

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23 - 40 - 8

Automatizované systémy řízení výrobních procesů ve strojírenství

Katedra technické kybernetiky

PRŮMYSLOVÝ ROBOT VE STROJÍRENSTVÍ

Pavel TISOVSKÝ

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk BRADSKÝ, CSc.

Konzultant: Prof. Ing. Bořivoj HANUŠ, DrSc.

KTK ASŘ SF - 061

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 49

Počet příloh a tabulek: 11

Počet obrázků: 31

Vysoká škola: VŠST Liberec Fakulta: strojní
Katedra: technické kybernetiky Školní rok: 1982/83

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro **Ing. Pavla Tisovského**

obor **23-40-8 Automatizované systémy řízení výrobních procesů
ve strojírenství**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Průmyslový robot ve strojírenství**

Zásady pro vypracování:

- 1) Seznamte se studiem literatury a zvláště nepovinných předmětů s robotikou a mikroprocesorovou technikou.
- 2) Seznamte se s možnostmi využití robotiky ve sklářském průmyslu. Zaměřte se na možnosti robotů čs. výroby a na problematiku manipulace s tabulovým sklem.
- 3) Sledujte klíčový problém pozicování, zvláště z hlediska dynamiky s event. uvažováním pružnosti konstrukce. Kontrolojte dynamické účinky na tabuli skla a navrhněte řízení optimální z hlediska minimální doby přestavení a s respektováním omezení hmotné síly a omezení dynamických účinků na tabuli.

Vydáno podle předpisů
Ústřední knihovna
LIBEREC, TECHNICKÁ S
ČISLO 40117

Číslo zadání: 115/53
Vydáno dne: 1. 12. 1982
1982 V. ústřední knihovna, strana 24 ze
dne 01. 12. 1982 č. 115/53 Sb.

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 50 stran

Seznam odborné literatury:

1. Burda, J., Neváč, Mil.: Průmyslové roboty. Bratislava, AIFA 1976.
2. Sborník статей: Дистанционно управляемые роботы-манипуляторы. Москва, Мир 1976.
3. Matička, R., Taláček, J.: Manipulátory, průmyslové roboty. /Skripta./ Praha, ČVUT 1978.
4. Медведёв, В.С., Лесков, А.С., Жу́ченко, А.С.: Системы управления манипуляционных роботов. Москва, Наука 1978.
5. Havel, J.: Robotika. Úvod do teorie kognitivních robotů. Praha, SNTL 1980.

(Další literatura viz příloha.)

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Bradský - KMP VČST

Konzultanti:

Prof. Ing. Bořivoj Henuš, Brno.

Ing. Brouček - VČSU Liberec

Datum zadání diplomové práce:

7.10.1982

Termín odevzdání diplomové práce:

27.5.1982

L. S.

Doc. Ing. Ján Alexin, CSc.

Vedoucí katedry

Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc.

Děkan

Liberec

6.10.1982

V dne 19 ..

1 5 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

(Literatura v češtině)

- 6/ Holček, F. B.: Inženýrské úpravy a manipulace s prací robotů. Praha, Vyd. 1988
- 7/ Matiško, S., Talaš, J.: Konstrukce robotů II - příklady a jejich řešení. Brno, VUT 1977
- 8/ Matiško, S., Talaš, J.: Mechanické manipulátory a jejich řízení robotů. Praha, VUT 1988
- 9/ Valera, J.: Robotizace průmyslu. Praha, VUT Vydav. Techn. 1981
- 10/ Kavan, F.: Optimální řízení průmyslového robotu. Internátní práce 1985, S. 8
- 11/ Accornero: Industrial Robot (Velká Británie, 1984-1985)

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne 27. 5. 1983

Pavel Tinovský

OBSAH

Seznam nejdůležitějších symbolů	6
1. ÚVOD	7
2. DEFINOVÁNÍ MANIPULAČNÍ ÚLOHY	9
2.1. Manipulovaný předmět	9
2.2. Technologické polohy	9
2.3. Trajektorie přemístění	9
2.4. Doba přemístění	11
3. KINEMATICKÉ STRUKTURY MANIPULÁTORŮ	12
3.1. Rovinné přemístění	12
3.1.1. Otevřené řetězce	12
3.1.2. Uzavřené řetězce	13
3.2. Prostorové přemístění	14
3.2.1. Dosažení obecného bodu v prostoru	15
3.2.2. Orientace v prostoru	15
4. ÚCHOPOVÉ ZAŘÍZENÍ	17
4.1. Namáhání tenkých desek	17
4.2. Úchopové zařízení se čtyřmi savkami	18
4.3. Úchopové zařízení se šesti savkami	22
5. POHYBOVÉ ROVNICE MANIPULÁTORŮ	25
5.1. Pohybové rovnice PR - 16P	25
5.2. Pohybové rovnice PR - 32E	27
6. DYNAMICKE SILOVÉ ÚČINKY NA TABULE SKLA	30
6.1. Dynamika rovinného přemístění	30
6.2. Dynamika prostorového přemístění	31
6.2.1. Unášivý pohyb posuvný	31
6.2.2. Relativní sférický pohyb	31
6.2.3. Transformace souřadných systémů	34
6.3. Popis programu ROB1	34

7.	OMEZUJÍCÍ ČINITELÉ	37
7.1.	Nosnost manipulátoru	37
7.2.	Namáhání savek	37
7.3.	Namáhání tabule skla	38
7.3.1.	Čtyři savky	39
7.3.2.	Šest savek	40
8.	PRUŽNOST KONSTRUKCE	41
9.	OPTIMÁLNÍ ŘÍZENÍ	43
10.	DYNAMICKÁ ANALÝZA	45
11.	ZÁVĚR	47
	Seznam použité a doporučené literatury	48
	Seznam příloh	49

PŘÍLOHY

SEZNAM NEJDULEŽITĚJŠÍCH SYMBOLŮ

t	. . . . .	reálný čas
T	. . . . .	délka časového intervalu
p	. . . . .	posuvná kinematická dvojice
r	. . . . .	rotační kinematická dvojice
i	. . . . .	počet stupňů volnosti
M	. . . . .	moment
F	. . . . .	síla
D	. . . . .	doplňková dynamická síla
O	. . . . .	počátek souřadného systému
$x, y, z, \xi, \zeta, \eta$	. . . . .	souřadné osy
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}, \vec{i}', \vec{j}', \vec{k}'$	. . . . .	jednotkové vektory na těchto osách
φ, ψ, ϑ	. . . . .	Eulerovy úhly
m	. . . . .	hmotnost
I	. . . . .	moment setrvačnosti
$\vec{\omega}$	. . . . .	úhlová rychlost
$\vec{\epsilon}$	. . . . .	úhlové zrychlení
s_j	. . . . .	obecná souřadnice
S_j	. . . . .	obecný hnací silový účinek
L	. . . . .	Lagrangeova funkce
W_k	. . . . .	kinetická energie
W_p	. . . . .	polohová energie
\dot{x}	. . . . .	časová derivace
σ	. . . . .	napětí
q	. . . . .	spojité zatížení desky /Pa/
Q	. . . . .	spojité zatížení nosníku /N.m ⁻¹ /
w	. . . . .	průhyb

1. ÚVOD

Pro zajištění růstu životní úrovně pracujících je nezbytné rozvíjet a zvyšovat materiálně technickou základnu socialismu. Na tvorbě národního důchodu se podstatným způsobem podílí strojírenství, a proto pro něj nutnost neustálého technického rozvoje platí dvojnásob.

V současné epoše vědecko-technické revoluce se rozvoj strojírenské výroby, která má ze dvou třetin charakter malosériové a kusové výroby, vyznačuje celosvětovým trendem komplexní mechanizace a automatizace a snižováním podílu ruční práce. Tento trend se realizuje zaváděním pružných výrobních systémů, které vyžadují řešit operační a mezioperační manipulaci pomocí průmyslových robotů a manipulátorů (PRaM).

Rozvojem robotizace se zabývali poslední sjezdy komunistických a dělnických stran států socialistického společenství, zejména v SSSR, NDR a BLR. Také v závěrech XVI. sjezdu KSČ se ukládá rozvíjet výrobu a nasazení PRaMů. Toto je konkrétně rozpracováno v Hlavních směrech hospodářského a sociálního rozvoje ČSSR na léta 1981 - 1985.

Zavedení PRaMů do výrobních procesů přináší zvýšení efektivnosti výroby, zvýšení produktivity práce, zvýšení přesnosti odstraněním vlivu lidského činitele, úsporu pracovních sil, zvýšení využití výrobních prostředků zvýšením směnnosti a tím i možnost plánovitého plošného odběru elektrické energie. V neposlední řadě nasazení PRaMů přináší humanifikaci práce, protože je nutné nasadit je všude tam, kde je práce těžká, monotónní, nebezpečná nebo kde je pracovní prostředí lidskému zdraví škodlivé.

Nasazení PRaMů je vhodné zvláště v malosériové výrobě, protože PRaMy se vyznačují určitým stupněm univerzálnosti a pružnosti přeprogramování.

V současné době se vývojem a výrobou robotů zabývá více než 150 firem ve všech průmyslově vyspělých zemích a existuje již více než 200 typů robotů. Robotika se nadále prudce roz-

víjí od manipulátorů přes roboty 1., 2. a 3. generace až ke kognitivním robotům, které se vyznačují již určitým stupněm umělé inteligence. To však neznámá, že by se od vývoje manipulátorů a robotů nižších generací upouštělo, naopak. Bude se zavádět skupinové nasazení robotů, které si budou hierarchicky podřízeny podle své funkce ve výrobním procesu.

Udržet krok se světovým vývojem je nutnou podmínkou konkurenceschopnosti našich výrobků na světových trzích a to jak kvalitou tak i cenou.

Rozvojem robotiky se také dosáhne odstranění rozdílů mezi tělesnou a duševní prací, protože člověku v budoucnu bude příslušet ve výrobním procesu pouze kontrola činnosti strojů a tím mu zbyde více prostoru na vlastní tvůrčí činnost.

2. DEFINOVÁNÍ MANIPULAČNÍ ÚLOHY

2.1. Manipulovaný předmět

Tato práce se zabývá možnostmi nasazení PRAMŮ pro operační a mezioperační manipulaci s tabulovým sklem. Jako základ pro vymezení manipulační úlohy byly vzaty konkrétní stávající podmínky manipulace s tabulovým sklem v k. p. SKLOUNION Chudeřice, kde se vyrábí sklo pro automobilový průmysl.

Surovinou je přířez tabule skla a finálním výrobkem jsou skla do čelních a bočních oken automobilů. Jedná se tedy o tabule skla např. o rozměrech 1240 x 670 mm, tloušťky 6 mm, což při hustotě skla $\rho = 2500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ dává hmotu přibližně 12,5 kg (pro odvolání v dalším textu si označme tuto tabuli I.), nebo rozměrů 600 x 400 mm, tloušťky 5 mm, o hmotě 3 kg (tabule II.).

2.2. Technologické polohy

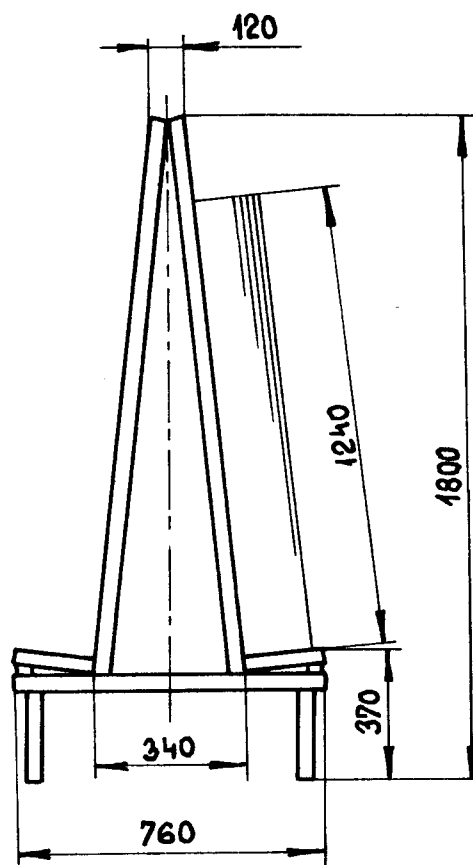
Technologické operace prováděné v podniku jsou řezání, mytí, razítkování a tepelná úprava s případným ohýbáním, které jsou realizované na zahraničních technologických linkách typu GLASSTECH, uvažuje se o nákupu linek typu SACK.

Je nutné zajistit vkládání skla do linky a opětné vyjímání, a dále mezioperační manipulaci.

