

Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Robotika

Prof. Ing. Ladislav Jurišica, PhD.
Doc. Ing. Peter Hubinský, PhD.
Ing. Ján Kardoš, PhD.

2005

1. ÚVOD	5
2. ZÁKLADNÉ POJMY ROBOTIKY	9
2.1 Definícia robota	9
2.2 Priemyselný robot	11
3. SENZOROVÝ SUBSYSTÉM ROBOTA	14
3.1 Snímače vnútornej informácie	14
3.2 Snímače vonkajšej informácie	15
3.2.1 Lokačné systémy	16
3.2.2 Vizuálne systémy	18
3.2.3 Taktilné snímače	19
3.2.4 Snímače sily a momentu	20
4. VÝKONNÝ SUBSYSTÉM ROBOTA	23
4.1 Kinematika manipulátora	31
4.1.1 Matice otočenia	31
4.1.2 Homogénne súradnice a transformačné matice	34
4.1.3 Homogénne transformačné matice viacerých pohybov	36
4.1.4 Vplyvy nepresnosti modelu	36
4.2 Pohonné systémy robotov	37
4.2.1 Hydraulické systémy	38
4.2.2 Pneumatické systémy	39
4.2.3 Elektrické systémy	40
4.3 Úvod do projektovania výkonného systému	40
4.3.1 Vstupné údaje pre projektovanie PR	40
4.3.2 Energetický návrh pohonného systému	41
5. CHARAKTERISTIKY ROBOTOV	44
5.1 Dosiahnuteľnosť	44
5.2 Manipulatívnosť	46
5.3 Presnosť	47
5.3.1 Presnosť polohovania rovinného mechanizmu	50
5.3.2 Chyby v dôsledku pružnosti systému	50
5.4 Mobilnosť	51
5.5 Zrýchľiteľnosť	51
5.6 Poddajnosť	51
5.7 Mnemotechničnosť	51
5.8 Ekonomičnosť	52
5.9 Dynamika	52
6. NÁVRH ŠTRUKTÚR A PARAMETROV SERVOSYSTÉMOV ROBOTOV	53
6.1 Koncepce štruktúr servosystémov	53
6.2 Statické zaťaženie manipulátora	55
6.3 Vyvažovanie síl tiaže	56
6.4 Vplyv záťažného momentu	58
6.5 Vplyv zmien momentu zotrvačnosti	60
6.6 Pružné členy vo výkonovom reťazci	61
7. ROBUSTNÉ SYSTÉMY S PREMENLIVOU ŠTRUKTÚROU	64
8. MOBILNÉ ROBOTY	78
8.1 Štruktúry podvozkov mobilných robotov	78
8.2 Matematický model robota v globálnom súradnicovom systéme	80
8.3 Kinematická analýza jednotlivých typov kolesových podvozkov	81

8.3.1	Diferenciálny pohon	81
8.3.2	Bicyklový podvozok	82
8.3.3	Trojkolka s predným náhonom	83
8.3.4	Ackermanov podvozok	83
8.3.5	Podvozok so synchronným pohonom	85
8.3.6	Podvozok s tromi všesmerovými kolesami	85
8.4	Kráčajúce roboty	87
8.5	Riadenie polohy mobilných robotov	88
9.	RIADIACE SYSTÉMY ROBOTOV	91
9.1	Klasifikácia riadiacich systémov	92
9.2	Riadenie činnosti robotov	92
9.3	Účasť operátora na riadení	94
9.4	Skupinové riadenie robotov	94
9.5	Kvalita riadenia pohybu robotov	95
10.	RIADIACE SYSTÉMY GENERÁCIÍ ROBOTOV	98
10.1	Riadenie robotov prvej generácie	98
10.2	Riadenie robotov druhej generácie	105
10.3	Riadenie robotov tretej generácie	107
10.4	Programovanie robotov	109
10.5	Plánovanie trajektórie pohybu robota	111
10.6	Logické riadenie robotov	115
11.	INVERZNÁ KINEMATICKÁ ÚLOHA	117
11.1	Presné a približné metódy	117
11.2	Technická realizácia	120
12.	HODNOTENIE KVALITY ROBOTOV	122
12.1	Experimentálne overenie vlastností robotov	122
12.2	Presnosť polohovania	123
12.3	Moment zotrvačnosti	124
13.	APLIKÁCIE ROBOTOV	126
14.	LITERATÚRA	133

1. ÚVOD

Vývoj ľudskej spoločnosti prechádza zmenami, ktoré sú vyvolané súborom faktorov. Výrazne sa posilňuje význam vzdelania, využitia informácií, objektivizácie riadenia, zvyšovanie efektívnosti, ochrana prostredia a pod.

V posledných desaťročiach sa podmienky vo sfére práce rýchle a výrazne menia. Na jednej strane existuje v praxi veľká rôznorodosť zamestnaní a na druhej strane prebieha špecializácia činností, pričom zároveň dochádza k ich rýchlej zmene. Prax vyžaduje stále viac vysokú úroveň prípravy pracovníkov so spojením teoretickej a odbornej prípravy. Vzhľadom na uvedené sa vyžadujú flexibilné študijné programy umožňujúce uskutočňovať všeobecnú, viacúčelovú a interdisciplinárnu prípravu s nasledujúcou špecializáciou v úzkom vzťahu s praxou. Podstatnou je flexibilita absolventov, schopnosť prispôbiť sa požiadavkám trhu práce. Vyžaduje sa preto širšie vzdelanie v odbore. Významné sa stáva celoživotné vzdelávanie, obnovovanie kvalifikácie, osvojovanie si nových informácií a získavanie nových zručností. Investície do vzdelania sú najefektívnejšími investíciami vôbec. Príprava pracovníkov na nasadzovanie a prevádzku systémov je jednou z rozhodujúcich úloh pre úspešné zavedenie a prevádzku moderných automaticky pracujúcich systémov.

Pre technické systémy má mimoriadny význam objektivizácia riadenia procesov, ktorá je možná dlhodobo len v automaticky pracujúcich systémoch za predpokladu, že o riadenom objekte je dostatok objektívnych informácií a sú zostavené a implementované príslušné algoritmy riadenia. Získavanie, prenos a spracovanie informácií pre riadenie procesov je známou definíciou úloh systémov riadenia. Automatické systémy riadenia sú nasadzované vo výrobe, v medicíne, vo výskume, v službách, atď. Mnohé procesy bez automatického riadenia pritom nemôžu vôbec existovať. Vývoj riadiacich systémov bol od jednoduchých systémov (z dnešného pohľadu), kde sa používali riadiace členy (regulátory) s jednoduchými algoritmami, s malým počtom meraných veličín, so žiadnou alebo minimálnou možnosťou prispôbenia sa zmenám vlastností systému alebo pôsobiacich vonkajších vplyvov. Dnešné systémy sú v prevažnej miere realizované s počítačovými riadiacimi členmi, kde algoritmy riadenia sú realizované programovo, čo umožňuje ich zmenu počas činnosti systému. Okrem toho systémy sú navzájom pospájané, vytvárajú sa osobitné sieťové prostredia riadiacich systémov, ktoré pracujú v reálnom čase. Tento vývoj viedol k tomu, že v automaticky pracujúcich riadiacich systémoch sa spájajú riadiace a informačné technológie, aplikujú sa kybernetické prístupy, stále viac sa nasadzujú metódy vychádzajúce z princípov umelej inteligencie.

Algoritmy riadenia musia pritom zabezpečiť predovšetkým stabilitu procesov a požadovanú kvalitu procesov. Kvalita procesov sa priamo odráža v kvalite výstupnej produkcie, ale i v spotrebe energie, materiálu, dĺžke trvania procesov a pod.

V automatizácii priemyselných systémov sa v súčasnosti zabezpečuje:

- flexibilita výroby
- trvalý rast produktivity
- zlepšovanie akosti výrobkov
- znižovanie celkových nákladov
- zvyšovanie spoľahlivosti a bezpečnosti prevádzky systémov.

V riadení technologických a výrobných procesov sa prešlo k tzv. pružným výrobným systémom s použitím počítačov v riadiacich štruktúrach. Pružná výroba, ako objekt projektovania a riadenia, je špecifická predovšetkým zložitou, komplexnosťou

a mnohofunkčnosťou komponentov. Jedným zo základných princípov zabezpečujúcich typizáciu riešení je princíp modularity, v súlade s ktorým sa systém skladá z jednotlivých typových modulov a podsystémov. Riadiaci systém obvykle: plánuje výrobu, vybratie a riadenie vykonávania skupinových úloh, kontrolu zaťaženia (využitia) strojov, usporiadanie vykonania základných výrobných operácií.

Uvedené zmeny sa mohli uskutočniť vďaka rozvoju:

- softvérových systémov
- komunikačných a sieťových technológií
- metód diagnostiky
- nástrojov pre plánovanie a rozhodovanie a znalostných systémov.

V tomto predmete je venovaná pozornosť predovšetkým výrobným systémom. Vo výrobných systémoch prebiehajú viaceré procesy. Delenie procesov môže byť podľa rôznych hľadísk. (V ďalšom sa venujeme technologickým procesom, pokiaľ nebude uvedené, že ide o iné procesy.) Jedným z nich je kontinuita procesov. Hovorí sa o diskretných procesoch, spojitých procesoch alebo hybridných procesoch.

Diskretný proces sa charakterizuje postupnosťou vykonávania operácií. Vo výrobe sú technologické operácie a pomocné operácie. **Technologické operácie** tvoria súbor činností, ktoré menia vlastnosti objektu (priame spracovanie materiálov, napr. brúsenie, zváranie a pod.) **Pomocné operácie** tvoria súbor činností, ktoré vedú k zmene polohy a orientácie (napr. nakladanie, vykladanie, založenie, odstránenie odpadu). V prvej etape vývoja sa automatizujú technologické operácie a neskôr pomocné. V diskretných procesoch sa technologický proces prerušuje na čas potrebný na vykonanie pomocných operácií. Systémy v ktorých prebiehajú diskretné procesy sa nazývajú aj udalostné systémy. Diskretné procesy sú napr.: obrábanie, montáž, zváranie, striekanie, obsluha, lepenie, meranie, skladovanie.

