokálnych polohových súradníc q_1, \dots, q_n zodpovedajúcich predpísanej polohe koncového efektora na začiatku prvého pohybu v pracovnom cykle.
3. Výpočet nových súradníc polohy lokálnych súradnicových systémov členov.
4. Zápis nových súradníc polohy do ADM súboru východiskového modelu robota.

Schematicky je postup znázornený na obr. 1.

3. Východiskový model robota

Možno povedať, že každý robot má v riadiacom systéme definovanú „nulovú“ konfiguráciu ramena. V tejto polohe riadiaci systém interpretuje hodnotu natočenia, resp. posunutia členov v jednotlivých väzbách ako nulovú a vyznačuje sa tým, že jednotlivé články ramena majú zvislú alebo vodorovnú polohu, resp. sú vzájomne na seba kolmé. V technickej dokumentácii je vždy uvedený obrázok robota s ramenom v tejto konfigurácii, kde sú väčšinou zakótované základné rozmery jednotlivých článkov a súčasne znázornený aj pracovný priestor. Táto „nulová“ konfigurácia ramena je výhodná nielen na odvodenie vzťahov pre transformáciu súradníc na báze Denavitových-Hartenbergových transformačných matíc, ale aj na utvorenie východiskového modelu robota.

Pri vytváraní východiskového modelu robota treba dodržiavať nasledujúce zásady:

1. Model ramena utvárať z čo najmenšieho počtu členov.
2. Konfiguráciu ramena robota voliť takú, aby jeho pôdorysný priemet bol rovnobežný s osou x globálneho súradnicového systému a jednotlivé členy ramena boli vo vodorovnej alebo zvislej polohe, resp. boli navzájom kolmé.
3. Globálny súradnicový systém umiestniť tak, aby jeho os z bola osou rotácie, resp. translácie člena v prvej geometrickej väzbe; jeho začiatok však nemusí byť umiestnený v tejto väzbe.

4. Lokálne súradnicové systémy členov umiestňovať do jednotlivých väzieb tak, aby lokálny súradnicový systém i -tého člena bol umiestnený v $i - 1$ väzbe. Pri číslovaní členov a väzieb treba postupovať od základu (rámu) po efektor, pričom základu sa priradí $i = 1$ (v zhode s implicitným číslovaním používaným v programe ADAMS). Napríklad lokálny súradnicový systém 2. člena je umiestnený v 1. väzbe spájajúcej základ stroja ($i = 1$) a člen 2.

5. Polohu osí lokálnych súradnicových systémov voliť tak, aby boli rovnobežné s osami globálneho súradnicového systému.

6. Marker definujúci TCP (Tool Center Point – bod na konci ramena robota, slúžiaci ako programový referenčný bod pre koncový efektor) má osi rovnobežné s osami globálneho súradnicového systému.

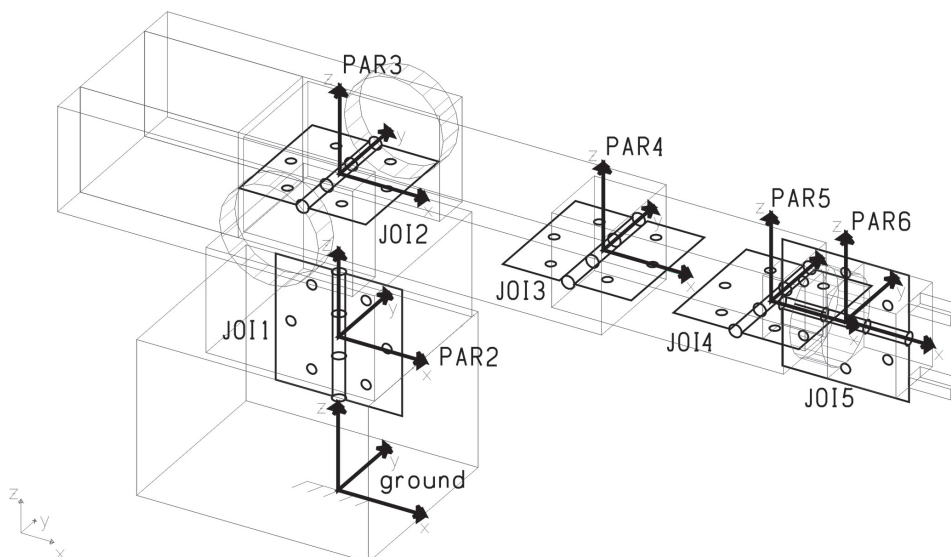
7. Bez ohľadu na skutočnú vzájomnú polohu dvoch na seba nadväzujúcich členov má uhol natočenia člena v rotačnej väzbe alebo posunutie člena v translačnej väzbe nulovú hodnotu, t.j. markery definujúce túto väzbu majú zhodnú polohu. Poloha týchto markerov musí byť zhodná s polohou lokálneho súradnicového člena umiestneného v tejto väzbe.