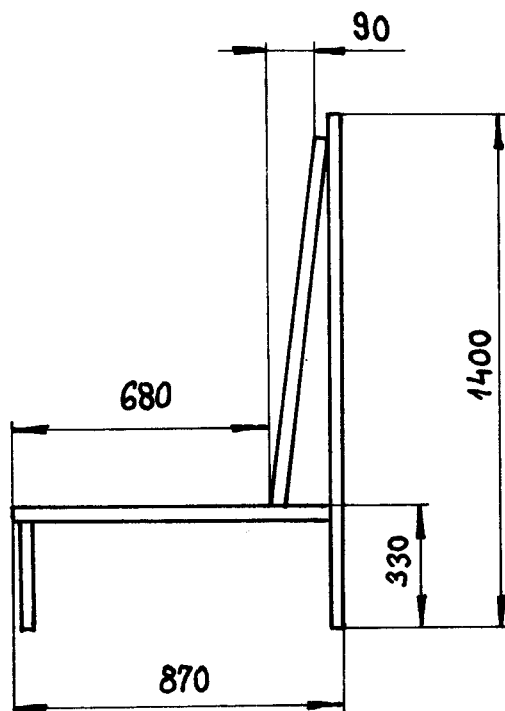
Tabule připravené ke zpracování a hotové výrobky jsou uloženy ve stojanech (obr. 1 a obr. 2). Tím je určena počáteční poloha tabule pro vkládání do linky a konečná poloha finálního výrobku. Na lince se tabule pohybuje po válečkovém dopravníku ve vodorovné poloze ve výšce 700 - 900 mm nad podlahou haly. Tím je určena konečná poloha tabule pro vkládání do linky a počáteční poloha pro vyjímání z linky, případně počáteční i konečná poloha pro mezioperační manipulaci, jako je manipulace se sklem při razítkování.

2.3. Trajektorie přemístění

Polohu stojanu vůči lince je možno volit s ohledem na možnosti použitého manipulátoru, zvláště jeho počet stupňů



Obr. 1 Stojan pro tabule I.



Obr. 2 Stojan pro tabule II.

volnosti a pracovní prostor. Při volbě trajektorie je nutné brát v úvahu pouze prostorová omezení daná stojanem a linkou.

2.4. Doba přemístění

Maximální doba na přemístění tabule skla je dána taktáží dané linky, kterou bude manipulátor obsluhovat.

Pro dobu jednoho cyklu T platí:

$$T = \frac{3\,600}{n} \quad /s/, \quad (1)$$

kde n je kapacita obsluhované linky udávaná v počtech kusů za hodinu. Například firma SACK uvádí u svých výrobků kapacitu linek A, B, C.

$$\begin{aligned} n_A = n_B &= 200 \quad /\text{hod}^{-1}/ \\ n_C &= 360 \quad /\text{hod}^{-1}/, \end{aligned} \quad (2)$$

odkud s použitím vztahu (1) dostáváme:

$$T_A = T_B = \frac{3\,600}{200} = 18 \text{ s} \quad (3)$$

$$T_C = \frac{3\,600}{360} = 10 \text{ s}$$

Dobu pracovního cyklu T je nutné rozdělit do čtyř fází: uchopení, přemístění, uvolnění, návrat.

Z uvedeného vyplývá, že nároky na rychlost přemístění jsou značné, a proto lze úlohu formulovat jako úlohu časové optimalizace při omezeních daných možnostmi daného manipulátoru (hnací síly, maximální rychlosti) a povoleným dynamickým zatížením tabule skla (namáhání tabule, případně povolené zatížení savek).

3. KINEMATICKÉ STRUKTURY MANIPULÁTORŮ

Uvažujme manipulátory s různým počtem stupňů volnosti, které mohou realizovat požadované přemístění.

Budeme uvažovat kinematické struktury s rotačními a posuvnými kinematickými dvojicemi, přičemž s určitým omezením platí, že každá kinematická dvojice představuje **jeden stupeň volnosti**. Pro počet stupňů volnosti $i \leq 3^{\circ}$ budeme hovořit o rovinném přemístění, kinematická struktura s $3^{\circ} \leq i \leq 6^{\circ}$ realizuje prostorové přemístění (v případě $i = 3^{\circ}$ záleží na konkrétní struktuře řetězce, zda realizuje rovinné či prostorové přemístění).

Pro přehlednost se však omezíme jen na některé typické struktury.

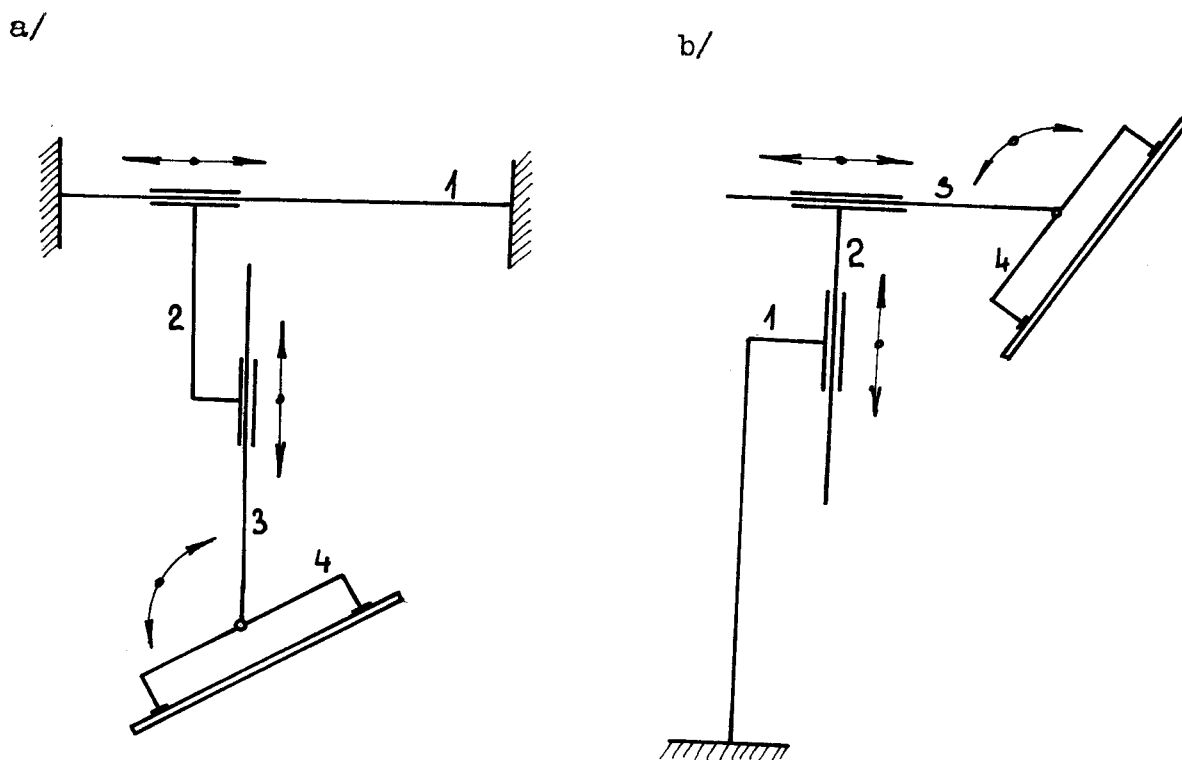
3.1. Rovinné přemístění3.1.1. Otevřené řetězce

Kinematické struktury s jedním a dvěma stupni volnosti jsou pro svoje omezené možnosti ve většině případů nepoužitelné.

Uvažujme otevřený kinematický řetězec s třemi stupni volnosti. Kombinace posuvných a rotačních kinematických dvojic udává tabulka č. 1.

zást.	Kinematická dvojice		
	1 2	2 3	3 4
A	p	p	p
B	p	p	r
C	p	r	p
D	p	r	r
E	r	p	p
F	r	p	r
G	r	r	p
H	r	r	r

Tab. 1 Možnosti uspořádání otevřeného kinematického řetězce s $i = 3^{\circ}$ volnosti



Obr. 3 Kinematický řetězec (p, p, r)
a/- portálová konstrukce
b/- sloupová konstrukce

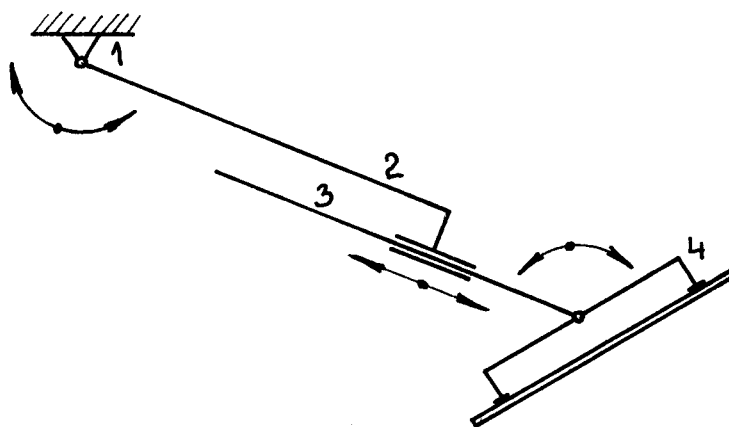
Na obr. 3 je znázorněn zástupce "B" z tab. 1 ve dvou provedeních. Podobně by šlo znázornit zástupce "C" a "D" v portálovém a sloupovém provedení. Zástupce "A" nemá praktické použití, protože nerealizuje obecně rovinné přemístění.

Na obr. 4 je znázorněn zástupce "F", který současně reprezentuje i zástupce "E", "G", "H".

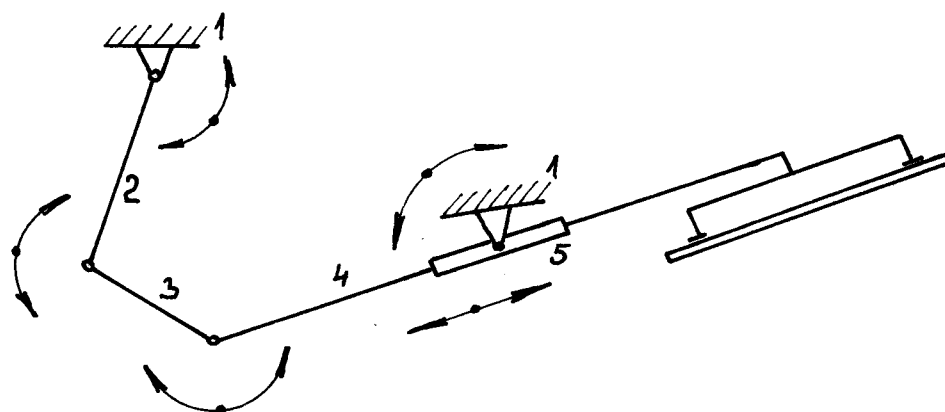
Kinematické struktury se třemi stupni volnosti však vyhoví jen v určitých poměrně speciálních případech.

3.1.2. Uzavřené řetězce

Na obr. 5 je znázorněn uzavřený kinematický řetězec se dvěma stupni volnosti (diferenciál) se čtyřmi rotačními a jednou posuvnou kinematickou dvojicí.



Obr. 4 Kinematický řetězec (r,p,r)



Obr. 5 Příklad uzavřeného kinematického řetězce

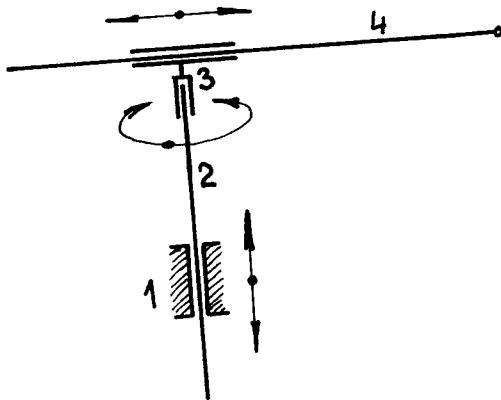
Manipulátory s uzavřenými kinematickými řetězci se vyznačují větší tuhostí konstrukce, a proto je možno docílit větší přesnosti polohování. Nevýhodou takového uspořádání však je malý dosah při současně velkých nárocích na pracovní prostor, složité vyjádření kinematických veličin v závislosti na průběhu hnacích sil, čímž se komplikuje řízení.

3.2. Prostorové přemístění

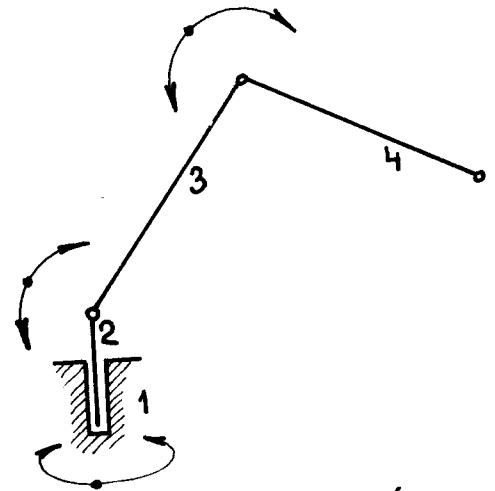
Pro dosažení obecného bodu v prostoru jsou nutné tři stupně volnosti, další tři stupně volnosti pak umožňují obecnou orientaci tělesa v prostoru. Proto rozdělíme problém prostorového přemístění do dvou kapitol.