Spojité proces sa v procese výroby neprerušuje. Transportné operácie sú bezprostredné – spojitý. Typické procesy sú chemické, tepelné a pod.

Hybridné procesy obsahujú oba typy procesov. V podstate každý diskretný proces je hybridný, vzhľadom na to, že v ňom sú nielen udalosti, ale prechod z jednej udalosti na druhú prebieha určitý čas. Podobne v spojitých procesoch sa vyskytujú udalosti, medzi ktorými prebieha proces spojitý.

V každej výrobe sú materiálové toky, informačné toky, energetické toky. Riadenie procesov sa dotýka všetkých týchto tokov. **Integrovaný pružný výrobný proces** je dobre vyvážený systém materiálových a informačných tokov, ktorý umožňuje vyrábať želané množstvo výrobkov želanej kvality v určitom čase v súlade s požiadavkami zákazníka. Ak neexistuje plná integrácia používa sa lokálna optimalizácia, ktorá potom obvykle komplikuje koordinovanú činnosť systému, komplikuje výrobu a znižuje jej efektívnosť.

Pri tradičnom prístupe k vytvoreniu automatizovaných výrob sa najčastejšie používa sériový prístup. Hlavná pozornosť sa pritom venuje výberu a návrhu elementárnych technológií vo forme tzv. „ostrovov automatizácie“ s postupným narastaním funkcií automatizovanej výroby. Hlavným problémom je potom obvykle rozšírenie systému spojené s ďalšími elementárnymi technológiami. Najväčšou prekážkou rozšírenia systému je nedostatočná štandardizácia prostriedkov spracovania materiálových tokov a neexistencia interfejsov pre zariadenia a informačné toky.

Systémový prístup vytvorenia automatickej výroby je založený na paralelno-iteračnej metóde rozvoja systému. Paralelne sa riešia celosystémové otázky a otázky elementárnych pružných

technológií. Obe skupiny sa upravujú v iteračnom režime pre optimalizáciu celku. Celosystémové prístupy majú určený objekt sledovania (komplexnú pružnú technológiu), špecifickú organizačnú osnovu, charakteristickú metodologickú základňu, rôznorodý súbor prostriedkov systémovej analýzy vo forme prostriedkov modelovania, prijatia riešenia, riadenia.

Obecným princípom rozvoja výrobnéj techniky je **integrácia** všetkých funkcií výroby pomocou **počítačovej informačnej siete**. Spolu s tým pokračuje tendencia k zníženiu objemu skupín výrobkov a rozšírenie nomenklatúry výrobkov vyrábaných podľa individuálnych požiadaviek zákazníka. Vzrastá objem malosériovej výroby, ktorá musí byť pružná, schopná rýchleho preladenia na výrobu iných výrobkov. V modernej výrobe sa výrazne uplatňujú systémy, v ktorých sú aplikované číslicové počítače. Tieto z hľadiska riadenia musia pracovať v reálnom čase. Niektoré úlohy však môžu byť riešené aj v režime úloh tzv. voľného času.

Často sa vyskytuje označenie:

CAD – Computer Aided Design – počítačová podpora navrhovania výrobkov a tvorby konštrukčnej dokumentácie,

CAE – Computer Aided Engineering. Systémy CAE sú orientované na analýzy, projektovanie a optimalizáciu výroby ako celku s čo najvyšším ekonomickým efektom. Významnou zložkou CAE je aj plánovanie rozdeľovania a využívania výrobných zdrojov. Ide o používanie počítačov a NC riadenia na generovanie výrobné orientovaných údajov a priame riadenie výrobného procesu.

CAM – Computer Aided Manufacturing – počítačom podporované riadenie výroby

CAD/CAM – integrácia počítačovej technológie do predvýrobných a výrobných etáp výrobného procesu

CAQ – Computer Aided Quality Check – riadenie akosti produkcie

CAPP – Computer Aided Process Planning – plánovanie výroby, počítačová podpora pri spracovaní technologickej dokumentácie

CAPPS (Computer Aided of Production Planning System) - počítačová podpora systémov plánovania a riadenia výroby

CAT – Computer Aided Testing – počítačom podporované meranie a testovanie

CARC - Computer Aided Robot Control - počítačová podpora riadenia a programovania robotov a manipulátorov.

CATS - Computer Aided Transport and Store - počítačová podpora riadenia medzioperačnej dopravy a skladovania,

CIM – Computer Integrated Manufacturing – počítačom integrovaná výroba. Ide o automatizáciu všetkých činností od tvorby výrobku až po jeho expedíciu (konštruovanie výrobkov, zostavenie technologických postupov, plánovanie výroby, operatívne riadenie, výrobu súčiastok, inšpekciu, montáž, balenie, expedíciu a pod.). Objavuje sa skratka CHIM na označenie systémov CIM, v ktorých zostali ešte rozhodovacie činnosti pre operátora. Riešia sa tým extrémne vysoké náklady na zavedenie CIM.

CAPE - Computer Aided Production Engineering - počítačová podpora výrobného inžinierstva, je subsystémom systému CIM a zahŕňa počítačovú podporu všetkých činností spojených s realizáciou samotnej výroby výrobku (programovanie výrobnéj techniky, obslužných, dopravných a skladovacích zariadení, meranie, skúšanie a diagnostika súčiastok a zhotoveného výrobku).

CAA – Computer Aided Assembly – počítačom podporovaná montáž výrobkov

CAMA - Computer Aided Maintenance - počítačová podpora údržby technických zariadení,

NC – Numerical Control – číslicové riadenie strojov, na základe informácie uloženej na nosiči.

CNC – Computerized Numerical Control – počítačové číslicové riadenie. Ide o riadiace systémy s riadiacim počítačom.

Systémy riadenia s využitím počítačových sietí tvoria vo všeobecnosti hierarchické systémy s viacerými úrovňami riadenia. Najjednoduchší model predpokladá 3 úrovne: technologickú, organizačnú a ekonomickú. Používa sa aj rozdelenie oblastí aplikácií podnikových sietí na tri vrstvy (sféry) – informačnú, riadiacu a technologickú. Informačná vrstva je určená pre tok dát z a do dátových serverov a pre napojenie riadiacich systémov do podnikovej informačnej siete pre potreby manažmentu podniku a pod. Riadiaca vrstva slúži na prepojenie riadiacich systémov alebo vzdialených modulov medzi sebou a na prenos dát do osobných operátorských panelov a osobných počítačov s vizualizačným softverom. Technologická vrstva je určená na pripojenie riadiacich systémov, distribuovaných vstupov a výstupov, snímačov, meničov frekvencie, stykačov, ochrán motorov, a pod. Možno sa stretnúť aj s označením podniková vrstva namiesto informačná vrstva, prevádzková vrstva namiesto technologická. Niekedy sa riadiaca vrstva označuje ako procesná.

Veľmi dôležitý je návrh vizualizačných funkcií. Nemali by obsluhu „prekážať“, nemali by opakovať informáciu, ktorú operátor zisťuje svojimi zmyslami priamo – mali by byť predovšetkým radcom. Pri ich tvorbe je dôležité vychádzať z požiadavky dodržania jednoduchosti a prehľadnosti zobrazenia informácie.

Dôležitou funkciou systému je diagnostika. Diagnostické systémy jednak pomáhajú zvyšovať kvalitu výroby a jednak prispievajú k predĺženiu životnosti výrobných zariadení a zvyšovaniu efektivity výroby. Diagnostika slúži ako nástroj vyhodnotenia kvalitatívnych ukazovateľov chodu stroja a v neposlednom rade i vyhodnocovania kvality práce obsluhy s cieľom zlepšovať ju.

V riadení materiálových tokov vo výrobe, ale i v iných aplikáciách sú potrebné roboty. Ich použitie narastá s tým, ako sa zvyšujú požiadavky na automatizáciu diskretných procesov spojených s riadením najrôznejších pohybových úloh.

2. ZÁKLADNÉ POJMY ROBOTIKY

Rozvoj automatizácie výroby, ale i ďalšie aktivity vyžadujú použitie robotov. Roboty v prvom počiatku boli nasadzované do výroby, neskôr i do iných oblastí (výskumu, medicíny, servisných činností a pod.). Niektoré činnosti nemožno bez robotov vôbec automatizovať alebo vôbec realizovať. Základné prínosy robotizácie možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- ekonomické prínosy: zvýšenie výrobnosti, zvýšenie kvality, zníženie nepodarkovosti, úspora výrobných plôch, úspora pracovných síl,
- technické prínosy: zvýšenie úrovne automatizácie, rozvoj progresívnych odborov, zvýšenie technologickej disciplíny
- odstránenie namáhavých, monotónnych a nebezpečných pracovných činností, lepšie využívanie ročného času výroby.

Robotika je definovaná ako vedná disciplína venovaná funkcii, stavbe, hodnoteniu a aplikáciám robotov. **Teoretická a experimentálna robotika** sa venuje základným otázkam činnosti robotov, **aplikovaná robotika** sa zaoberá vývojom, konštrukciou a aplikáciami robotov, **priemyselná robotika** sa venuje metódam opisu výrobných procesov, objektov robotizácie, vytvoreniu priemyselných robotov a prvkovej základne, rozpracovaniu robotických technológií, vytvoreniu robotických komplexov a zostaveniu systémov riadenia robotizovanej výroby.

2.1 Definícia robota

Termín „robot“ použil K.Čapek v roku 1920 v svojej práci „RUR“. Boli ním označení „mechanickí pracovníci“, ktorí mali nahradiť ľudí pri ťažkej práci. Termín „priemyselný robot“ sa začal používať v 70. rokoch 20. storočia. Prvý priemyselný robot Versatran bol vyrobený firmou AMF v roku 1962.