Na obr. 2 je znázornený robot Mitsubishi RV-M1. Ide o robot s 5 stupňami voľnosti na polohovanie súčiastky v angulárnom pracovnom priestore. Model sa skladá zo 6 členov: rám (ground), rotačná jednotka základu (PAR 2), spodné rameno (PAR 3), horné rameno (PAR 4), zápästie (PAR 5) a koncový efektor (PAR 6). Topológia štruktúry modelu je uvedená v tab. 1. Obrázok 3 znázorňuje východiskový model tohto robota s ramenom v „nulovej“ konfigurácii, ktorá je v globálnom súradnicovom systéme vyjadrená súradnicami TCP efektora: $x_e = 0,587$ m, $y_e = 0,0$ m, $z_e = 0,3$ m, $\varphi_z = 0,0^\circ$ (uhol klopenia, *roll*), $\varphi_y = 0,0^\circ$ (uhol klonenia, *pitch*), $\varphi_x = 0,0^\circ$ (uhol natáčania, *yaw*) [5]. Jednotlivé členy modelu sú graficky prezentované ikonami súradnicových trojhranov. Poloha začiatkov (vyjadrená v kartézskych súradniciach) a poloha osí (vyjadrená pomocou Eulerových uhlov) lokálnych súradnicových systémov členov určená vzhľadom na globálny súradnicový systém modelu priradený rámu je uvedená v tab. 2. Jednotlivé väzby sú znázornené ikonami pántov s označením JOI1 až JOI6. Všetky údaje o modeli možno



Obr. 2. Robot Mitsubishi RV-M1.

Fig. 2. Robot Mitsubishi RV-M1.



Obr. 3. Grafické znázornenie východiskového modelu robota s „nulovou“ konfiguráciou ramena.

Fig. 3. Graphical layout of initial model of robot with "zero" configuration of its arm.

z programu ADAMS získať aj vo forme ADM súboru, kde sú uvedené v textovej forme.

Tabuľka 1. Topológia štruktúry modelu robota Mitsubishi RV-M1
Table 1. Structure topology of the model of robot Mitsubishi RV-M1

Modelovací prvok	Typ prvku	Vysvetlenie
Ground	Part	člen – rám
BOX1	Graphics	objekt tvoriaci grafickú prezentáciu člena
MAR1, MAR2, MAR3	Marker	markery priradené člena
PAR2	Part	člen – rotačná jednotka základu
BOX2, BOX3, BOX4, BOX5, CYL6, CYL7	Graphics	objekty tvoriace grafickú prezentáciu člena
MAR4, MAR5, MAR6, MAR7, MAR8, MAR9, MAR10, MAR11	Marker	markery priradené člena
PAR3	Part	člen – spodné rameno
BOX6	Graphics	objekt tvoriaci grafickú prezentáciu člena
MAR12, MAR13, MAR14	Marker	markery priradené člena
PAR4	Part	člen – horné rameno
BOX9	Graphics	objekt tvoriaci grafickú prezentáciu člena
MAR15, MAR16, MAR17	Marker	markery priradené člena