3.2.1. Dosažení obecného bodu v prostoru

Pro $i = 3^{\circ}$ volnosti platí tab. 1. Vyberme zástupce "C" (obr. 6) a zástupce "H" (obr. 7).



Obr. 6 Kinematický řetězec (p, r, p)



Obr. 7 Kinematický řetězec (r, r, r)

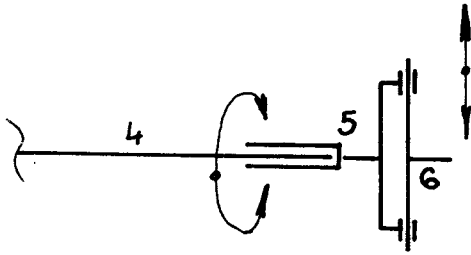
Tento výběr byl proveden z ohledem na možnosti robotů vyráběných v ČSSR. Na obr. 6 je kinematická struktura průmyslového robotu PR - 16P a na obr. 7 je kinematická struktura robotu PR - 32E. Roboty PR - 16P a PR - 32E byly vyvinuty ve Výzkumném ústavu kovoprůmyslu (VUKOV) v Prešově.

3.2.2. Orientace v prostoru

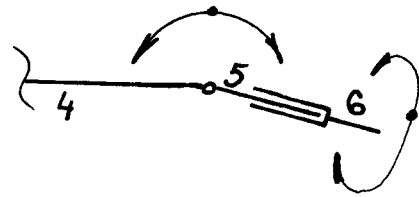
Pro umožnění obecné orientace zápěstí (manipulovaného přemětu) v prostoru jsou nutné další tři stupně volnosti, tedy celkem šest stupňů volnosti, (Těleso má v prostoru obecně šest stupňů volnosti.) Maximální obecnost (tedy 6° volnosti) obvykle nebývá nutná a navíc s sebou přináší neúměrnou komplikovanost řízení manipulátoru nebo robotu.

Roboty PR - 16P a PR - 32E mají standardně pět stupňů volnosti. Na obr. 8 a 9 jsou znázorněné standardně dodávaná zápěstí.

Pro případ manipulace dle kap. 2. postačí čtyři stupně volnosti, a proto je navrhováno následující zjednodušení. U robotu PR - 16P využít stavebnicové konstrukce a nahradit jednotky rotace a mikroposuvu zápěstí jednotkou sklopnou.

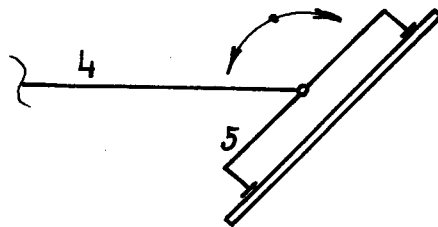


Obr. 8 Zápěstí PR - 16P
4 5 - rotace zápěstí
5 6 - mikroposuv



Obr. 9 Zápěstí PR - 32E
4 5 - sklápění zápěstí
5 6 - rotace zápěstí

Pro srovnatelnost PR - 16P budeme uvažovat u PR - 32E také pouze sklápění zápěstí. Zápěstí robota vybavíme chapadlem vhodným pro manipulaci s tabulovým materiálem - systémem savek. Po těchto úpravách budou zápěstí mít strukturu podle obr. 10.

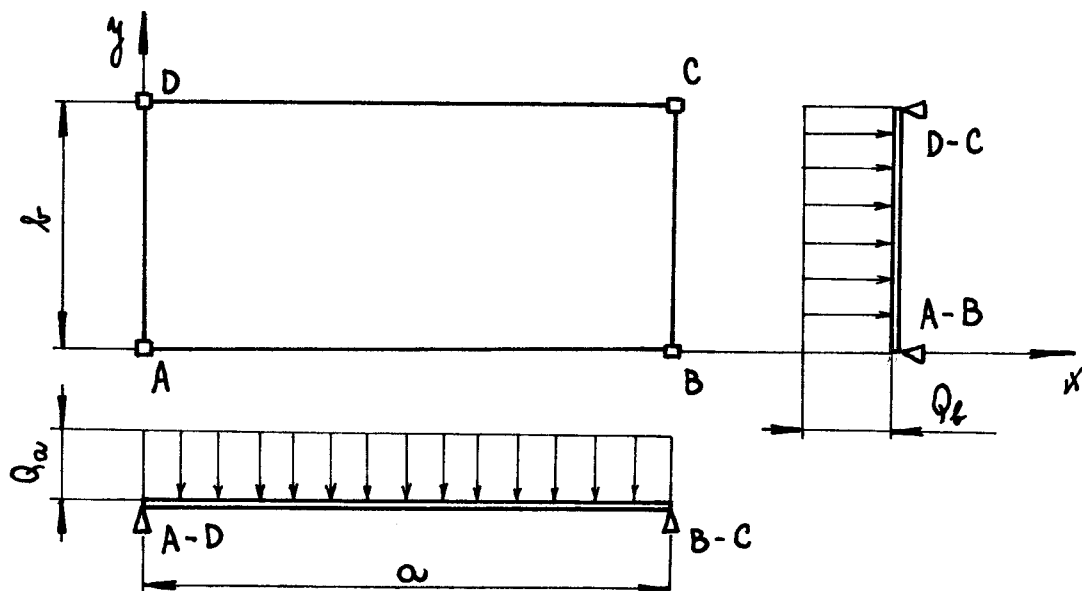


Obr. 10 Zápěstí PR - 16P a PR - 32E pro manipulaci s tabulemi

4. ÚCHOPOVÉ ZAŘÍZENÍ

4.1. Namáhání tenkých desek

Pro kontrolu namáhání tabule skla je nutná znalost průběhu ohybových momentů. Za zjednodušujících předpokladů vysvětlených v kap. 4.2. máme řešit namáhání tenké desky tvaru obdélníka zatíženou spojitým konstantním zatížením a podepřenou několika symetricky rozmístěnými podpěrami. K řešení použijeme lit. /16/, kde je tabelován příklad dle obr. 11.



Obr. 11 Tenká deska

Tento příklad použijeme k ověření přesnosti přibližné metody výpočtu, která bude v dalším používána. Řešení probíhá ve třech krocích. V prvním kroku nahradíme podpěry A, D a B, C vždy jedinou spojitou podpěrrou A-D a B-C. Nyní řešíme namáhání nosníku na dvou podpěrách zatíženého spojitým zatížením

$$Q_a = b \cdot q \quad (4)$$

a pro ohybový moment ve středu nosníku pak platí

$$M_{xs} = \frac{1}{8} Q_a \cdot a^2 \quad (5)$$

Druhý krok je analogický s prvním. Nahradíme podpěry A, B spojitou podpěrrou A-B a podpěry D,C podpěrrou D-C a dostáváme ohybový moment ve středu nosníku ve směru kolmém

$$M_{ys} = \frac{1}{8} Q_b \cdot b^2 \quad (6)$$

Těmto momentům odpovídají ohybová napětí

$$\sigma_{xs} = \frac{M_{xs}}{\frac{1}{6} b \cdot h^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{ys} = \frac{M_{ys}}{\frac{1}{6} a \cdot h^2} \quad (8)$$

kde h je tloušťka desky.

Ve třetím kroku vypočítáme ekvivalentní napětí σ_e podle metody HMM

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (9)$$

Porovnání výsledků této přibližné metody s exaktními výsledky uvedenými v lit. /16/ je v tab. 2. Z tabulky vyplývá, že metoda pro naše potřeby plně vyhoví, protože se její výsledky liší od exaktních maximálně o 18,45 % pro čtvercovou desku, pro tabule dle kap. 2.1. chyba výpočtu nepřekročí 5 %. Navíc tato chyba je vždy kladná, což dává určitou bezpečnost.

4.2. Úchopové zařízení se čtyřmi savkami

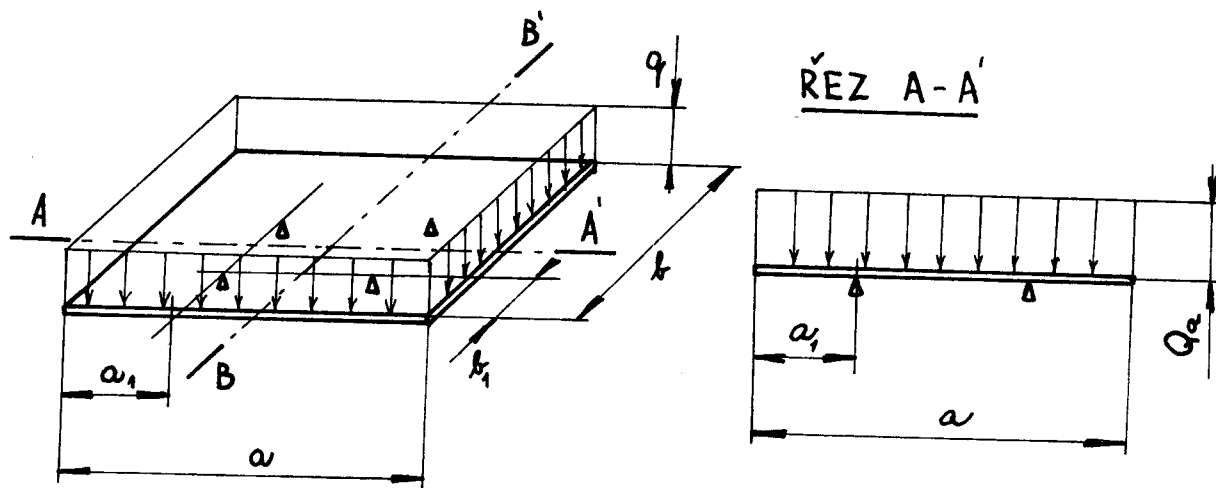
Máme optimalizovat rozmístění čtyř savek tak, aby bylo namáhání relativně rovnoměrné bez výrazných extrémů. Jinými slovy máme minimalizovat lokální extrém napětí.

Budeme kontrolovat namáhání tabule skla na ohyb. Uvažujeme tenkou desku na čtyřech podporách zatíženou spojitým zatížením (obr. 12). Vycházíme přitom z předpokladu, že zatížení

				p ř i b l i ž n ě						e x a k t n ě					
q	h	a	b	M_{xs}	σ_{xs}	M_{ys}	σ_{ys}	σ_e	M_{xs}	σ_{xs}	M_{ys}	σ_{ys}	σ_e	Δ	
Pa	m	m	m	Nm	MPa	Nm	MPa	MPa	Nm	MPa	Nm	MPa	MPa	%	
			0,5	6,25	3,0	3,13	0,75	2,70	6,09	2,92	2,52	0,61	2,68	0,75	
			0,6	7,50	3,0	4,50	1,08	2,63	7,24	2,89	4,49	1,08	2,53	3,95	
			0,7	8,75	3,0	6,13	1,47	2,60	8,32	2,85	6,01	1,44	2,47	5,26	
		0,1	0,8	10,00	3,0	8,00	1,92	2,63	9,29	2,79	7,58	1,82	2,45	7,35	
	0,05		0,9	11,25	3,0	10,13	2,43	2,76	10,07	2,69	9,12	2,19	2,47	11,29	
100,0			1,0	12,50	3,0	12,50	3,00	3,00	10,55	2,53	10,55	2,53	2,53	18,48	

Tab. č. 2 Ověření metody výpočtu

tabule od doplňkových dynamických momentů je mnohem menší než zatížení od doplňkové dynamické síly. Přitom ohyb způsobuje pouze složka této síly kolmá k rovině tabule.