Pojem robot je vysvetľovaný rôzne. Obvykle sa od robota vyžaduje schopnosť premiestnenia, schopnosť vzájomného pôsobenia s vonkajšími objektmi, väčší počet stupňov voľnosti, schopnosť adaptácie, rozpoznávania obrazov a ďalšie vlastnosti. Uvádza sa, že robot je zložitý systém so snímačmi, na získavanie informácií z okolitého prostredia, výkonnými mechanizmami pôsobiace na objekty v okolí, ktorý je schopný pracovať tak, aby splnil určené úlohy aj v premenlivom prostredí. Od iných systémov, použitých pri spracovaní vonkajšej informácie a tvorbe riadiacich príkazov sa roboty líšia tým, že môžu prijímať z okolia podobné informácie ako operátor a vykonávať zložité priestorové pohyby. Schopnosť riešiť zložité a rozličné úlohy bez zmeny štruktúry systému zaraďuje roboty k viacúčelovým systémom. Ak má byť robot vo vyžadovanej interakcii s prostredím musí:

- vnímať a rozpoznávať prostredie,
- vytvárať a priebežne prispôbovať model prostredia
- na základe poznania prostredia a v súlade s určeným cieľom rozhodnúť o spôsobe dosiahnutia cieľa,
- ovplyvňovať prostredie, manipulovať s predmetmi, prípadne sa pohybovať v prostredí
- komunikovať s človekom.

Roboty sú obvykle rozdelené do na roboty manipulačné, roboty mobilné, roboty informačné a riadiace, roboty komplexné.

Manipulačné roboty umožňujú manipuláciu s predmetmi, nahrádzajú niektoré funkcie ľudských rúk. Ekonomická komisia pre Európu v rámci OSN definuje robot ako automatický, polohovo riadený, preprogramovateľný mnohofunkčný manipulátor s niekoľkými osami pohybu, schopný manipulovať s materiálom, súčiastkami, nástrojmi alebo špecializovanými

prípravkami na základe variabilných programových operácií pri vykonávaní rôznych úloh. Robot má často formu jedného alebo viac ramien zakončených zápästím.

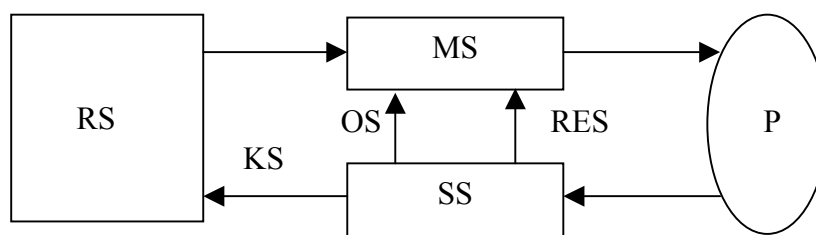
Riadenie týchto robotov môže byť automatické alebo biotechnické. **Automatické roboty** pracujú bez zásahu človeka. Operátor riadi robot len v niektorých fázach činnosti. **Biotechnické roboty** sú riadené operátorom. Tieto môžu byť s miestnym alebo diaľkovým riadením. Biotechnické riadenie sa uplatňuje aj v automaticky pracujúcich systémoch pri uvádzaní do prevádzky, opravách a pod. Systémy s diaľkovým riadením sa nazývajú aj **teleroboty**.

Mobilné roboty môžu byť kolesové, pásové, lietajúce, plávajúce, atď. Uvedené delenie vychádza z prevládajúceho spôsobu zabezpečenia pohybu mobilného robota. Na mobilnom robote môže byť umiestnený manipulačný robot čím vzniká tzv. **mobilný manipulačný robotický systém**. Mobilná platforma ako aj prípadný manipulačný systém môže mať automatické alebo biotechnické riadenie.

Informačné a riadiace roboty sú meracie, informačné a riadiace prostriedky, ktoré automaticky získavajú, spracúvajú a prenášajú informácie. Uvedené systémy sa používajú v priemysle pri skupinovom nasadení robotov, pri výskume pod vodou, v kozme a pod.

Komplexné roboty sú zložené aspoň z dvoch typov uvedených robotov. Osobitnou skupinou sú servisné roboty.

Základná bloková schéma robota z pohľadu získania, prenosu a spracovania signálu na riadenie robota je na obr.2.1.



Obr. 2.1 Štruktúrna schéma robota ako kybernetického systému

SS - senzorový systém: receptory, spracovanie a výber dát; MS - motorický systém: realizátor plánu, efekторы; RS - riadiaci systém: vnímanie a chápanie, model prostredia, riešenie a plánovanie úloh; P - prostredie; KS - kognitívna slučka; OS - operačná slučka; RES - reflexná slučka.

V uvedenej schéme je uvažované selektívne spracovanie informácií z prostredia. **Reflexná slučka** využíva priamo informácie zo snímačov na riadenie výkonných členov systému, patria do nej aj regulačné obvody servosystémov. V **operačnej slučke** môže ísť o adaptívne riadenie, využívajú sa predspracované údaje. V **kognitívnej slučke** sa vychádza z uplatnenia princípov umelej inteligencie. Je tam tvorený model prostredia, uskutočňuje sa riešenie úloh a plánovanie činnosti.

Osobitosti robota ako technického systému sú v tom, že má viac osí pohybu, jeho koncový bod a jednotlivé členy vykonávajú zložité trajektórie pohybu v priestore, na riadenie potrebuje hierarchický riadiaci systém, ktorý získava informácie zo senzorového systému.

Podľa vyhotovenia sa obvykle uvádzajú tri generácie robotov s nasledovným určením špecifických znakov:

1. generácia - vnútorné spätné väzby
 - pevný program riadenia činnosti (práca v usporiadanom prostredí)
 - nutnosť špeciálneho doplnkového vybavenia
2. generácia - vnútorné a vonkajšie snímače
 - 6 a viac osí pohybu
 - spojenie s vyššou riadiacou úrovňou
 - práca v čiastočne usporiadanom prostredí
3. generácia - vysoko rozvinutý systém snímania informácií z prostredia
 - vizuálny systém, sluch, hmat
 - autonómnosť činnosti (riešenie úloh, identifikácia)

Uvádza sa aj podrobnejšie delenie na generácie:

1. generácia - roboty bez vonkajších väzieb
- 1,5 generácia - roboty s elektrooptikou, snímačom tlaku, sily, blízkosti predmetov
2. generácia - s vizuálnym systémom, s hmatom, koordináciou činnosti rúk a zraku
- 2,5. generácia - zmysly a schopnosti adaptácie na úrovni človeka
3. generácia - nahradenie kvalifikovaných pracovníkov.

Je známe, že na rozdiel od iných technických systémov (napr. počítačov) sa v praxi používajú všetky generácie robotov. Každá generácia má však špecifické poslanie.

Každý robot sa skladá z častí: senzorový systém, výkonný systém (kinematická schéma, pohonný subsystém), riadiaci systém, komunikačný systém.

2.2 Priemyselný robot

Priemyselný robot je automatický manipulačný systém s preprogramovateľným riadiacim systémom na vykonávanie pohybových a riadiacich funkcií vo výrobnom procese, nahradzujúci analogické funkcie človeka pri premiestňovaní predmetov výroby, technologického vybavenia alebo pri vykonávaní technologických operácií.

Priemyselné roboty musia:

- pracovať automaticky
- mať manipulačnú schopnosť
- umožňovať jednoduchú zmenu programu.

Podľa charakteru vykonávaných činností sa priemyselné roboty delia na:

- **technologické** – vykonávajú základné operácie technologického procesu, priamo sa na ňom zúčastňujú, môžu byť určené napr. na zváranie, povrchové úpravy, montáž, lepenie a pod.
- **obslužné** – vykonávajú pomocné operácie, nakladanie, vyberanie, transport a pod.
- **univerzálne** – vykonávajú základné aj pomocné operácie v technologickom procese.

Priemyselné roboty sa podľa určenia delia na:

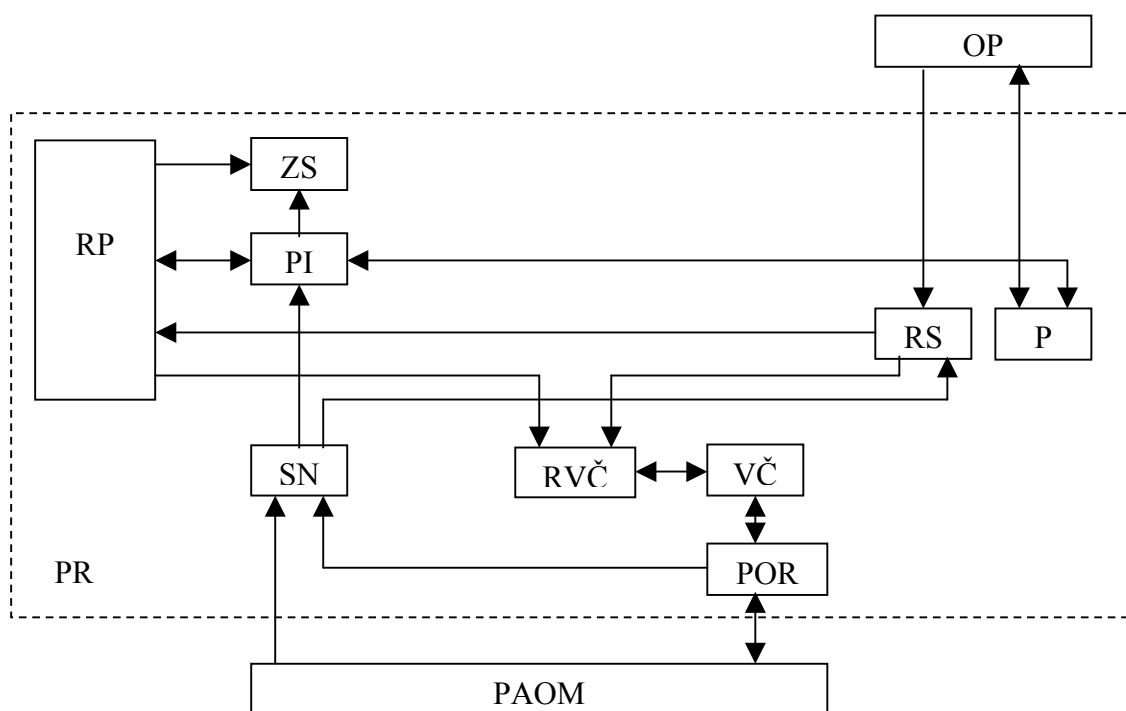
- **univerzálne** – vykonávajú technologické operácie rozličných druhov alebo pomocné operácie pri práci s rôznymi skupinami modelov technologického zariadenia
- **špecializované** - vykonávajú technologické operácie jedného druhu alebo pomocné operácie pri práci s určenou skupinou modelov technologického zariadenia
- **špeciálne** - vykonávajú technologické operácie alebo pomocné operácie pri práci s konkrétnym modelom technologického zariadenia.