Modelovací prvok	Typ prvku	Vysvetlenie
PAR5	Part	člen – zápästie
BOX14, CYL10	Graphics	objekty tvoriace grafickú prezentáciu člena
MAR18, MAR19, MAR25	Marker	markery priradené členu
PAR6	Part	člen – koncový efektor
BOX11, BOX12, BOX13	Graphics	objekty tvoriace grafickú prezentáciu člena
MAR20, MAR21, MAR22, MAR23, MAR24	Marker	markery priradené členu
JOI1 – Revolute I marker: MAR4 J marker: MAR2	Joint	– rotačná väzba spájajúca členy PAR2 a ground pomocou markerov 4 a 2
JOI2 – Revolute I marker: MAR12 J marker: MAR5	Joint	– rotačná väzba spájajúca členy PAR3 a PAR2 pomocou markerov 12 a 5
JOI3 – Revolute I marker: MAR15 J marker: MAR13	Joint	– rotačná väzba spájajúca členy PAR4 a PAR3 pomocou markerov 15 a 13
JOI4 – Revolute I marker: MAR18 J marker: MAR16	Joint	– rotačná väzba spájajúca členy PAR5 a PAR4 pomocou markerov 18 a 16
JOI5 – Revolute I marker: MAR20 J marker: MAR19	Joint	– rotačná väzba spájajúca členy PAR6 a PAR5 pomocou markerov 20 a 19

Tabuľka 2. Poloha začiatkov a osí lokálnych súradnicových systémov (LCS) jednotlivých členov vyjadrená v globálnom súradnicovom systéme použitá pri východiskovom modeli robota s „nulovou“ konfiguráciou ramena

Table 2. Position of local coordinate systems (LCS) of separate parts expressed in the global coordinate system, used for the initial model of robot with the „zero“ arm configuration

Súradnica	Jednotka	Lokálny súradnicový systém člena					
		1	2	3	4	5	6
x	m	0	0	0	0,25	0,41	0,48
y	m	0	0	0	0	0	0
z	m	0	0,148	0,3	0,3	0,3	0,3
φ_1	°	0	0	0	0	0	0
φ_2	°	0	0	0	0	0	0
φ_3	°	0	0	0	0	0	0

4. Výpočet lokálnych polohových súradníc q_1, \dots, q_n zodpovedajúcich pozícii koncového efektora na začiatku pohybu

Pozícia efektora prislúchajúca konfigurácii ramena na začiatku pracovného cyklu sa vo všeobecnosti líši od „nulovej“ konfigurácie. Z pohľadu používateľa robota je táto pozícia efektora vyjadrená v globálnom súradnicovom systéme súradnicami $x_e, y_e, z_e, \varphi_z, \varphi_y, \varphi_x$, ktoré však treba pomocou vzťahov pre inverznú transformáciu prepočítať na lokálne polohové súradnice q_1 až q_n , udávajúce natočenie, resp. posunutie v jednotlivých väzbách. Na základe týchto hodnôt sa v ďalšom kroku vypočítajú súradnice novej polohy lokálnych súradnicových systémov jednotlivých členov.

5. Výpočet nových súradníc polohy lokálnych súradnicových systémov členov

Polohu lokálneho súradnicového systému i -tého člena možno v globálnom súradnicovom systéme priradenom nepohyblivému rámu vyjadriť buď pomocou súradníc $[x_i, y_i, z_i, \varphi_{i,1}, \varphi_{i,2}, \varphi_{i,3}]$, alebo pomocou homogénnej matice

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} a_{i,1,1} & a_{i,1,2} & a_{i,1,3} & x_i \\ a_{i,2,1} & a_{i,2,2} & a_{i,2,3} & y_i \\ a_{i,3,1} & a_{i,3,2} & a_{i,3,3} & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

kde prvky $\varphi_{i,1}, \varphi_{i,2}, \varphi_{i,3}$ (Eulerove uhly), resp. $a_{i,1,1}, \dots, a_{i,3,3}$ udávajú polohu osí a prvky x_i, y_i, z_i udávajú polohu začiatku LCS [5, 6]. Na základe hodnôt lokálnych polohových súradníc q_1, \dots, q_n , určujúcich veľkosť natočenia alebo posunutia v jednotlivých väzbách, ktoré zodpovedajú pozícii efektora na začiatku pohybu, možno polohu lokálneho súradnicového systému i -tého člena v maticovom tvare vyjadriť vzťahom

$$\mathbf{P}_i = \prod_{i=2}^n \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i - x_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & y_i - y_{i-1} \\ 0 & 0 & 1 & z_i - z_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_{PZ}(q_{i-1}) \right),$$

kde x_i, y_i, z_i , resp. $x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}$ sú súradnice polohy začiatku lokálneho súradnicového systému i -tého, resp. $i-1$ člena platné pre východiskový model vyjadrené v globálnom súradnicovom systéme, pričom poloha člena 1 (rámu) je definovaná $x_1 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0$, $\mathbf{M}_{PZ}(q_{i-1})$ je matica základného pohybu v $i-1$ väzbe zodpovedajúca zmene $i-1$ lokálnej polohovej súradnice voči jej hodnote pri „nulovej“ konfigurácii ramena.