Obr. 12 Deska se spojitým
zatížením na 4
podporách

Obr. 13 Nosník se spojitým
zatížením na dvou
podporách

Provedeme-li řez $A - A'$ (obr. 12), dostaneme analogii s namáháním nosníku dle obr. 13. Pro vyjádření namáhání v řezu $B - B'$ zaveďme poměr stran tabule

$$P = \frac{b}{a} \quad (10)$$

Spojitě zatížení tabule velikosti q /Pa/, což je kolmá složka doplňkové dynamické síly na jednotku plochy, přejde na spojitě zatížení Q_a , respektive Q_b , podle vztahů

$$Q_a = b \cdot q \quad (11)$$

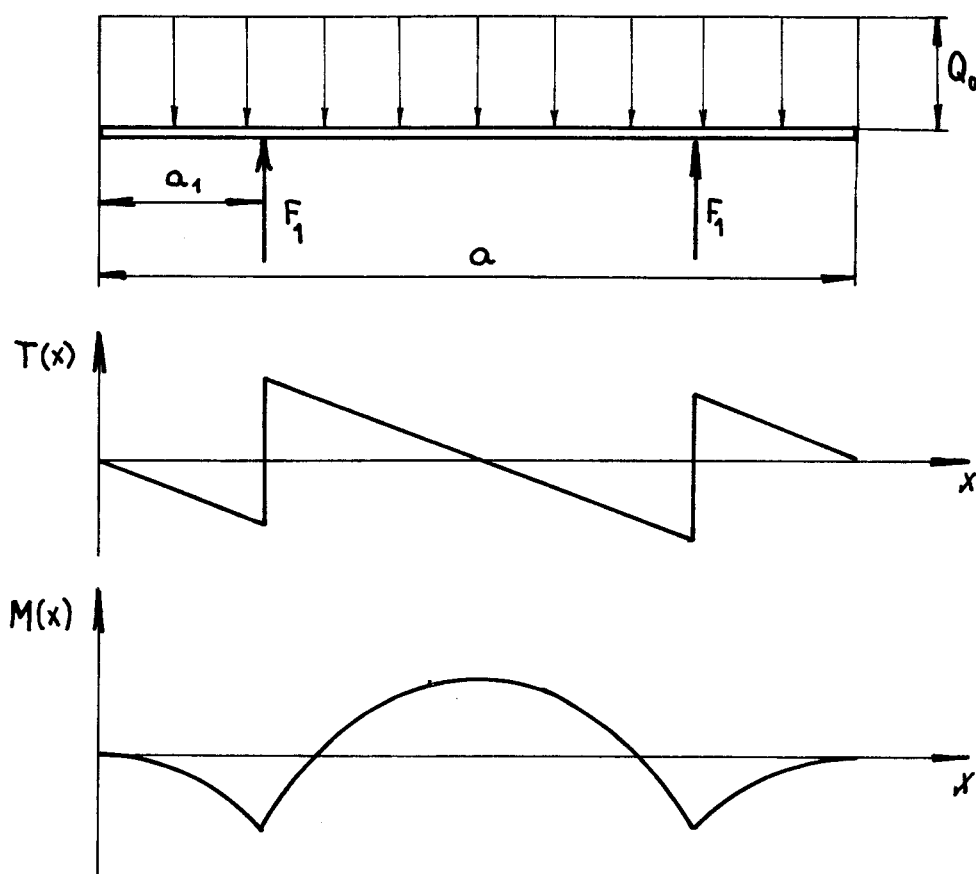
$$Q_b = P^{-1} \cdot Q_a \quad (12)$$

Máme určit umístění savek, tedy kóty a_1 , resp. b_1 , které jsou ve stejném poměru jako strany a , b .

$$\frac{b_1}{a_1} = P \quad (13)$$

Ve velikost reakcí F_1 určíme ze statické podmínky rovnováhy

$$F_1 = \frac{a}{2} \cdot Q_a \quad (14)$$



Obr. 14 Průběh vnitřní posouvací síly a vnitřního ohybového momentu v nosníku

Na základě Schwedlerových vět

$$\frac{dT(x)}{dx} = -Q_a \quad (15)$$

$$\frac{dM(x)}{dx} = T(x) \quad (16)$$

určíme průběh posouvací síly $T(x)$

$$T_a(x) = -Q_a \cdot x \quad \text{pro } 0 \leq x \leq a_1 \quad (17)$$

$$T_a(x) = -Q_a \cdot \left(x - \frac{a}{2}\right) \quad \text{pro } a_1 \leq x \leq (a - a_1) \quad (18)$$

$$T_a(x) = -Q_a \cdot (x - a) \quad \text{pro } (a - a_1) \leq x \leq a \quad (19)$$

a vnitřního ohybového momentu $M(x)$

$$M_a(x) = -Q_a \cdot \frac{x^2}{2} \quad \text{pro } 0 \leq x \leq a_1 \quad (20)$$

$$M_a(x) = -Q_a \cdot \left(\frac{x^2}{2} - \frac{a}{2}(x - a_1)\right) \quad \text{pro } a_1 \leq x \leq (a - a_1) \quad (21)$$

$$M_a(x) = -Q_a \cdot \frac{(a - x)^2}{2} \quad \text{pro } (a - a_1) \leq x \leq a \quad (22)$$

Z požadavku minimalizace lokálních maxim vyplývá podmínka

$$\left| M_a(a_1) \right| \stackrel{!}{=} \left| M_a\left(\frac{a}{2}\right) \right| \quad (23)$$

která vede na kvadratickou rovnici pro hledanou délku a_1 , ze které po úpravách dostáváme

$$a_1 = a \cdot \frac{\sqrt{2} - 1}{2} \quad (24)$$

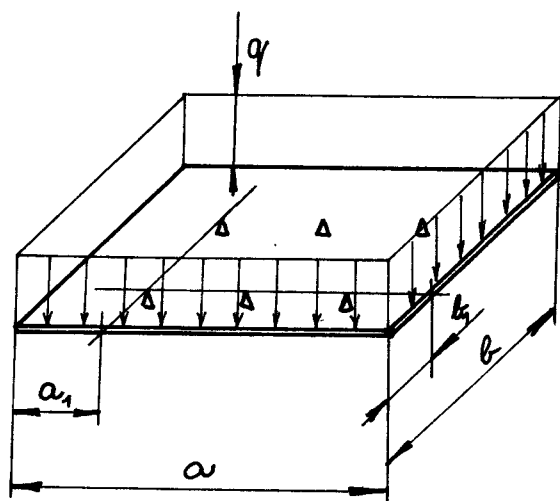
Ze vztahu (13) dále určíme délku b_1 .

4.3. Úchopové zařízení se šesti savkami

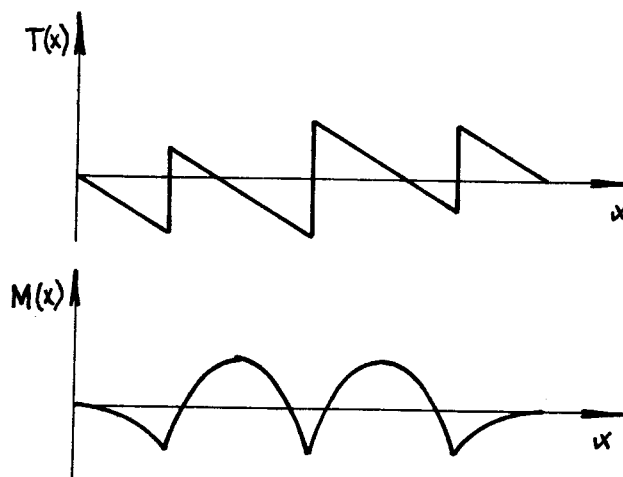
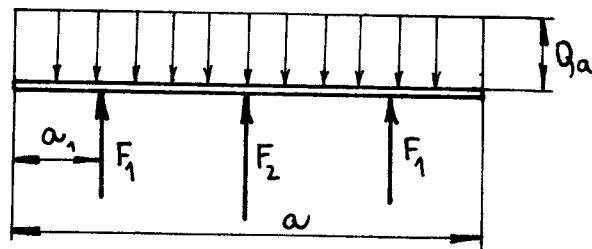
Pro tabule výrazně obdélníkového tvaru bude zřejmě výhodnější použít úchopové zařízení se šesti savkami (obr. 15). Délku b_1 určíme podobně jako v kap. 4.2., analogicky vztahu (24) platí

$$b_1 = b \cdot \frac{\sqrt{2} - 1}{2} \quad (25)$$

Pro určení délky a_1 musíme řešit nosník na třech podpěrách dle obr. 16.. Úloha je jedenkrát staticky neurčitá, jako staticky neurčitou reakci volme sílu F_1 . Velikost reakcí



Obr. 15 Deska se spojitým zatížením na šesti podpěrách



Obr. 16 Průběh posouvací síly a vnitřního momentu

určíme ze statické podmínky

$$2F_1 + F_2 = a \cdot Q_a \quad (26)$$

a z podmínky minima deformační práce

$$\frac{\partial U}{\partial F_1} = 0 \quad (27)$$

Průběh ohybového momentu pro $0 \leq x \leq a_1$ pak dostáváme ve tvaru

$$M_a(x) = -\frac{1}{2} Q_a \cdot x^2 \quad (28)$$

pro $a_1 \leq x \leq \frac{a}{2}$ dostáváme

$$M_a(x) = \frac{\frac{1}{8} Q_a \left(\frac{a^4}{16} - a_1^4 \right) - \frac{1}{6} Q_a \cdot a_1 \left(\frac{a^3}{8} - a_1^3 \right)}{\frac{1}{3} \left(\frac{a^3}{8} - a_1^3 \right) - a_1 \left(\frac{a^2}{4} - a_1^2 \right) + a_1^2 \left(\frac{a}{2} - a_1 \right)} (x - a_1) - \frac{1}{2} Q_a x^2 \quad (29)$$

Další průběh ohybového momentu není třeba určovat, protože úloha je symetrická.

Analogicky podmínce (23) zde platí:

$$\left| M_a(a_1) \right| \stackrel{!}{=} \left| M_a \left(\frac{a_1}{2} + \frac{a}{4} \right) \right| \stackrel{!}{=} \left| M_a \left(\frac{a}{2} \right) \right| \quad (30)$$

odkud opět po vyřešení kvadratické rovnice dostáváme délku a_1 :

$$a_1 = a \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2} - 1}{14} \quad (31)$$

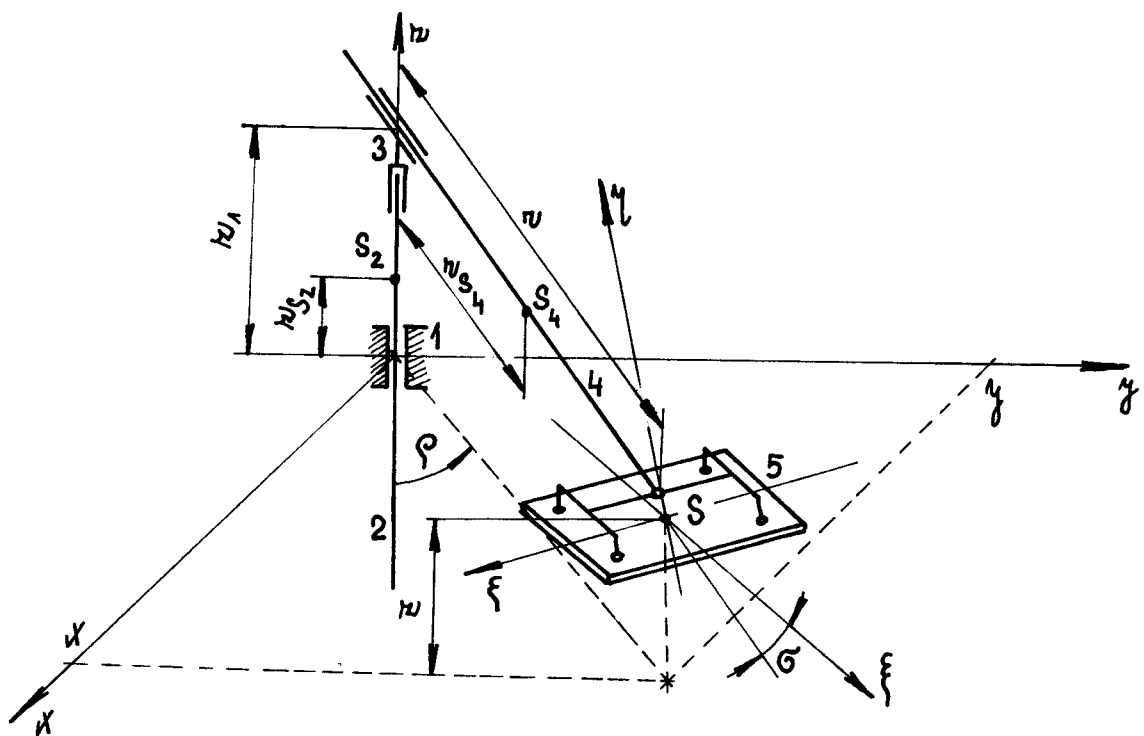
5. POHYBOVÉ ROVNICE MANIPULÁTORŮ5.1. Pohybové rovnice PR - 16P

K určení pohybových rovnic využijeme Lagrangeovy rovnice II. druhu:

$$S_j = \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{s}_j} - \frac{\partial L}{\partial s_j} \quad (32)$$

$$L = W_k - W_p \quad (33)$$

kde S_j ... obecná hnací síla j -tého stupně volnosti
 s_j ... obecná souřadnice
 L ... Lagrangeova funkce
 W_k ... kinetická energie
 W_p ... potenciální energie



Obr. 17 PR - 16P

Na obr. 17 je znázorněna struktura PR - 16P. Předpokládejme, že známe hmoty jednotlivých členů, jejich momenty setrvačnosti a všechny potřebné rozměry. Lagrangeovu funkci L (vztah (33)) dostáváme ve tvaru

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} (m_2 + m_3 + m_4 + m_5) \dot{z}_1^2 + \\
 & + \frac{1}{2} (I_3 + I_4 + m_4 r_{S_4}^2 + \frac{I_z + I_\xi}{2} + \\
 & + \frac{I_z - I_\xi}{2} \cos 2\sigma + m_5 (r + d \sin \sigma)^2) \dot{\varphi}^2 + \\
 & + \frac{1}{2} (m_4 + m_5) \dot{r}^2 + \frac{1}{2} (I_\xi + m_5 d^2) \dot{\sigma}^2 - \\
 & - g (m_2 r_{S_2} + (m_3 + m_4) z_1 + m_5 (z_1 - d \cos \sigma)) \quad (34)
 \end{aligned}$$

kde $g \dots$ gravitační zryvlení.