Príkladom technologických operácií jedného druhu sú operácie zvarovania, striekania a pod. Určenou skupinou modelov technologických zariadení je napr. skupina strojov s horizontálnou osou vretena.

Funkčná schéma priemyselného robota (obr.2.2.) sa tvorí z technických blokov, ktoré zabezpečujú realizáciu vyžadovaných vlastností robota. Na obr.2.2. je označené: OP – operátor, RP – riadiaci počítač, PR – priemyselný robot, ZS – zobrazovací systém, PI – prevodníky informácií, RS – riadiaci systém, P – pult riadenia, SN – snímače, RVČ – riadenie výkonových členov, VČ – výkonové členy, POR – pracovné orgány robota, PAOM – prostredie a objekty manipulácie.

Vo všeobecnosti je funkčná schéma tvorená subsystémami merania, riadenia a výkonného subsystému. Každý zo subsystémov obsahuje viacero blokov.

Výkonové členy s pracovnými orgánmi sa niekedy nazývajú aj **manipulátorom robota**. Pre túto časť sa používa aj názov pohonný systém a kinematická schéma robota. Z hľadiska realizácie môžeme hovoriť o mechanickom systéme robota, ktorý obsahuje kinematickú schému, pohony a pracovné orgány.



Obr.2.2 Funkčná schéma priemyselného robota

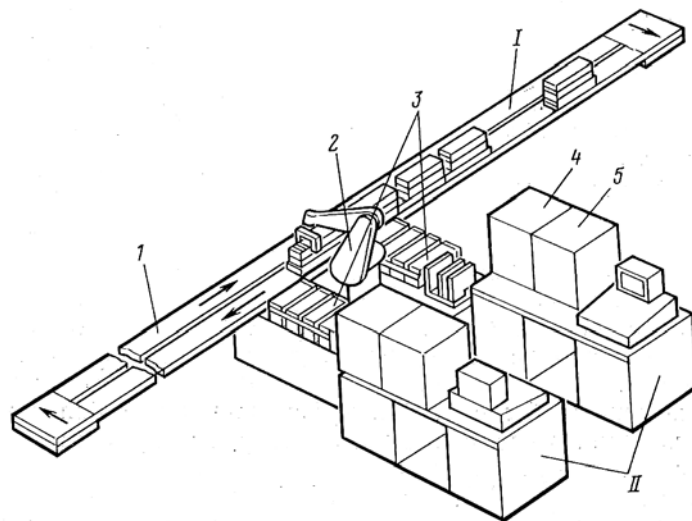
Metodika zavedenia priemyselných robotov obsahuje postupnosť:

- analýza technológie
- systémová analýza projektu robotizácie
- výber procesov, ktoré sa majú robotizovať
- projektovanie procesu, stanovenie cieľov robotizácie a kritérií ohodnotenia efektívnosti
- projektovanie robotického systému
- zostavenie konkrétnej postupnosti činností pre robotizáciu
- príprava pracovníkov robotizovanej technológie.

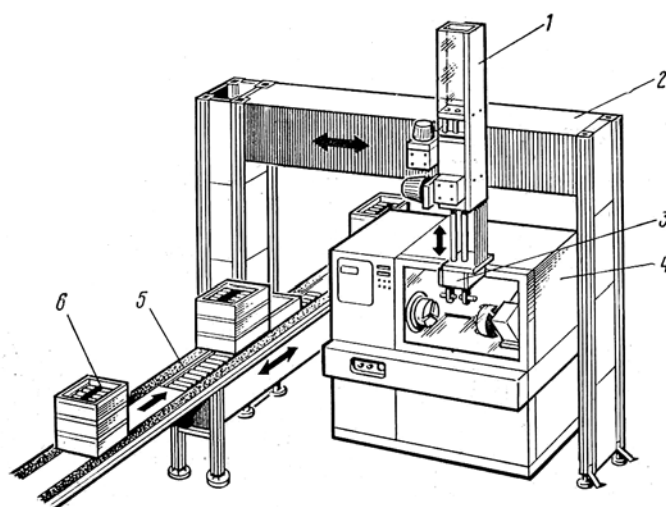
Projektovanie robotického systému obsahuje: určenie štruktúry systému a potrebného počtu robotov, výber typu robotov a ohodnotenie ich vhodnosti, určenie funkcií priemyselného robota, určenie činností obsluhy v robotizovanom systéme.

Aplikácie robotov sú v obsluhu strojov a zariadení, povrchovej úprave výrobkov, montáži, bodovom, oblúkovom, plazmovom zvarení, meraní a testovaní výrobkov a pod.

Na obr.2.3. je príklad aplikácie robota v meracom zariadení, na obr. 2.4 je príklad aplikácie robota vo výrobnom systéme. Na obr.2.3 je označené: I - dopravný systém, II – riadiaci systém, 1- dopravný pás, 2 - robot, 3 - zásobníky, 4,5 - automatické meracie zariadenie.



Obr.2.3. Meracie zariadenie s robotom



Obr.2.4 Systém na sústruženie hriadeľov.

Na obr.2.4. je označené: 1 – priemyselný robot, 2 – rám stroja, 3 - chápadlo, 4 - sústruh, 5 - dopravník , 6 – zásobník s polotovarmi a ďalej s výrobkami.

3. SENZOROVÝ SUBSYSTÉM ROBOTA

V tejto časti preberieme len základné informácie o senzorových systémoch, potrebné predovšetkým z hľadiska opisu funkcie riadiaceho systému a diagnostiky robotov. Problematikou senzorových subsystémov robotov sa zaoberajú napr. práce [4. 9].

Robot získava informácie od operátora a zo senzorového systému. Z hľadiska automatickej činnosti sú dôležité informácie zo senzorového systému. Rozsah informácií charakterizuje schopnosť robota prispôbiť sa zmenám prostredia. Vlastnosti senzorového systému stanovujú funkčné možnosti priemyselného robota, zložitosť úloh, ktoré môže plniť, spoľahlivosť a efektívnosť práce v prevádzkových podmienkach a dosiahnuteľnú bezpečnosť práce s robotom.

Pri činnosti robota sa môžu vyskytnúť nasledujúce situácie:

- prostredie, v ktorom robot pracuje a objekty s ktorými robot pracuje, sú nemenné; robot sa musí pohybovať s definovanou presnosťou, aby sa zabezpečila požadovaná činnosť.
- mení sa poloha objektov, rozmery objektov, ich orientácia, mení sa vyžadovaná dráha pohybu podľa vonkajších podmienok, robot musí prispôbovať svoju činnosť uvedeným zmenám, ktoré automaticky zisťuje,
- podstatne sa mení prostredie, tvar, veľkosť a poloha objektov, robot vytvára program činnosti na zabezpečenie splnenia vyžadovaného cieľa.

Vo všeobecnosti je úlohou senzorového systému robota zber a predspracovanie informácií. Ide predovšetkým o:

- sledovanie stavu manipulačného systému (poloha, rýchlosť, záťaž pre každý stupeň voľnosti),
- umožnenie orientácie a navigácie pohybu určovaním vlastnej polohy, rýchlosti a smeru pohybu v prostredí,
- lokalizovanie predmetov v okolí (ich polohy, orientácie, pohybu, vzájomného priestorového vzťahu),
- zisťovanie vlastností predmetov (tvar, povrch, farba, chemické zloženie, tvrdosť, hmotnosť, teplota).
- zisťovanie vlastností prostredia (prítomnosť chemických látok, rádioaktivita, hluk),
- sprostredkovanie komunikácie s človekom akustickými signálmi.

Senzorový systém obsahuje **snímače vnútornej informácie** a **snímače informácií z vonkajšieho prostredia**.

3.1 Snímače vnútornej informácie

Snímače vnútornej informácie snímajú stav robota. Poskytujú informácie predovšetkým o polohe, rýchlosti a zrýchlení členov robota. Zabezpečujú informácie pre riadenie robota podľa programu, zabezpečujú informácie pre blokovanie pri poruchách, informácie pre diagnostiku, meranie na robote pod. Z uvedeného vyplýva, že okrem vymenovaných veličín sa môže merať teplota, tlak, prietok a pod.

Snímače musia čo najlepšie vyhovovať týmto požiadavkám:

- vysoká spoľahlivosť,
- malé rozmery a hmotnosť,
- vysoká odolnosť proti pôsobeniu vplyvov prostredia,
- jednoduché nastavenie a ciachovanie,
- nízka cena.

Snímače môžu byť so spojitým alebo diskretným prevodom informácie [3]. Spojitú informáciu o polohe možno získať z potenciometrov a selsynov. Systémy s potenciometrami vyžadujú alebo A/Č, alebo Č/A prevodníky. Systémy so selsynmi môžu pracovať s využitím informácie o zmene amplitúdy alebo fázy napätia (prevodníky uhol - amplitúda - kód, uhol - fáza - kód, systémy s fázovým závesom).

Systémy s prevodníkmi, ako aj s inkrementálnymi snímačmi a snímačmi s kódovými kotúčmi alebo pravítkami majú diskretné výsledné vyjadrenie informácie. K diskretným snímačom patria aj systémy, ktoré merajú len dosiahnutie význačných bodov pohybu. Všetky systémy merania polohy v robotoch musia pracovať ako **absolútne meracie členy**. Systémy s prírastkovým alebo cyklicky absolútnym odmeriavaním musia byť doplnené absolútnym systémom na nastavenie **referenčného (synchronizačného) bodu systému**.

Rýchlosť sa meria jednosmerným tachodynamom, striedavým tachogenerátorom alebo impulznými snímačmi (prírastkovými snímačmi polohy). Informáciu o rýchlosti možno získať aj v systémoch so selsynmi a v systémoch so snímačmi s kódovými kotúčmi alebo pravítkami.

Zrýchlenie možno určiť s využitím striedavého tachogenerátora, s využitím merania dynamického momentu alebo sily a najčastejšie spracovaním signálov zo snímačov rýchlosti.