Matica základného pohybu zodpovedajúca posuvnej väzbe s možnosťou posunutia v smere osi x globálneho súradnicového systému o hodnotu q má tvar:

$$\mathbf{M}_{PZ}(q) = \text{Trans}(x, q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Analogicky je definovaná matica základného pohybu zodpovedajúca posuvnej väzbe umožňujúcej posunutie q v smere osi y , resp. z globálneho súradnicového systému:

$$\mathbf{M}_{PZ}(q) = \text{Trans}(y, q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{PZ}(q) = \text{Trans}(z, q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Pre maticu základného pohybu zodpovedajúcu rotačnej väzbe umožňujúcej natočenie q okolo osi x globálneho súradnicového systému platí:

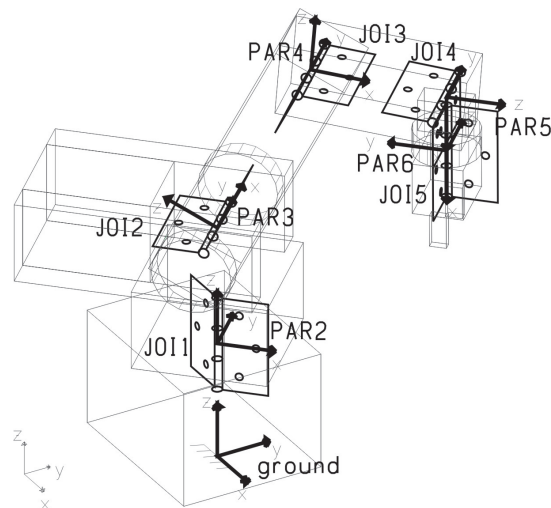
$$\mathbf{M}_{PZ}(q) = \text{Rot}(x, q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q & -\sin q & 0 \\ 0 & \sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Analogicky je definovaná matica základného pohybu zodpovedajúca rotačnej väzbe umožňujúcej rotáciu q okolo osi y , resp. z globálneho súradnicového systému:

$$\mathbf{M}_{PZ}(q) = \text{Rot}(y, q) = \begin{bmatrix} \cos q & 0 & -\sin q & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin q & 0 & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{PZ}(q) = \text{Rot}(z, q) = \begin{bmatrix} \cos q & -\sin q & 0 & 0 \\ \sin q & \cos q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Na obr. 4 je znázornený robot s konfiguráciou ramena zodpovedajúcou pozíciou efektora na začiatku pracovného cyklu. V globálnom súradnicovom systéme je táto pozícia vyjadrená súradnicami $x = 0,1912$ m, $y = 0,1912$ m, $z = 0,335$ m, $\varphi_y = 89,8^\circ$, $\varphi_x = 270,0^\circ$. Inverznou transformáciou možno toto vyjadrenie pretransformovať na vyjadrenie pomocou lokálnych polohových súradníc, udávajúcich



Obr. 4. Model robota s konfiguráciou ramena zodpovedajúcou začiatku pohybu, ktorá bola vytvorená modifikáciou súradníc polohy začiatkov a osí lokálnych súradnicových systémov členov.

Fig. 4. Model of robot with configuration of arm before starting motion, obtained by modification of LCS position coordinates of all parts.

veľkosť natočenia v jednotlivých väzbách, pričom $q_1 = 45^\circ$, $q_2 = 63,8^\circ$, $q_3 = -68,2^\circ$, $q_4 = -85,4^\circ$, $q_5 = 90^\circ$. Na základe týchto hodnôt a súradníc polohy lokálnych súradnicových systémov členov (tab. 2) sa pomocou vzťahu pre výpočet príslušnej matice \mathbf{P}_i vypočítajú nové súradnice polohy začiatkov a osí LCS, ktoré sú uvedené v tab. 3. Napríklad pre novú polohu LCS člena 2 zodpovedajúcu tejto konfigurácii ramena s efektorom vyjadrenú v maticovom tvare platí:

Tabuľka 3. Poloha začiatkov a osí lokálnych súradnicových systémov (LCS) jednotlivých členov vyjadrená v globálnom súradnicovom systéme zodpovedajúca pozícii koncového efektora na začiatku pracovného cyklu