Dosazením (34) do (32) dostáváme pohybové rovnice

$$F_z = (m_2 + m_3 + m_4 + m_5) (\ddot{z}_1 + g) \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
 M_\varphi = & (I_3 + I_4 + \frac{I_z + I_\xi}{2} + \\
 & + \frac{I_z - I_\xi}{2} \cos 2\sigma + m_5 (r + d \sin \sigma)^2) \ddot{\varphi} \quad (36)
 \end{aligned}$$

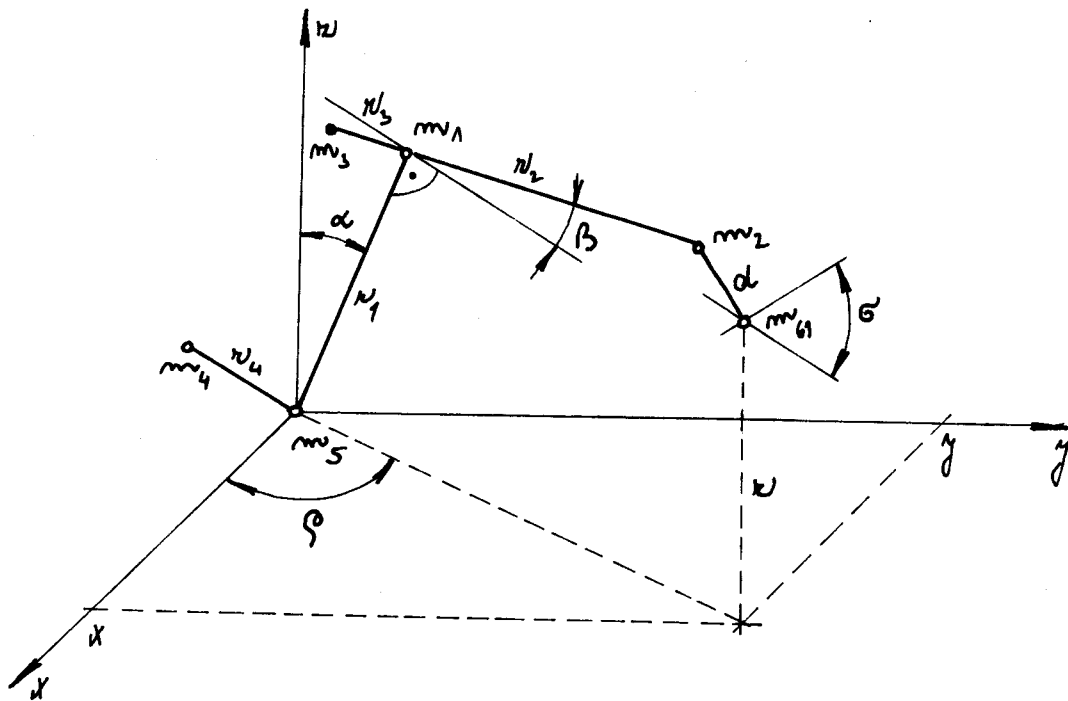
$$F_r = (m_4 + m_5) \ddot{r} - m_5 (r + d \sin \sigma) \dot{\varphi}^2 \quad (37)$$

$$\begin{aligned}
 M_\sigma = & (I_\xi + m_5 d^2) \ddot{\sigma} + (\frac{I_z - I_\xi}{2} \sin 2\sigma - \\
 & - m_5 (r + d \sin \sigma) d \cos \sigma) \dot{\varphi}^2 + \\
 & + m_5 g \cdot d \sin \sigma \quad (38)
 \end{aligned}$$

kde F_z a F_r jsou hnací síly a M_φ a M_σ jsou hnací momenty odpovídající jednotlivým souřadnicím.

5.2. Pohybové rovnice PR - 32E

Na rozdíl od předcházející kapitoly, kde byl použit odhad originálních hmotových parametrů robotu, použijeme zde nahrazení pomocí hmotných bodů (obr. 18).



Obr. 18 PR - 32E

Odvození pohybových rovnic provedeme opět z Lagrangeovy rovnice II. druhu (32).

Při znalosti hmot a rozměrů dostáváme Lagrangeovu funkci ve tvaru

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} (m_4 r_4^2 + m_1 r_1^2 \sin^2 \alpha + m_3 (r_1 \sin \alpha - r_3 \cos(\alpha - \beta))^2 + \\
 & + m_2 (r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta))^2 + \\
 & + m_{61} (r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta) + d \sin(\sigma + \beta - \alpha))^2) \dot{\varphi}^2 + \\
 & + \frac{1}{2} (m_1 r_1^2 + m_3 (r_1 - r_3 \sin \beta)^2 + m_2 (r_1 + r_2 \sin \beta)^2 +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + m_{61}(r_1 + r_2 \sin \beta - d \cos(\sigma + \beta - \alpha))^2 \dot{\alpha}^2 + \\
& + \frac{1}{2} (m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + m_{61}(r_2 + d \sin(\sigma + \beta - \alpha))^2) \dot{\beta}^2 + \\
& + \frac{1}{2} m_{61} d^2 \dot{\sigma}^2 - \\
& - g (m_1 r_1 \cos \alpha + m_3 (r_1 \cos \alpha - r_3 \sin(\alpha - \beta)) + \\
& + m_2 (r_1 \cos \alpha + r_2 \sin(\alpha - \beta)) + \\
& + m_{61} (r_1 \cos \alpha + r_2 \sin(\alpha - \beta) - d \cos(\sigma + \beta - \alpha)))
\end{aligned} \tag{39}$$

Dosazením do (32) dostáváme pohybové rovnice:

$$\begin{aligned}
M_{\varphi} &= (m_4 r_4^2 + m_1 r_1^2 \sin^2 \alpha + m_3 (r_1 \sin \alpha - r_3 \cos(\alpha - \beta))^2 + \\
& + m_2 (r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta))^2 + \\
& + m_{61} (r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta) + d \sin(\sigma + \beta - \alpha))^2) \cdot \ddot{\varphi}
\end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
M_{\alpha} &= (m_1 r_1^2 + m_3 (r_1 - r_3 \sin \beta)^2 + m_2 (r_1 + r_2 \sin \beta)^2 + \\
& + m_{61} (r_1 + r_2 \sin \beta - d \cos(\sigma + \beta - \alpha))^2) \ddot{\alpha} + \\
& - (m_1 r_1^2 \sin \alpha \cos \alpha + m_3 (r_1 \sin \alpha - r_3 \cos(\alpha - \beta)) \cdot \\
& \cdot (r_1 \cos \alpha + r_3 \sin(\alpha - \beta)) + \\
& + m_2 (r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta)) \cdot \\
& \cdot (r_1 \cos \alpha - r_2 \sin(\alpha - \beta)) + \\
& + m_{61} (r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta) + \\
& + d \sin(\sigma + \beta - \alpha)) (r_1 \cos \alpha - r_2 \sin(\alpha - \beta) + \\
& + d \cos(\sigma + \beta - \alpha)) \dot{\varphi}^2 + \\
& + (m_{61} (r_1 + r_2 \sin \beta - d \cos(\sigma + \beta - \alpha))) \cdot \\
& \cdot d \sin(\sigma + \beta - \alpha) \dot{\alpha}^2 - \\
& - g (m_1 r_1 \sin \alpha + m_3 (r_1 \sin \alpha + r_3 \cos(\alpha - \beta)) -
\end{aligned}$$

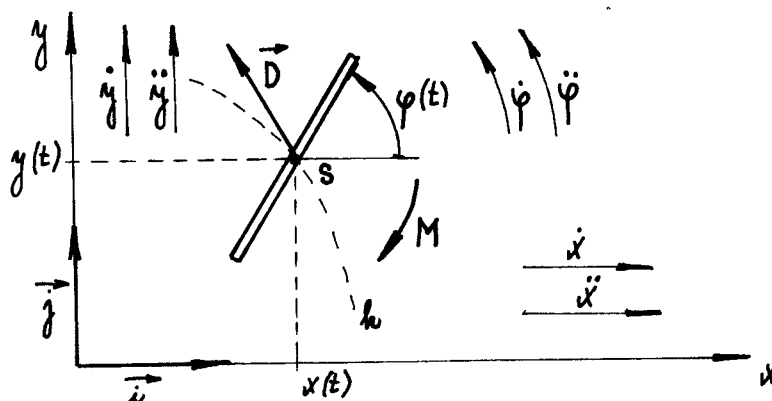
$$\begin{aligned}
& - m_2(r_1 \sin \alpha - r_2 \cos(\alpha - \beta)) + \\
& + m_{61}(r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta) + d \sin(\sigma + \beta - \alpha)) \quad (41)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_\beta = & (m_3 r_3^2 + m_2 r_2^2 + m_{61}(r_2 + d \sin(\sigma + \beta - \alpha))^2) \ddot{\beta} + \\
& + (m_3(r_1 \sin \alpha - r_3 \cos(\alpha - \beta))r_3 \sin(\alpha - \beta) - \\
& - m_2(r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta))r_2 \sin(\alpha - \beta) - \\
& - m_{61}(r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta) + \\
& + d \sin(\sigma + \beta - \alpha))(r_2 \sin(\alpha - \beta) - \\
& - d \cos(\sigma + \beta - \alpha)) \dot{\phi}^2 + \\
& + (m_3(r_1 - r_3 \sin \beta) r_3 \cos \beta - \\
& - m_2(r_1 + r_2 \sin \beta) r_2 \cos \beta - \\
& - m_{61}(r_1 + r_2 \sin \beta - d \cos(\sigma + \beta - \alpha)) \cdot \\
& \cdot (r_2 \cos \beta + d \sin(\sigma + \beta - \alpha))) \dot{\alpha}^2 - \\
& - m_{61}(r_2 + d \sin(\sigma + \beta - \alpha)) d \cos(\sigma + \beta - \alpha) \dot{\beta}^2 + \\
& + g(m_3 r_3 \cos(\alpha - \beta) - m_2 r_2 \cos(\alpha - \beta) - \\
& - m_{61}(r_2 \cos(\alpha - \beta) - d \sin(\sigma + \beta - \alpha))) \quad (42)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_\sigma = & m_{61} d^2 \ddot{\sigma} - \\
& - (m_{61}(r_1 \sin \alpha + r_2 \cos(\alpha - \beta)) + \\
& + d \sin(\sigma + \beta - \alpha)) d \cos(\sigma + \beta - \alpha) \dot{\phi}^2 + \\
& + (m_{61}(r_1 + r_2 \sin \beta - d \cos(\sigma + \beta - \alpha)) \cdot \\
& \cdot d \sin(\sigma + \beta - \alpha)) \dot{\alpha}^2 - \\
& - (m_{61}(r_2 + d \sin(\sigma + \beta - \alpha)) d \cos(\sigma + \beta - \alpha)) \dot{\beta}^2 + \\
& + g m_{61} d \sin(\sigma + \beta - \alpha) \quad (43)
\end{aligned}$$

6.- DYNAMICKE SILOVE UČINKY NA TABULE SKLA6.1. Dynamika rovinného přemístění

Těleso při rovinném pohybu má v obecném případě tři stupně volnosti. Jeho polohu a orientaci lze tedy definovat pomocí tří proměnných. V případě znázorněném na obr.19 jsou to souřadnice x , y , těžiště tělesa S a úhel pootočení tělesa .



Obr. 19 Obecný rovinný pohyb

Obecný rovinný pohyb tělesa rozdělíme pomocí základního rozkladu na unášivý posuvný pohyb těžiště tělesa S po trajektorii $k(x, y)$ a relativní rotační pohyb tělesa kolem bodu S . K určení pohybu tělesa v rovině je třeba znát časové průběhy souřadnic $x(t)$, $y(t)$ a úhlu pootočení $\varphi(t)$.