Systémy pre **blokovanie neprípustných stavov** zabezpečujú ochranu systému pri poruche iných častí robota, pri preťažení robota a pod. Ochrana systému proti prekročeniu prípustných vzájomných polôh členov kinematickej schémy sa zabezpečuje koncovými snímačmi. Ochrana proti neželanému kontaktu robota s prostredím sa uskutočňuje snímačmi na vonkajšej strane pracovného orgánu robota, prípadne aj kinematickej schémy. Ochrana priemyselného robota proti preťaženiu vyžaduje, aby sa použili silové alebo momentové snímače v členoch systému.

Algoritmy spracovania informácie a určenia riadiacich príkazov v prípade objavenia sa signálu havárie musia byť určené tak, aby sa riadením zrušil neželaný stav (často je vhodné vrátiť sa k predchádzajúcemu kroku činnosti). Okrem kontroly stavu mechanickej časti robota treba blokovať činnosť systému predovšetkým pri poruche v riadiacej časti systému a vo výkonovej časti systému.

Z hľadiska určenia celkového stavu systému je vhodné využiť informáciu o hluku systému vo vybratých miestach, o priebehu akčných veličín v prechodných režimoch a pod.

3.2 Snímače vonkajšej informácie

Robot môže úspešne komunikovať so zložitým prostredím vtedy, ak má širokú informačnú základňu a dostatočne presný vnútorný model sveta. Prospešnosť jednoduchého modelu možno výrazne zvýšiť, ak má možnosť korigovať svoje parametre, adaptovať sa na novú situáciu. Taký systém musí nie len registrovať vlastnosti prostredia, ale aj korigovať svoje predstavy o týchto vlastnostiach.

Rozvinutý informačný systém obsahuje okrem snímačov vnútornej informácie aj snímače vonkajšej informácie. Snímače vonkajšej informácie sú potrebné na adaptáciu robota na zmenené pracovné prostredie, t.j. na:

- vyhľadávanie objektu,
- kontrolu polohy objektu vzhľadom na pracovný orgán robota,
- rozoznávanie formy a orientácie objektu,
- spoľahlivú manipuláciu s objektom,
- určenie fyzikálnych parametrov,
- správne vykonanie operácie s objektom atď.

Senzorový subsystém robota musí preto obsahovať tieto snímače: lokačné, vizuálne, taktilné, sily a momentu.

3.2.1 Lokačné systémy

Lokačné systémy určujú súradnice objektu v priestore a tiež rýchlosť pohybu vzhľadom na prostredie. Možno ich využiť aj na rozoznávanie objektu. Pracujú tak, že:

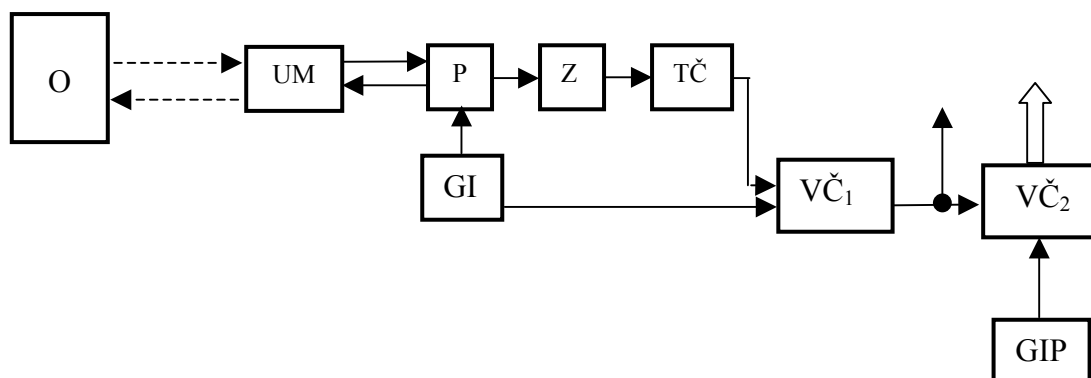
- využívajú signál z objektu, ktorý je určený jeho vlastnosťami (napr. rádioaktívne žiarenie),
- na objekt sa upevni vysielač signálu,
- v smere objektu sa vysiela signál, ktorý sa po odraze od objektu spracúva.

V priemysle sa najčastejšie uplatnia systémy tretej skupiny, ktoré možno nazvať aktívnymi meracími systémami.

Lokačné systémy možno rozdeliť na systémy merania vo väčších vzdialenostiach a systémy merania v blízkom okolí koncového člena robota.

Na meranie vo väčšej vzdialenosti sa používajú ultrazvukové, laserové a optické systémy.

Ultrazvukové diaľkomery merajú v rozsahu 20 až 15000 mm s chybou 5 %. Ich výhodou je nezávislosť od osvetlenia, od existencie prachu, pary atď. Umožňujú zisťovať prítomnosť priehľadných a nemagnetických predmetov. Pomocou akustických snímačov môžu byť určené vnútorné poruchy materiálu a určený druh materiálu na povrchu objektu. Z hľadiska zvýšenia rozlišovacej schopnosti a meraného rozsahu (minimálna vzdialenosť) treba použiť čo najvyššiu frekvenciu. So zvyšovaním frekvencie sa však znižuje dosah merania v dôsledku väčšieho tlmenia vln. Na generovanie a príjem ultrazvukových vln sa používajú keramické piezoelektrické prevodníky (do 70 kHz).



obr.3.1 Principiálna schéma ultrazvukového meracieho systému

Principiálna schéma ultrazvukového meracieho systému na meranie vzdialenosti objektu O je na obr.3.1, kde UM je ultrazvukový menič, P - prepínač, GI - generátor krátkych impulzov, Z - zosilňovač, TČ - tvarovací člen, VČ₁ - vyhodnocovací člen fázového posunutia, VČ₂ - vyhodnocovací člen definovaných vzdialenosti, GIP - generátor impulzov definovanej šírky. Ultrazvukový menič generuje impulzy do prostredia a prevádza odrazené ultrazvukové vlny na elektrický signál. Vyhodnocovací člen VČ₁ pracuje na princípe vyhodnotenia časového intervalu medzi vyslaním a prijatím impulzu ultrazvukovým meničom. Výstupný signál z VČ₁ je šírko modulovaný a dáva informáciu o vzdialenosti. Výstupný signál z VČ₂ dáva informáciu o dosiahnutí významných bodov dráhy.

Optické systémy využívajú vzájomné pôsobenia svetla s povrchom objektu (odraz, pohlcovanie, rozptyl). Optické systémy sa používajú na meranie do vzdialenosti 2 m, pričom presnosť určenia polohy môže byť 2 mm. Principiálna schéma optického systému je na obr.3.2. Lúč svetla sa odráža od objektu a je zaznamenaný snímačom. Meranie je založené na určení časového intervalu medzi prechodom zrkadla Z cez referenčný bod a dopadom odrazeného lúča na snímač.

Na meranie malých vzdialeností sa používajú indukčná, magnetické, pneumatické a optické snímače. Najvýhodnejšie vlastnosti majú posledná 3 systémy.

Elektromagnetické metódy merania sú založené na vzájomnom pôsobení elektromagnetického poľa s kovovým objektom. Signál snímača závisí od vzdialenosti objektu, elektrickej vodivosti, magnetickej vodivosti, existencie dutín v objekte, vzájomnej rýchlosti snímača a objektu.

V závislosti od použitých frekvencií sa snímače delia na magnetická, s vírivými prúdmi, rádiové.

V **magnetických snímačoch** sa používa nepramenné magnetické pole alebo pole s frekvenciou do 300 Hz. Pri snímačoch s vírivými prúdmi sa používajú frekvencie 200 až $5 \cdot 10^7$ Hz. Pri rádiových snímačoch sa používajú cm alebo mm vlny. V magnetických snímačoch sa meria pomocou cievok, Hallových snímačov, magnetodiód a triód. Vzdialenosť možno merať v rozsahu 10 až 100 mm s presnosťou 3 až 5 %. Rovnako možno merať premiestnenie s rýchlosťou 0,005 až 10 m/s. Ďalej možno merať hrúbku materiálu, zisťovať prítomnosť dutín atď.

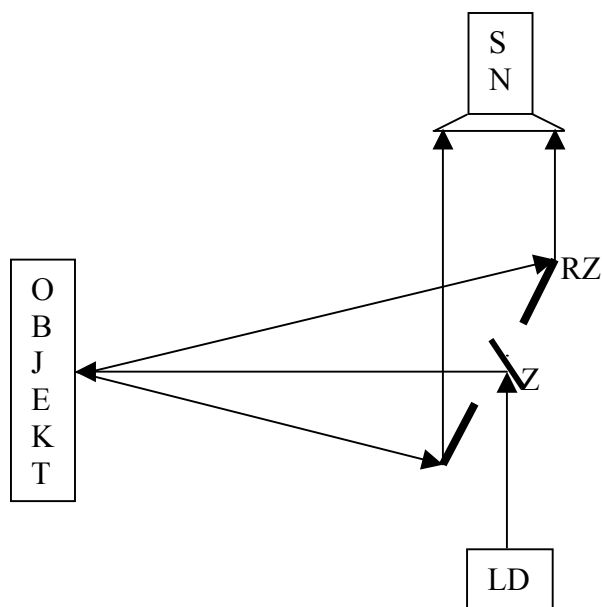
Snímače na princípe vírivých prúdov môžu využívať informáciu o amplitúde, fáze signálov, vyšších harmonických zložiek a pod. Presnosť merania je 3 až 10 % pri meraní do 10 mm.

Rádiové snímače využívajú zmenu parametrov elektromagnetického poľa pri existencii predmetov v smere vyžarovania. Meranými parametrami sú: intenzita poľa, amplitúda, fáza, frekvencia, polarizácia kmitov, priestorové parametre lúča, spektrum vyžarovania. Objekt môže meniť uvedené parametre, a tým možno určiť vzdialenosť objektu, rozmery objektu, rýchlosť. Systémy umožňujú merať rýchlosť pohybu v rozsahu 0,1 až 30 m/s s chybou 0,01 m/s do 300 m.

Pneumatické systémy využívajú prerušovanie prúdu vzduchu, zmenu tlaku, prekonanie nastaveného tlaku, turbulenciu prúdu. Pomocou snímačov možno merať lineárne premiestnenie v rozsahu 0 až 4 mm s presnosťou 0,5 %, zisťovať prítomnosť predmetov do 20 mm (pneumoakustická metóda rozširuje rozsah merania do 1 m) a ďalšie veličiny (tlak, teplotu, silu) .