Table 3. Position of local coordinate systems (LCS) of separate parts expressed in the global coordinate system, corresponding to the end effector position at the start of the working cycle

Súradnica	Jednotka	Lokálny súradnicový systém člena					
		1	2	3	4	5	6
x	m	0	0	0	0,078	0,1909	0,1909
y	m	0	0	0	0,078	0,1909	0,1909
z	m	0	0,148	0,3	0,5243	0,512	0,442
φ_1	°	0	0	-45	-45	-45	45
φ_2	°	0	0	63,8	-4,4	89,9	-90
φ_3	°	0	45	90	90	90	90

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_2 - x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_2 - y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_2 - z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \text{Rot}(z, q_1) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 - 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 - 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,148 - 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ & 0 & 0 \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 0,7071 & -0,7071 & 0 & 0 \\ 0,7071 & 0,7071 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,148 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Maticové vyjadrenie polohy začiatku lokálneho súradnicového systému člena 2 možno transformovať na súradnicové vyjadrenie, pričom platí: $[x_2 = 0, y_2 = 0, z_2 = 0,148, \varphi_{2,1} = 0,0^\circ, \varphi_{2,2} = 0,0^\circ, \varphi_{2,3} = 0,0^\circ]$. Týmto novými hodnotami budú v dátovom súbore programu ADAMS nahradené súradnice prislúchajúce východiskovému modelu robota.

6. Zápis nových súradníc do ADM súboru východiskového modelu robota

V dátovom súbore programu ADAMS, v tzv. ADM súbore, je poloha lokálneho súradnicového systému i -tého člena opísaná nasledovne:

```

PART/i
, QG = xi, yi, zi
, REULER = φi,1, φi,2, φi,3 ,

```

kde súradnice x_i, y_i, z_i určujú polohu začiatku LCS a uhly $\varphi_{i,1}, \varphi_{i,2}, \varphi_{i,3}$ udávajú polohu osí LCS voči globálnemu súradnicovému systému pomocou Eulerových uhlov. Keďže ADM súbor je textový súbor modifikovateľný v ľubovoľnom textovom editore, novými hodnotami lokálnych súradnicových systémov, vypočítanými podľa bodov 2 a 3, možno nahradiť pôvodné súradnice zodpovedajúce nulovej konfigurácii ramena. Vzhľadom na algoritimizovateľnosť vyššie uvedeného postupu možno opísané výpočtové kroky realizovať vo forme krátkeho programu či makra a celý výpočet pre modifikáciu ADM súboru výrazne urýchliť.

7. Záver

Navrhnutý postup parametrického modelovania umožňuje efektívne generovanie alternatívnych modelov robota s ľubovoľnou kinematickou štruktúrou líšiacich

sa polohou efektora s prislúchajúcou konfiguráciou ramena. Možno ho použiť pre ľubovoľný mechanizmus s otvorenou štruktúrou a je aplikovateľný aj v iných programoch, ktoré pracujú s podobnou dátovou štruktúrou modelu, akú má program ADAMS. Algoritmus modifikácie možno implementovať do existujúcich simulačných programov, napr. vo forme makra, alebo sa podľa neho dá vytvoriť pomocný program generujúci modifikovaný ADM súbor.

Príspevok je čiastkovým riešením grantových projektov VEGA 1/4114/07 a VEGA 1/0176/09.

LITERATÚRA

- [1] HAJDUK, M.—BALÁŽ, V.—DANESHJO, N.: ATP journal, 12, 2005, s. 84.
- [2] SZAKÁLL, P.: ATP journal, 13, 2006, 2, s. 8.
- [3] Dokumentácia k programu MSC.ADAMS
- [4] ČERVEŇAN, A.: Príspevok k využitiu technológie simulácie mechanických sústav na modelovanie pracovného cyklu robota. [Dizertačná práca]. Bratislava, Strojnícka fakulta STU v Bratislave 2000.
- [5] RANKY, H.: Robot modeling. Malva Ltd. 1985.
- [6] BRÁT, V.: Maticové metódy v analýze a syntéze prostorových väzaných mechanických systémů. Praha, Academia 1981.

Rukopis dodaný: 25.6.2007
Rukopis upravený: 20.6.2008