Doplňkové dynamické účinky na těleso, doplňkovou dynamickou sílu \vec{D} a doplňkový dynamický moment M určíme podle d'Alembertova principu:

$$\vec{D} = \vec{i} D_x + \vec{j} D_y \quad (44)$$

$$D_x = -m \ddot{x} \quad (45)$$

$$D_y = -m \ddot{y} \quad (46)$$

$$M = -I_S \ddot{\varphi} \quad (47)$$

kde \vec{i} ... jednotkový vektor osy x, $\vec{i} = (1, 0)$
 \vec{j} ... jednotkový vektor osy y, $\vec{j} = (0, 1)$
 m ... hmota tělesa
 I_S ... moment setrvačnosti tělesa k těžišti

6.2. Dynamika prostorového přemístění

Poloha tělesa v prostoru je dána šesti souřadnicemi, resp. pohyb tělesa v prostoru je dán závislostí těchto souřadnic na čase. Využijeme-li analogicky s rovinným případem základní rozklad obecného prostorového pohybu na unášivý pohyb posuvný a relativní sférický pohyb, dostaneme vyjádření pohybu tělesa pomocí funkcí:

$$\vec{r} = \vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t)) \quad (48)$$

$$\varphi = \varphi(t) \quad (49)$$

$$\psi = \psi(t) \quad (50)$$

$$\vartheta = \vartheta(t) \quad (51)$$

kde φ , ψ , ϑ jsou Eulerovy úhly určující sférický pohyb a \vec{r} je průvodič referenčního bodu.

6.2.1. Unášivý pohyb posuvný

Doplňkovou dynamickou sílu stanovíme opět podle d'Alambertova principu

$$\vec{D} = \vec{i} D_x + \vec{j} D_y + \vec{k} D_z \quad (52)$$

$$D_x = -m \ddot{x} \quad (53)$$

$$D_y = -m \ddot{y} \quad (54)$$

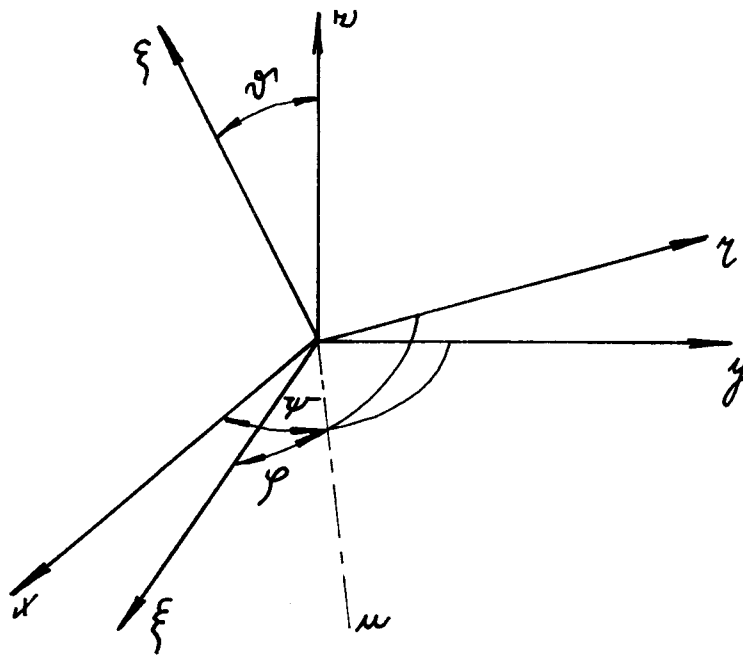
$$D_z = -m \ddot{z} \quad (55)$$

6.2.2. Relativní sférický pohyb

Kinematika a dynamika sférického pohybu je podrobně vylo-

žena v lit./1/ a /2/.

Volme pevný souřadný systém $O(x, y, z)$ s počátkem $O = S$, tedy s počátkem v referenčním bodě, v našem případě v těžišti tělesa. Dále volme pohyblivý souřadný systém $O(\xi, \eta, \zeta)$ spojený s tělesem, kde osy ξ, η, ζ jsou shodné s hlavními osami setrvačnosti tělesa. Poloha pohyblivého souřadného systému vůči pevnému souřadnému systému je dána třemi Eulerovými úhly (obr. 20). Úhel precese ψ je úhel mezi uzlovou přímkou u (průsečnice rovin (x, y) a (ξ, η)) a osou x , úhel nutace ϑ svírají osy z a ζ a úhel vlastní rotace φ je úhel mezi uzlovou přímkou u a osou ξ .



Obr. 20 Eulerovy úhly

Při známých závislostech (49), (50), (51) a s použitím Eulerových kinematických rovnic dostáváme složky vektoru úhlové rychlosti $\vec{\omega}$ v souřadném systému tělesa $O(\xi, \eta, \zeta)$

$$\omega_{\xi} = \dot{\vartheta} \cos \varphi + \dot{\psi} \sin \varphi \sin \vartheta \quad (56)$$

$$\omega_\eta = \dot{\psi} \sin \vartheta \cos \varphi - \dot{\vartheta} \sin \varphi \quad (57)$$

$$\omega_\xi = \dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \vartheta \quad (58)$$

S odvoláním na kap. 3.2.2. se v dalším omezíme na pět stupňů volnosti, resp. tři stupně unášivého pohybu a dva stupně relativního unášivého pohybu. Volme proto úhel nutace ($\vartheta = \frac{\pi}{2}$; $\dot{\vartheta} = 0$). S tímto omezením přejdou rovnice (56), (57), (58) na tvar:

$$\omega_\xi = \dot{\psi} \sin \varphi \quad (59)$$

$$\omega_\eta = \dot{\psi} \cos \varphi \quad (60)$$

$$\omega_\zeta = \dot{\varphi} \quad (61)$$

Derivací těchto vztahů podle času dostáváme vektor zrychlení \vec{E} v souřadném systému tělesa $O(\xi, \eta, \zeta)$

$$E_\xi = \ddot{\psi} \sin \varphi + \dot{\varphi} \dot{\psi} \cos \varphi \quad (62)$$

$$E_\eta = \ddot{\psi} \cos \varphi - \dot{\varphi} \dot{\psi} \sin \varphi \quad (63)$$

$$E_\zeta = \ddot{\varphi} \quad (64)$$

S použitím vztahů (59) až (64) pak můžeme dosadit do Eulerových pohybových rovnic

$$M_\xi = I_\xi E_\xi - \omega_\eta \omega_\zeta (I_\zeta - I_\xi) \quad (65)$$

$$M_\eta = I_\eta E_\eta - \omega_\xi \omega_\zeta (I_\zeta - I_\eta) \quad (66)$$

$$M_\zeta = I_\zeta E_\zeta - \omega_\xi \omega_\eta (I_\xi - I_\zeta) \quad (67)$$

kde I_ξ, I_η, I_ζ jsou momenty setrvačnosti tělesa k hlavním osám setrvačnosti a M_ξ, M_η, M_ζ jsou pravouhlé složky vektoru doplňkového dynamického momentu \vec{M} v souřadném systému tělesa $O(\xi, \eta, \zeta)$.

6.2.3. Transformace souřadných systémů

Abychom mohli sledovat dynamické zatížení tabule, musíme znát doplňkové dynamické účinky v souřadném systému tělesa $O(\xi, \eta, \zeta)$. Doplňkovou dynamickou sílu podle vztahu (52) musíme tedy převést do pohyblivého souřadného systému. Je třeba určit transformační matici B , pro kterou musí platit:

$$\begin{bmatrix} r_{\xi} \\ r_{\eta} \\ r_{\zeta} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (68)$$

kde $\vec{r}(x, y, z) = \vec{r}(\xi, \eta, \zeta)$ je libovolný vektor.

Budeme postupně uvažovat vždy změnu jediného Eulerova úhlu při ostatních dvou konstantních a tím získáme závislost mezi jednotkovými vektory $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ pevného souřadného systému a jednotkovými vektory $\vec{i}', \vec{j}', \vec{k}'$ pohyblivého souřadného systému. Při uvažování omezení $\vartheta = \frac{\pi}{2} = \text{konst.}$ dostáváme matici B ve tvaru:

$$B = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & \sin \psi \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\cos \psi \sin \varphi & -\sin \psi \sin \varphi & \cos \varphi \\ \sin \psi & -\cos \psi & 0 \end{bmatrix} \quad (69)$$

Matici B a složky vektoru \vec{D} v pevném souřadném systému $O(x, y, z)$ podle vztahů (53), (54), (55) dosadíme do vztahu (68) a tím získáme složky vektoru \vec{D} v souřadném systému tělesa $O(\xi, \eta, \zeta)$.

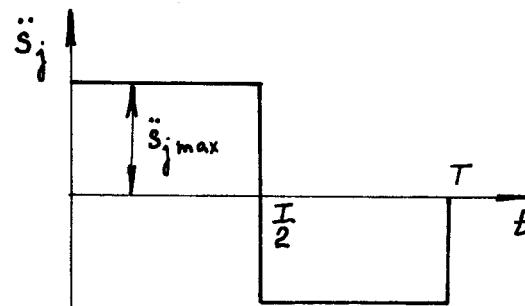
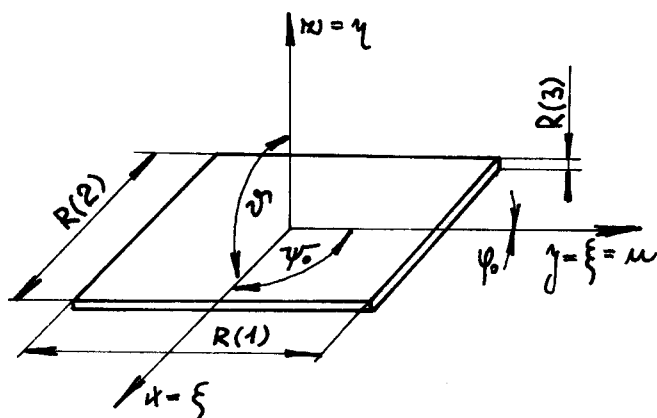
Tím jsme určili spolu se složkami vektoru \vec{M} (vztahy (65), (66), (67)) dynamické zatížení tabule skla při prostorovém přemístění.

6.3. Popis programu ROB 1

Výpis programu je v příloze č.1, ukázka výsledků v příloze č.2. Program řeší výpočet dynamického zatížení tabule skla podle teorie popsané v kap. 6.2. při prostorovém přemístění s pěti stupni volnosti, v osách x, y, z a ve dvou Eulerových

úhlech φ , ψ . Úhel \mathcal{V} je konstatní ($\mathcal{V} = \frac{\pi}{2}$ - viz kap. 6.2.1.).

Počáteční poloha je pevně dána podle obr. 21, konečnou polohu je nutno zadat. Přemístění probíhá ve všech stupních volnosti současně s průběhem zrychlení podle obr. 22.



Obr. 21 Počáteční poloha

Obr. 22 Průběh zrychlení

Segment programu nadepsaný VSTUPNÍ DATA realizuje načtení zadaných parametrů a jejich kontrolní tisk. Zadává se:

DT ... krok integrace /s/

R ... rozměry tabule /m/

A ... zrychlení jednotlivých stupňů volnosti /m.s⁻²/

SK ... konečná poloha tabule v prostoru
délky /m/, úhly /rad/

Segment nadepsaný ŘÍDÍCÍ ALGORITMUS má dvě části a realizuje průběh zrychlení zadaný podle obr. 22. Program zajišťuje a hlásí přechod pohybu v každé souřadnici z režimu zrychlení do režimu zpomalení v polovině její dráhy. Výpočet je ukončen, když se dosáhne požadované hodnoty přírůstku dráhy ve všech souřadnicích.

Segment nadepsaný HMOTOVÉ PARAMETRY počítá hmotnost přepravované tabule a její momenty setrvačnosti k jednotlivým osám.

Segment nadepsaný PRŮBĚH POHYBU počítá dráhu a rychlost rovnoměrně zrychleného pohybu podle vztahů:

$$\dot{s}_j(t) = \dot{s}_{j_0} + \ddot{s}_j \cdot t \quad (70)$$

$$s_j(t) = s_{j_0} + \dot{s}_{j_0} \cdot t + \frac{1}{2} \ddot{s}_j \cdot t^2 \quad (71)$$

přičemž je využito formální analogie mezi vztahy pro přímočarý a rotační pohyb.

Byla použita obdélníková metoda integrace a to pro její jednoduchost a pro malé nároky na operační paměť počítače. Její přesnost závisí na volbě integračního kroku. Při volbě $DT = 0,1$ pro tento ověřovací výpočet zcela vyhoví.