Optické systémy merajú priblíženie koncového člena robota k objektu na princípe odrazu svetla od objektu. Vplyv vonkajšieho osvetlenia sa eliminuje modulovaním svetla. Optické systémy umožňujú registrovať existenciu objektu medzi čel'ust'ami chápädla robota, pričom sa využíva priamy dopad svetla zo zdroja svetla na snímač.

Na meranie malých vzdialeností sa používajú **laserové diaľkomery** pracujúce v spojitom režime. Vzdialenosť sa meria na základe fázového posunutia modulačného signálu.



Obr. 3.2 Principiálna schéma optického systému
LD- laserová dióda, S – snímač, Z- zrkadlo, RZ – rotujúce zrkadlo

3.2.2 Vizualié systémy

Aplikácie vizualiých systémov v automatizácii sú zamerané na dve oblasti:

- automatické systémy kontroly vlastností komponentov alebo hotových výrobkov,
- automatické systémy riadenia robotov.

V súčasnosti približne 90 % aplikácií je v prvej skupine.

Vizualié systémy robotov musia zabezpečovať nasledujúce činnosti:

- vyhľadanie predmetu zmenou orientácie snímača,
- automatické zaostrovanie,
- meranie vzdialenosti od predmetu,
- zmenu citlivosti snímača podľa zmeny intenzity osvetlenia,
- určenie farby, kontúr, pohybu, rozmerov, formy objektov.

Vizualié systémy sú charakterizované:

- rýchlosťou spracovania signálov,
- počtom diskretných hodnôt videesignálu,
- počtom hodnôt jasu videesignálu,
- potrebným kontrastom medzi pozadím a objektom,
- potrebným osvetlením pracovnej zóny,
- možnosťami zmien algoritmov identifikácie v závislosti od zmien technologického procesu.

Systémy technického videnia sa delia na: rozoznávacie, informačné a meracie. Rozoznávacie a meracie systémy sa uplatňujú pri kontrole kvality a klasifikácii pohyblivých a nepohyblivých objektov. Meracie systémy okrem určenia geometrických rozmerov objektu určujú vzdialenosť od objektu, orientáciu a pod. Informačné vizualié systémy sú využité pri riadení technologického procesu prostredníctvom analýzy scény (napr. určenie prekážok v pracovnej zóne, voľných dráh, sledovanie švu zvaru).

Dôležitý je kontrast obrazu. Existujú tri spôsoby zvýšenia kontrastu: použitie kontrastných farieb, použitie farebných filtrov, použitie špeciálneho osvetlenia.

Jedna z častých úloh je určiť obrysy predmetu a určiť rovinný obraz predmetu. Pritom sa môžu určovať hranice rovnakej svetlosti častí objektu. V dôsledku nečistôt, drsnosti povrchu, nerovnosti atď. sa pri tejto operácii vyskytuje veľa porúch, ktoré treba odfiltrovať.

Vzdialenosť pomocou televíznej kamery možno merať s využitím zaostrovacieho systému kamery. Pri uvedenom spôsobe je presnosť určenia vzdialenosti približne 10%. Ak sa použijú 2 kamery, vzdialenosť sa určí z videosignálu a z informácie o uhle a vzdialenosti kamier. Systém určuje vzájomné priradenie bodov obrazov v oboch vizuálnych systémoch. Niektoré systémy určujú vzdialenosť s použitím pomocného zdroja svetla. Zdroj svetla môže mať pevne nastavenú polohu vzhľadom na snímač odrazeného svetla, alebo sa používa systém s reguláciou uhla zdroja svetla a vzdialenosť sa vypočíta z nameraného uhla pri konštantnej polohe svetelnej stopy na snímacom systéme (presnosť 0,3 %).

Veľa úloh aplikácie vizuálnych systémov je zameraných na meranie plošných objektov. Spracovanie informácií o trojrozmerných objektoch vyžaduje vysokú výkonnosť systému. Vo všeobecnosti je potrebné použiť viac kamier. Rastrové osvetlenie umožňuje určiť tvar trojrozmerných telies aj pri použití jednej kamery, určia sa lomy čiar svetla. Svetlo môže byť riadené. Základnými výhodami sú:

- možnosť aktívneho pôsobenia na osvetlenie analyzovanej scény a zabezpečenie presného určenia hranice svetlo - tieň
- značné zmenšenie zaťaženia počítača vzhľadom na to, že na kódovanie jasu elementu vstupného zobrazenia stačí jeden bit bez uvažovania ostatných hodnôt jasu
- vysoká spoľahlivosť určenia obrysov, lebo pri uvedenej metóde nie sú kontúry hranicami zmienené jasu, ale bodmi zlomu svetelných pásov.
- nepotrebnosť určovať charakteristické body objektu.

Dôležitou úlohou je optimálne rozmiestnenie snímačov na robote, ktoré závisí od zložitosti riešených úloh, úrovne inteligencie systému, sólového alebo skupinového nasadenia robotov atď. Vo vizuálnych systémoch sa používajú pevné kamery, kamery umiestnené na špeciálnych manipulátoroch, kamery umiestnené na manipulátoroch robota a kombinácia uvedených spôsobov.

3.2.3 Taktilné snímače

Osobitosťou práce snímačov je kontakt s povrchom objektu. Snímače umožňujú:

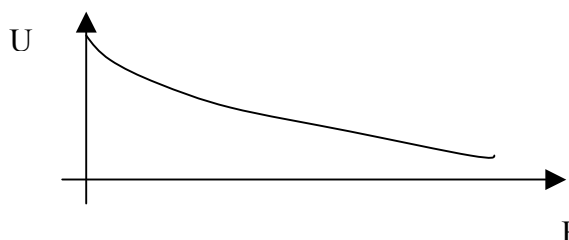
- vyhľadanie predmetov,
- určenie polohy predmetov.
- prácu s neorientovanými predmetmi
- spoľahlivé uchopenie predmetu,
- kontrolu pohybu predmetu v chápadle,
- rozoznávanie predmetov a ich klasifikáciu,
- určenie fyzikálnych vlastností predmetov.

Najjednoduchšími snímačmi sú kontaktné snímače - obvykle mikrospínače. Nové možnosti dáva vytvorenie matice kontaktných snímačov. Ide predovšetkým o získanie informácie o pohybe predmetu v chápadle a o rozpoznávanie objektov. Pre rozpoznávanie objektov je vhodné použiť snímače, ktoré sú vybavené snímačom polohy jednotlivých členov matice.

Pohyb predmetov v chápadle sa môže určovať pomocou piezoelektrických snímačov a rôznych konštrukcií s valčekmi, ktoré sa otáčajú pri klzaní predmetu v chápadle.

Výhodné by bolo vytvoriť taký systém snímačov, ktoré by umožňovali získať podobné informácie, ako získava človek pomocou hmatu (vytvorenie umelej kože). Boli realizované systémy s maticou pružných elementov, ktorých vodivosť sa mení so zmenou tlaku.

Jedna z možností realizácie je použiť silikónový kaučuk. Z uvedeného materiálu sa realizujú časti, ktoré sa v nezaťaženom stave dotýkajú len na malej ploche. Pôsobením mechanického zaťaženia sa časti deformujú, čím sa zväčši dotyková plocha a zníži elektrický odpor snímača. Typická závislosť výstupného napätia snímača v závislosti od pôsobiacej sily je na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Výstupné napätie dotykového snímača

3.2.4 Snímače sily a momentu

Snímače síl a momentov sa používajú pri manipulácii s krehkými a ľahko deformovateľnými predmetmi a pri montáži. Na meranie síl sa používajú dva spôsoby:

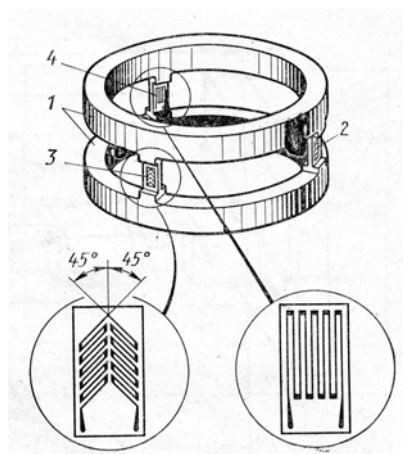
- meranie s využitím pružnej deformácie aktívnej časti snímača (tenzorezistory, piezoelektrické snímače ...),
- meranie mikropohybov kalibrovaných pružín snímača (elektrické, optické, magnetické meranie malých zmien polohy).

Pri meraní síl a momentov možno postupovať tromi spôsobmi:

1. snímače sú upevnené v "zápästí" robota ,
2. snímače sú umiestnené mimo robota, v prostredí (zariadení), v ktorom je umiestnený predmet manipulácie,
3. využíva sa informácia z výkonových členov robota.

Snímače umiestnené na robote musia byť čo najbližšie k pracovnému orgánu robota. Použitie snímačov sa spája s použitím pružných členov v konštrukcii robota, ktoré umožňujú korekciu polohy koncového člena pri pôsobení vonkajšej sily. Najčastejšie sa používajú tenzometrické snímače.

Pre úplné meranie síl a momentov pôsobiacich na chápadlo treba použiť snímač, ktorý môže merať 3 sily v smere osi a 3 momenty vzhľadom na osi.



Obr.3.4. Šesť zložkový snímač síl a momentov

Príklad snímača, ktorý sa montuje do zápästia robota je na obr.3.4. Snímač meria tri sily a tri momenty. Na obr.3.4 je označené: 1 – montážne časti, 2 – pružné členy, 3, 4 – tenzometre na určenie síl a momentov.