Segment nadepsaný DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ řeší vlastní dynamické zatížení tabule skla při pohybu. Výstup je proveden ve formě přehledné tabulky.

Program je setaven pro ověření algoritmu (kap. 6.2.) a jeho odladění na jednoduchém případě. Jeho podstatná část slouží jako stavební prvek do složitějších programů, které řeší dynamickou analýzu konkrétních manipulátorů.

7. OMEZUJÍCÍ ČINITELE

Cílem této kapitoly je nalezení omezujících podmínek pro manipulaci s tabulemi a na jejich základě určení maximálního povoleného zrychlení a rychlosti manipulace.

7.1. Nosnost manipulátoru

Nosností manipulátoru rozumíme maximální povolenou hmotnost manipulovaného předmětu včetně úchopového zařízení. Jak vyplývá z označení, má PR - 16P nosnost 16 kg a PR - 32E 32 kg. Z toho vyplývá, že PR - 16P nebude možno použít na manipulaci s tabulí I. (kap. 2.1.).

7.2. Namáhání savek

Savky mají přenést obě složky doplňkové dynamické síly, tj. složku kolmou i složku v rovině tabule skla. Těmito silám odpovídají síly savky - normálová a tečná, pro které platí

$$N = r^2 p \quad (72)$$

$$T = f N \quad (73)$$

kde je N ... normálová složka

T ... tečná složka

r ... poloměr savky

p ... podtlak v savce

f ... koeficient tření mezi savkou a sklem

Uvažujme nejnepříznivější případ, kdy se bude tabule pohybovat posuvným pohybem v rovině tabule. Pak pro maximální zrychlení, kterým se tabule může pohybovat, aniž by došlo k odtržení od savek, platí

$$a = \frac{n T}{m} \quad (74)$$

kde je n ... počet savek.

Pro běžně dostupné hodnoty $f = 0,6$; $p = 8 \cdot 10^4$ Pa;
 $n = 4$; $r = 0,05$ m pak pro tabulí I. dostáváme

$$a_I = 120,64 \text{ m.s}^{-2} \quad (75)$$

a pro tabuli II . dostáváme:

$$a_{II} = 502,65 \text{ m.s}^{-2} \quad (76)$$

7.3. Namáhání tabule skla

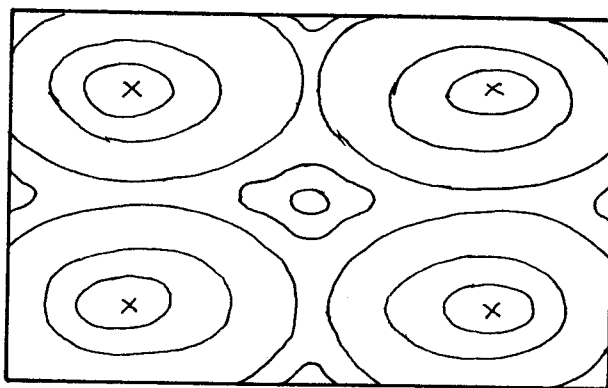
Při kontrole namáhání tabule skla budeme vycházet ze zjednodušujících předpokladů vysvětlených v kap. 4.2..

Dle lit. /17/ je mez pevnosti skla v ohybu $\sigma_{po} = 15 \text{ MPa}$. Při volbě koeficientu bezpečnosti K dostáváme ekvivalentní napětí

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{po}}{K} \quad (77)$$

ze kterého budeme vycházet při určení povoleného zatížení.

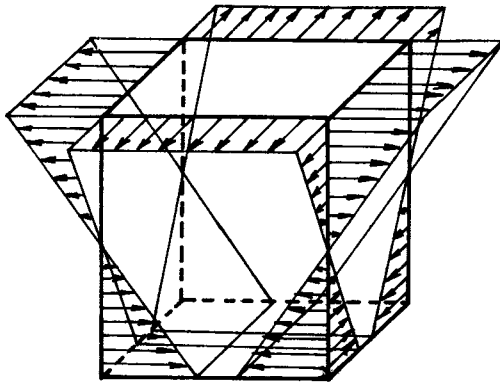
Průhybová plocha tabule dle obr. 15 je znázorněna na obr. 23.



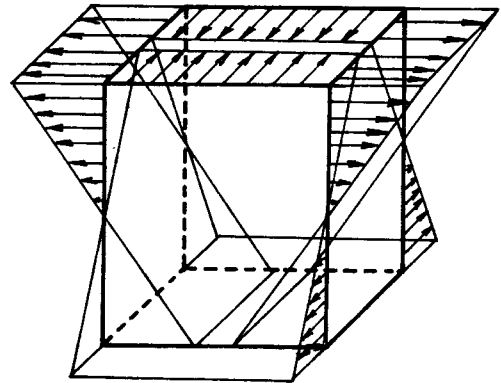
Obr. 23 Průhybová plocha

Je zřejmé, že plocha má pět lokálních extrémů a čtyři sedlové body. Způsob namáhání elementu desky v těchto bodech znázorňuje obr. 24. Namáhání v sedlovém bodě je nepříznivější, a proto se dále budeme zabývat napětím pouze v tomto bodě. Pro různá úchopová zařízení se však výpočet bude lišit.

a)



b)



Obr. 24 Namáhání elementu tabule: a) extrém
b) sedlový bod

7.3.1. Čtyři savky

Uvažujeme rozmístění savek a průběh zatížení dle kap. 4.2. Pro poměr napětí ve dvou na sebe kolmých směrech platí

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = P^2 \quad (78)$$

kde P je poměr stran tabule (vztah (10)). Ekvivalentní napětí podle metody HMM (9) pak dostáváme ve tvaru

$$\sigma_e = \sigma_a \sqrt{1 + P^2 + P^4} \quad (79)$$

kde σ_a je maximální povolené napětí ve směru strany a tabule. postupným dosazením vztahů (79), (7), (23), (20), (11) a vztahu

$$q = \frac{D_k}{a \cdot b} \quad (80)$$

dostáváme podmínku pro maximální povolenou kolmou složku doplňkové dynamické síly.

$$D_k = \frac{b h^2 \sqrt{\frac{1}{1 + P^2 + P^4}}}{3 a \left(\frac{2 - 1}{2}\right)^2} \sigma_e \quad (81)$$

7.3.2. Šest savek

V návaznosti na kap. 4.3. budeme postupovat analogicky jako v odstavci 7.3.1.. V tomto případě pro poměr dvou na sebe kolmých napětí platí

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = P^2 \left(\frac{2 - 1}{2}\right)^2 \quad (82)$$

Pro názornost budeme označovat výraz v závorce symbolem "C". Omezující podmínku pro D_k pak dostáváme ve tvaru

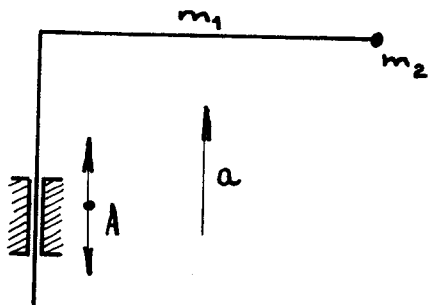
$$D_k = \frac{b h^2 \sqrt{\frac{1}{1 + P^2 C^2 + P^4 C^4}}}{3 a \left(\frac{2 - 1}{14}\right)^2} \sigma_e \quad (83)$$

Numerické zpracování výsledků z odstavců 7.3.1. a 7.3.2. je provedeno na číslicovém počítači. Výpis programu obsahuje příloha 3., výsledky ve formě tabulky obsahuje příloha 4..

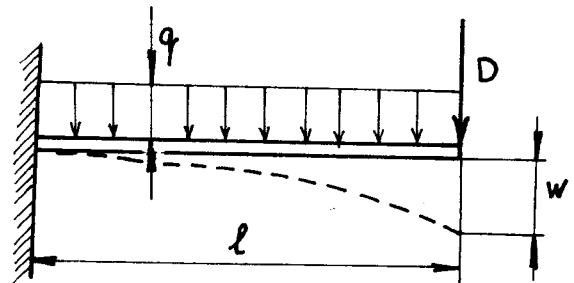
Závěrem kap. 7. lze konstatovat, že jediným omezením pro přemístění tabulí jsou pohybové možnosti manipulátoru, jeho maximální rychlosti a zrychlení.

8. PRUŽNOST KONSTRUKCE

Problémem řízení robotu z hlediska pružnosti konstrukce se budeme zabývat pouze na zjednodušeném případě dle obr. 25.



Obr. 25 Rameno robotu
A ... výsuv sloupu
 m_1 ... hmota ramene
 m_2 ... hmota zápěstí



Obr. 26 Vetknutý nosník

Sledujme chování ramene robotu při výsuvu sloupu se zrychlením a . Rameno můžeme nahradit vetknutým nosníkem zatíženým spojitým zatížením q a osamělou silou D (obr. 26), pro které platí

$$D = m_2 a \quad (84)$$

$$q = \frac{m_1}{l} a \quad (85)$$

Pro průhyb konce nosníku lze Mohrovou metodou odvodit

$$w = \frac{1}{EJ} \left(\frac{1}{3} D l^3 + \frac{1}{8} q l^4 \right) \quad (86)$$

kde součin EJ je pro daný nosník konstantní a vyjadřuje tuhost nosníku.

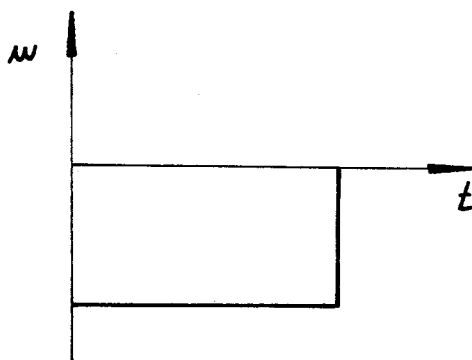
Z uvedených vztahů vyplývá, že výchylka z rovnovážné polohy w závisí na zrychlení pohybu lineárně. Budeme-li uvažovat vnitřní tření, dostáváme analogii se soustavou pružina - tlumič, pro kterou platí diferenciální rovnice II. řádu

$$\ddot{w} + a_1 \dot{w} + a_0 w = -b u \quad (87)$$

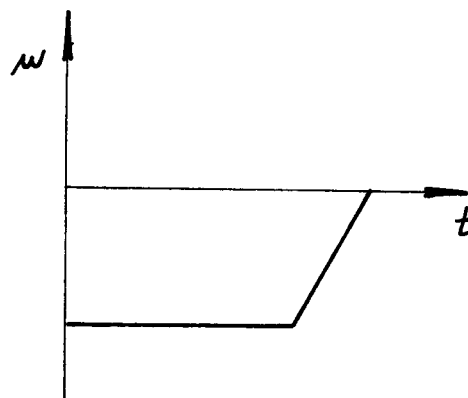
kde koeficienty a_1, a_0 vyjadřují vlastnosti ramene robotu (tuhost a tlumení) a akční veličina u je lineárně závislá na zrychlení výsuvu sloupu.

Zabývejme se případem, kdy se rameno pohybuje s konstantním zrychlením (zpomalením) a průhyb ramene je roven ustálené hodnotě $w = w(\infty)$. Máme určit průběh zrychlení tak, aby přechodný děj do nového ustáleného stavu $u = 0, w = 0$ proběhl v nejkratším čase. Teoreticky tento děj trvá nekonečně dlouho, stanovíme si proto podmínku $|w| \leq \xi$, kterou lze splnit v reálném čase.

Příloha /5./ obsahuje výpisy programů a jejich výsledky pro skokový průběh zrychlení (obr. 27) a pro průběh s omezenou derivací zrychlení (obr. 28).



Obr. 27 Průběh zrychlení



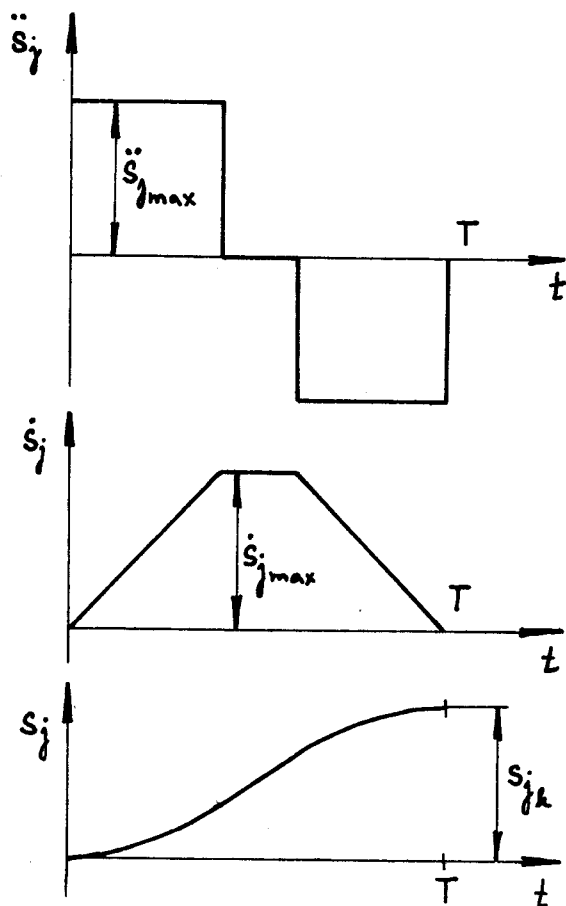
Obr. 28 Průběh zrychlení

Výsledky ukazují, že je výhodné použít nějaké optimální omezení derivace zrychlení. Toto omezení je třeba určit pro konkrétní ramenorobotu, jehož vlastnosti je třeba znát.