V prípade merania síl, ktoré pôsobia na objekt treba použiť pracovný stôl, ktorý má tri časti (vrstvy). Medzi strednou a hornou sú snímače na meranie vertikálnych síl a medzi strednou a spodnou snímače na meranie horizontálnych síl. Meria sa v 4 bodoch. Vzdialenosť medzi snímačmi je 2 k (obr.3.5). Pre sily platí:

$$F_x = h_4 - h_2 \quad (3.1)$$

$$F_y = v_2 + v_4 - v_1 + v_3 \quad (3.2)$$

$$F_z = h_3 - h_1 \quad (3.3)$$

Momenty sú určené výrazmi:

$$M_x = [(v_4 + v_3) - (v_1 + v_2)]k \quad (3.4)$$

$$M_y = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)k \quad (3.5)$$

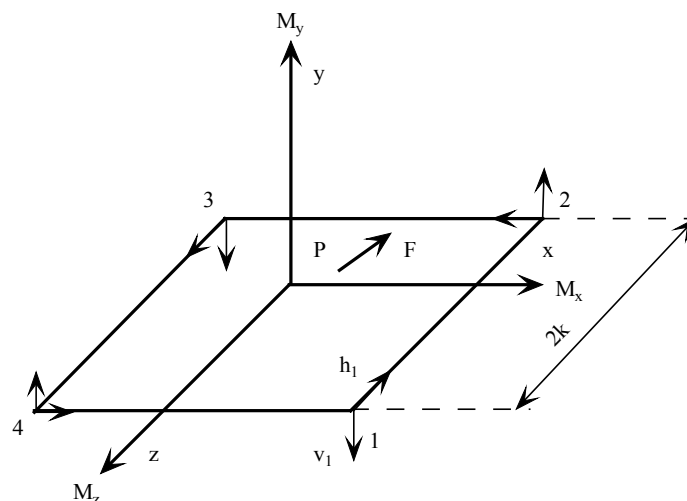
$$M_z = [(v_4 + v_1) - (v_2 + v_3)]k \quad (3.6)$$

kde v_i sú vertikálne a h_i horizontálne sily. Sila F pôsobí v bode P , ktorý má súradnice x_p , y_p , z_p :

$$x_p = -\frac{M_z}{F_y} \quad (3.7)$$

$$y_p = 0 \quad (3.8)$$

$$z_p = \frac{M_x}{F_y} \quad (3.9)$$



Obr. 3.5 Meranie síl na pracovnej ploche

Snímač umožňuje určiť polohu ťažiska predmetu, ktorý je na pracovnom stole. Vtedy je $F_x = F_z = 0$ a $M_y = 0$, preto ťažisko má súradnice:

$$x = \frac{(v_4 + v_1 - v_2 - v_3)k}{v_4 + v_2 - v_1 - v_3} \quad (3.10)$$

$$y = \frac{(v_4 + v_3 - v_1 - v_2)k}{v_2 + v_4 - v_1 - v_3}. \quad (3.11)$$

Použitím snímačov na pracovnom stole sa zjednodušuje konštrukcia robota a znižujú sa požiadavky na rozmery snímačov.

Sily a momenty pôsobiace na koncový člen možno merať určením zmien momentov motorov manipulátora. Meranie je menej presné a určenie meraných síl a momentov vyžaduje použiť matematický opis kinematickej schémy.

Bezpečnosť práce so systémom vyžaduje aplikovať snímače vnútornej a vonkajšej informácie. Z hľadiska spoľahlivosti, rýchlosti, ceny a pod. používajú sa predovšetkým snímače polohy kinematických dvojíc, snímače optické a koncové spínače.

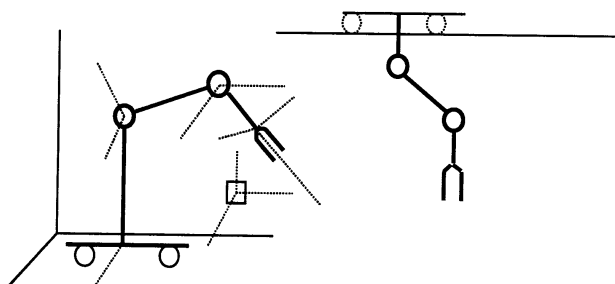
4. VÝKONNÝ SUBSYSTÉM ROBOTA

Výkonný subsystém musí zabezpečiť realizáciu riadiacich signálov z riadiaceho subsystému. Zabezpečuje transport, manipulovanie, vykonanie technologických operácií. Obsahuje realizátor plánu a riadiaci člen, ktorý generuje riadiace príkazy pre jednotlivé servosystémy robota. **Výkonné systémy** sa skladajú z kinematickej schémy a servosystémov.

Na výkonný systém sú kladené požiadavky:

- požadovaná nosnosť, resp. požadované energetické vlastnosti
- dosiahnutie ľubovoľného miesta v pracovnom priestore vrátane orientácie
- rýchle a plynulé premiestňovanie
- presnosť
- spoľahlivosť...

Kinematická schéma má časti: pojazd (podlaha alebo strop), základňa, členy pre polohovanie hlavice (základné členy KS), členy pre orientáciu hlavice, hlavica (koncový efektor: úchopová, technologická, kombinovaná, výmenná)-obr.4.1.



Obr. 4.1 Kinematické schémy a súradnicové systémy

S týmito časťami sú spojené aj súradnicové systémy. Používané **súradnicové systémy** sú: súradnicový systém prostredia - svetový súradnicový systém, súradnicový systém základne, súradnicový systém kĺbový, súradnicový systém výstupnej hlavice, súradnicový systém objektu a pod. V súradnicových systémoch sú riešené úlohy: reprezentácia prostredia, pohyb manipulátora, dynamika pohybu, informácia o polohe a pohybe prekážok, poloha objektu, vzájomný vzťah objektu, senzorového systému a manipulátora, atď.

Členy kinematickej schémy tvoria **kinematické dvojice**, ktoré majú určený spôsob vzájomného pohybu - obvykle **rotačný** alebo **posuvný** (translačný) – obr.4.2. Os je smer pohybu, v ktorom sa časť robota môže pohybovať lineárnym alebo rotačným spôsobom. Stupeň voľnosti kinematickej schémy je určený

$$h = 6 - a$$

kde a je **trieda kinematickej dvojice**, ktorá je určená počtom vzájomne nemožných pohybov.

Na obr.4.2a je kinematická dvojica 3. triedy, na obr.4.2b je kinematická dvojica 4. triedy, na obr.4.2c a obr.4.2d sú kinematické dvojice 5. triedy.

Kombináciou kinematických dvojíc sa vytvára **kinematická schéma robota**. Roboty sú najčastejšie konštruované s posuvným alebo rotačným spojením kinematických dvojíc. Kinematické schémy zložené len s dvojicami 5. triedy sú základné a s dvojicami vyšších tried

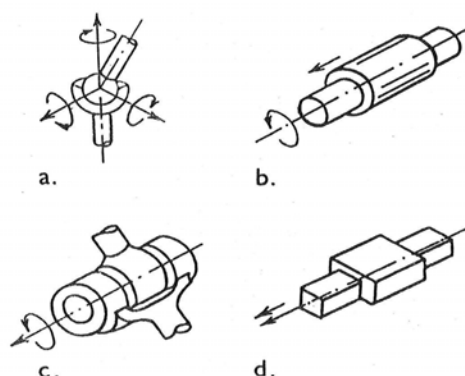
ekvivalentné. Ak niektorý člen kinematickej schémy je len v jednej dvojici, potom je kinematická schéma otvorená, v opačnom prípade je uzatvorená.

Pre priestorový systém je počet stupňov voľnosti h kinematickej schémy určený

$$h = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i \quad (4.1)$$

kde n je počet pohyblivých členov, p_i – počet kinematických dvojíc i -tej triedy.

Mechanizmus je systém telies určený na premenu pohybu jedných telies na želaný pohyb iných telies. Je to len taká kinematická schéma, v ktorej pri zadanom pohybe jedného alebo niekoľkých členov všetky ostatné členy vykonávajú jednoznačne určený pohyb.

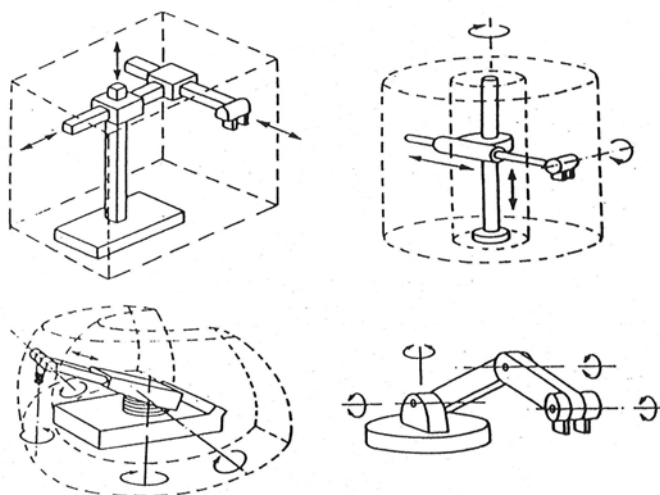


Obr. 4.2 Kinematické dvojice

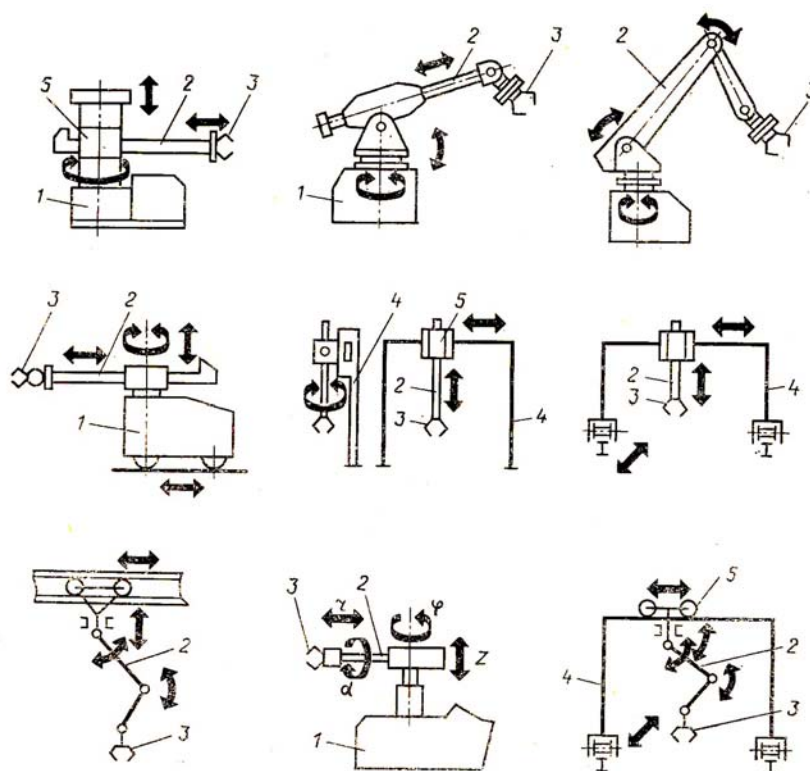
Počet možných koncepcií kinematickej schémy pre tri osi pohybu pri kombinácii dvoch typov kinematických dvojíc je 2^3 : T T T * - T T R - T R R - R R R * - R R T * - R T T * - R T R - T R T, kde T - translačný, R - rotačný pohyb kinematickej dvojice. Použitelnosť kinematickej schémy z hľadiska vytvorenia užitočného pracovného priestoru pri pohybe kinematických dvojíc závisí od poradia napojenia typov kinematických dvojíc. Zmysel má použiť len niektoré kombinácie kinematických dvojíc - označené hviezdičkou.