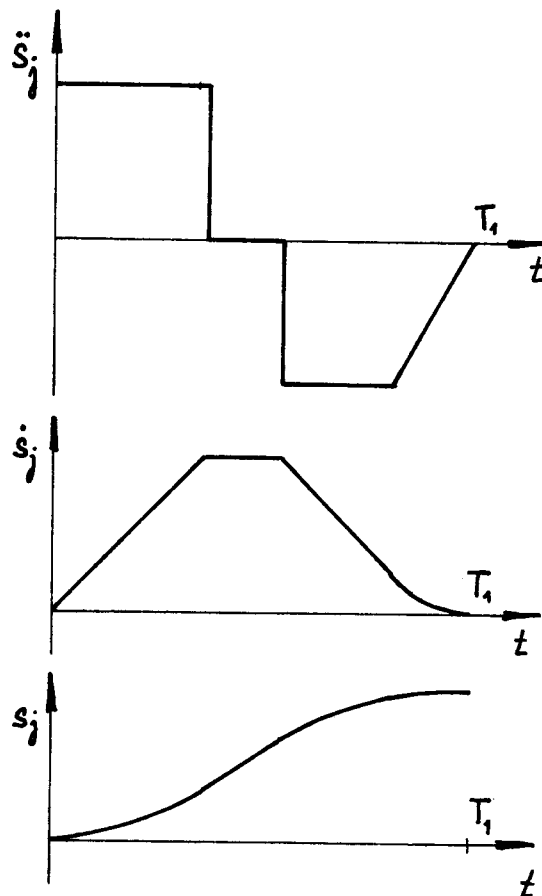
9. OPTIMÁLNÍ ŘÍZENÍ

Pro daný případ manipulace je výhodné použít bodové řízení (PTP), neboť vyžadujeme splnění zadané počáteční a konečné polohy, přičemž nám nezáleží na trajektorii pohybu.

Mějme j -tý stupeň volnosti libovolného manipulátoru, kterému odpovídá obecná souřadnice s_j . Máme dráhu danou přírůstkem této souřadnice s_{jk} překonat za minimální čas T při počátečních a konečných podmínkách $\dot{s}_j = \ddot{s}_j = 0$ a současném respektování omezení $\dot{s}_j \max, \ddot{s}_j \max$. Tyto požadavky splňuje průběh zrychlení \ddot{s}_j podle obr. 29, případně při uvažování pružnosti konstrukce podle obr. 30.



Obr. 29 Průběh pohybu



Obr. 30 Průběh pohybu

V obou případech musí být splněny podmínky počáteční i konečné, musí tedy platit:

$$\int_0^T \ddot{s}_j dt = 0 \quad (88)$$

$$\int_0^T \dot{s}_j dt = s_{jk} \quad (89)$$

Budeme řídit všechny stupně volnosti manipulátoru současně a při tom relativně nezávisle zadáváním požadované hodnoty s konstantním zrychlením (obr. 29, resp. obr. 30). Pohyb ve všech stupních volnosti bude probíhat ve stejném časovém intervalu $\langle 0 ; T \rangle$.

10. DYNAMICKÁ ANALÝZA

Přílohy 6. a 8. obsahují výpisy programů, které jsou ukázkou použití teorie z kap. 6.2. na řešení dynamické analýzy konkrétní struktury robotů PR - 16P a PR - 32E (obr. 17 a 18). Programy jsou formálně shodné, liší se pouze použitím konkrétních vztahů odpovídajících dané struktuře, a proto popis bude obecný a bude se týkat obou.

Programy umožňují simulovat přemístění tabule skla mezi dvěma technologickými polohami, přičemž tento pohyb lze rozdělit do několika na sebe navazujících částí. Příkazem DATA se zadávají rozměry tabule a omezení rychlostí a zrychlení jednotlivých stupňů volnosti (obr. 2). Vstupní data pak jsou:

N ... počet dílčích pohybů
CS (N+1,5) ... krajní polohy a mezipolohy
TT (N) ... požadované časy dílčích pohybů
PK (N) ... počet kroků integrace

Pokud čas TT (j) nestačí na provedení daného přemístění za omezení rychlosti a zrychlení, programy hlásí minimální možný čas a simulují pohyb v tomto čase. Průběh pohybu odpovídá obr.29.

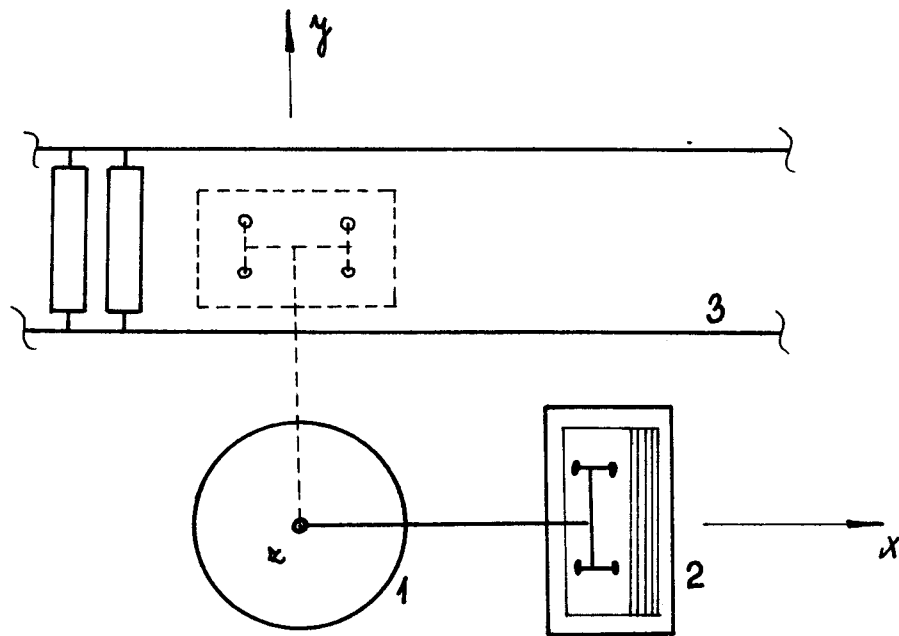
Výstupy programů jsou uvedeny v přehledných tabulkách, kde jsou uvedeny:

poloha tabule v pevném souřadném systému O (x, y, z)
poloha tabule v souřadném systému robotů
hnací síly jednotlivých stupňů volnosti
dynamické zatížení tabule skla.

Poznámky tvoří nadpisy jednotlivých segmentů a vystihují výpočet prováděný v daném segmentu, proto je zbytečné toto zde podrobněji rozebírat.

V přílohách 4. a 6. jsou uvedeny ukázky výsledků simulace přemístění tabule skla ze stojanu na linku (obr. 31) a zpět. Pohyb je rozložen do tří fází: odklopení, přemístění a polohování. Jsou požadovány minimální doby přemístění.

POZOR ! Při požadavku na minimální čas nelze zadat do vektoru TT nulový prvek, není hlídáno při dělení!



Obr. 31 Přemístění tabule skla: 1 - manipulátor
2 - stojan
3 - linka

11: ZÁVĚR

Tato práce se zabývá kinematickou a dynamickou analýzou a návrhem časově optimálního řízení PRaMů a posouzením jejich použitelnosti pro manipulaci s tabulovým sklem. Při tom se zaměřuje na roboty československé výroby PR - 16P a PR - 32E.

Průmyslový robot je výrazně nelineární dynamický systém. Jeho kinematická a dynamická analýza je nezastupitelná ve všech časových etapách jeho vývoje i při rozhodování o jeho využití na konkrétním pracovišti ve výrobním procesu.

Jsou posuzovány jak kinematické a dynamické možnosti daných robotů, tak i dovolené namáhání úchopového zařízení a manipulovaného předmětu.

Na základě získaných výsledků je možno doporučit použití robotu PR - 32E s úchopovým zařízením se čtyřmi savkami s těchto důvodů:

- a/ nosnost robotu je dostatečná
- b/ elektrické stejnosměrné motory typu MEZOMATIC, které jsou použity jako pohony robotu, a řídicí systém robotu umožňují realizovat navržený způsob řízení.

V úvahu je však nutno vzít i to, že nosnost robotu nebude využita. To znamená, že energetická náročnost neodpovídá skutečnému výkonu.

Z mechanického hlediska je PR - 16P možno doporučit k použití na manipulaci pouze s tabulí II. Realizace navrženého způsobu řízení by si však vyžádala konstrukční úpravy jak na pohonech robotu, tak zejména na řídicím systému. Z těchto důvodů se použití PR - 16P nedoporučuje.

SEZNAM POUŽITÉ A DOPORUČENÉ LITERATURY

- /1/ BRADSKÝ Z. - JÁČ V.: Mechanika II. - Kinematika. Skripta
- /2/ BRADSKÝ Z. - VRZALA R.: Mechanika III.- Dynamika. Skripta
- /3/ PRUSKURJAKOV P. - OLEHLA M. - TIŠER J.: Základy numeric-
kých metod a programování I.
(Programová učebnice). Skripta
- /4/ SUVA M. - NEUMAN P.: Řízení robota a jeho dynamické
namáhání. IN: Automatizace, 1981,
č. 8-9, s. 222-224
- /5/ BURDA J. - KOVÁČ M.: Priemyselné roboty. Bratislava,
Alfa 1976
- /6/ Sborník statí: Distancionno upravljajuje roboti
- manipulatori. Moskva, Mir 1976
- /7/ MATIČKA R. - TALÁCKO J.: Manipulátory, průmyslové roboty.
Skripta, Praha, ČVÚT 1978
- /8/ MEDVĚDĚV V. S. - LESKOV A. G. - JUŠČENKO A. S.: Sistemy
upravlenia manipuljacionnyh ro-
botov. Moskva, Nauka 1978
- /9/ HAVEL I.: Robotika. Úvod do teorie kognitiv-
ních robotů. Praha, SNTL 1980
- /10/ KOLAKOV F. M.: Supervizionye upravlenie manipu-
lacionnymi robotami. Moskva, Nauka
1980
- /11/ MATIČKA R. - TALÁCKO J.: Konstrukce manipulátorů a průmys-
lových robotů. Praha, SNTL 1980
- /12/ VOLMAR J.: Industrierroboter. Berlín, VEB Ver-
lag Technik 1981
- /13/ NEUMAN P.: Optimální řízení průmyslového ro-
bota. Automatizace 1980, č. 6
- /14/ Časopisy: Industrial Robot. Velká Británie
- /15/ MATIČKA R. - TALÁCKOJ.: Mechanismy manipulátorů a průmys-
lových robotů. Praha, SNTL 1980
- /16/ BAREŠ R.: Tabulky pro výpočet desek a stěn.
č. 7, 1982, ročník 32
- /17/ Sklář a keramik

SEZNAM PŘÍLOH

1. Výpis programu ROB1
2. Výsledky programu ROB1
3. Výpis programu pro výpočet omezení
4. Výsledky programu pro výpočet omezení
5. Programy a jejich výsledky řešící problém pružnosti konstrukce
6. Výpis programu ROB3
7. Výsledky programu ROB3
8. Výpis programu ROB4
9. Výsledky programu ROB4

První část

1. část 7. 11. 1938

První část 7. 11. 1938

Na účinně nastolení v... v...
či... s... v... v... v...

v... v...

v... v... v...

První část 7. 11. 1938

v... v... v...
v... v... v...

1. Introduction

2. Methodology

The first part of the report describes the background of the study and the objectives of the research. It also outlines the scope of the study and the limitations of the research.

The second part of the report describes the methodology used in the study. It includes a description of the research design, the data collection methods, and the data analysis techniques.

The third part of the report presents the results of the study. It includes a description of the data, the statistical analysis, and the findings of the research.

The fourth part of the report discusses the implications of the findings and provides recommendations for future research. It also includes a conclusion and a list of references.

The fifth part of the report is a summary of the findings and a list of references. It includes a conclusion and a list of references.

... ..
... ..
... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..
... ..

... ..

... ..
... ..
... ..