Na dosiahnutie ľubovoľného bodu pracovného priestoru pri **ideálnom manipulátore** postačujú tri vhodné osi pohybu a na dosiahnutie ľubovoľnej orientácie v každom pracovnom bode (pri tých istých predpokladoch) sú potrebné ďalšie tri vhodné osi pohybu. Ideálny manipulátor sa vyznačuje tým, že hrúbka členov jeho kinematickej schémy je nulová a neexistujú obmedzenia na rozsah pohybu jednotlivých kinematických dvojíc.

Najčastejšie sa pre roboty používajú kinematické schémy tvoriace: **pravouhlý** (kartézsky) robot, portálový robot, **valcový** (cylindrický) robot, **polárny** (sférický) robot, **otáčavý** (uhlový) robot. Príklady základných koncepcií kinematickej schémy robotov sú na obr.4.3.



Obr. 4.3 Základné koncepcie kinematických štruktúr robotov

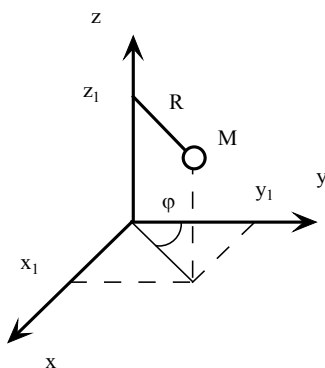


Obr.4.4. Priemyselné realizácie robotov

1-základňa, 2- rameno robota, 3- chápadlo, 4- nosná časť, 5- nosný stĺp alebo pojazd.

Pre uvedené systémy na opis polohy koncového bodu robota sa používa **kartézsky súradnicový systém**, **cylindrický** a **sférický súradnicový systém**. Pre operátora je prirodzené vyjadrovanie informácie v kartézskom súradnicovom systéme, v ktorom je poloha v priestore vyjadrená $P(x,y,z)$.

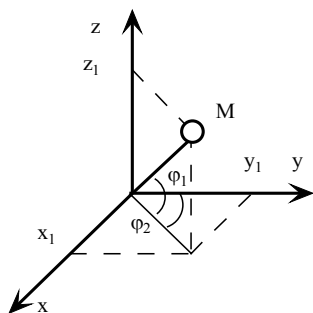
V cylindrickom systéme – obr.4.5



Obr.4.5. Cylindrický súradnicový systém

$$\begin{aligned}x &= R \cos \varphi \\y &= R \sin \varphi \\z &= z\end{aligned}\quad (4.2)$$

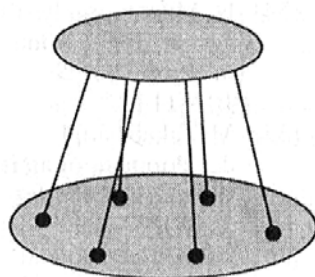
Vo sférickom systéme – obr.4.6



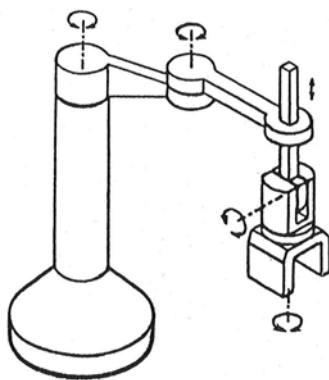
Obr.4.6 Sféricový súradnicový systém

$$\begin{aligned}x &= R \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \\y &= R \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\z &= R \sin \varphi_1\end{aligned}\quad (4.3)$$

Doteraz opísané systémy sú sériové kinematické štruktúry. Používajú sa i paralelné štruktúry – obr. 4.7. Ďalšie možné varianty sú: **kyvadlový robot**, **robot SCARA** - vertikálne osi otáčania (obr.4.8), **chrbticový robot** - pružné spojenie elementov napr. tvaru disku, robot s riadenou deformáciou pružných členov.

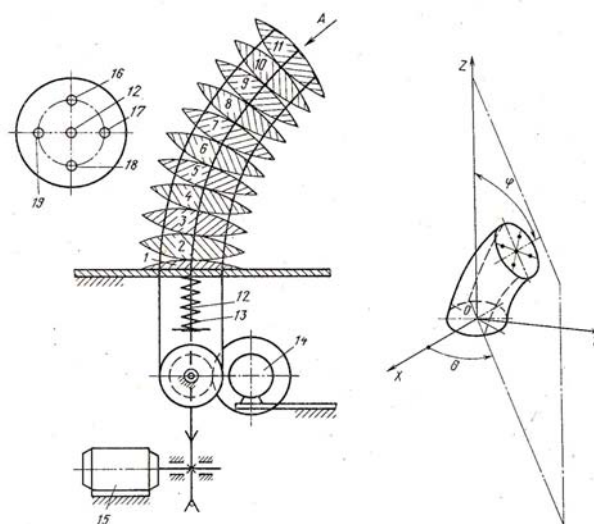


Obr.4.7 Manipulátor s paralelnou štruktúrou

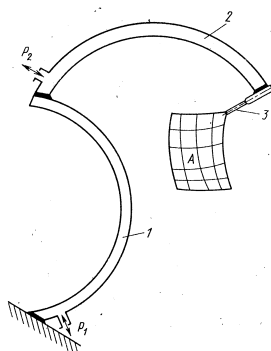


Obr.4.8 Robot SCARA

Na obr.4.9 je príklad robota s vysokým počtom ekvivalentných osí pohybu, pre prácu v zložitom prostredí - kinematická schéma s pružným spojením diskov. Kinematické schémy s vysokým počtom osí pohybu možno umiestniť na posledný člen klasickej kinematickej schémy prípadne ich možno spájať za sebou, čím možno dosiahnuť realizáciu veľmi zložitých priestorových pohybov.



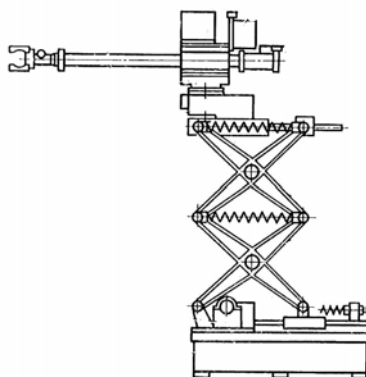
Obr. 4.9 Princíp chrbticového robota



Obr.4.10. Pružný robot

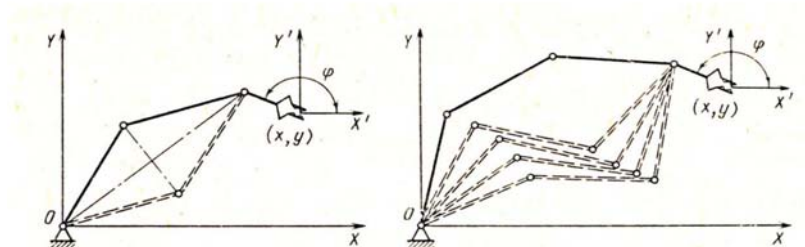
Na obr.4.10. je pružný robot, ktorý vykonáva zmenu polohy v priestore zmenou tlaku v pružných členoch (trubicách).

Pre niektoré aplikácie sa javí výhodní koncepcia robota uvedená na obr.4.11.



Obr.4.11. Špecifická kinematická štruktúra

Roboty, v ktorých sa vyžaduje viac osí pohybu ako je potrebné na vykonanie základného pohybu v priestore, vyššia manévrovateľnosť, práca v prostredí s prekážkami a pod. sa nazývajú **redundantné roboty**. Príklad polohovania hlavice v pracovnom priestore pri použití redundantnej kinematickej schémy je na obr.4.12. Väčší počet osí pohybu dáva široké možnosti práce v zložitom prostredí, pri obchádzaní prekážok, pri inšpekčných prácach, meraní, zložitej montáži a pod. Roboty tohoto typu však dosahujú nižšiu presnosť polohovania, majú oveľa zložitejšie riadenie, môžu mať nižšiu nosnosť. Používané sú v telerobotike.



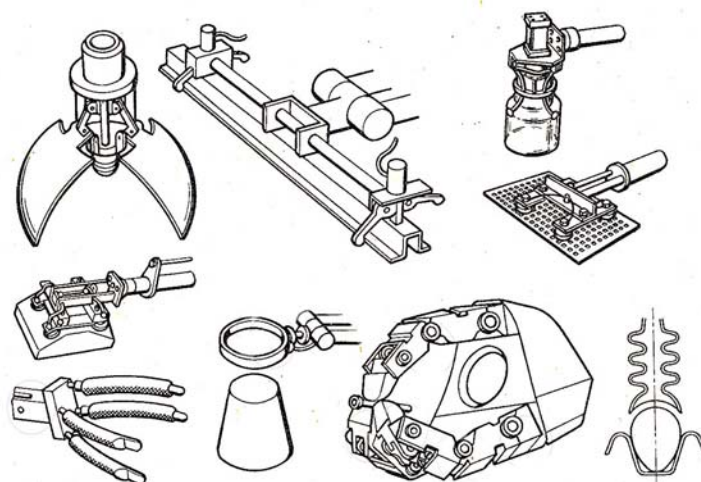
Obr. 4.12 Redundantné roboty

Efektívnosť KS z hľadiska aplikácie:

	nášanie farieb	zváranie	montáž	manipulácia	úpravy povrchu
Kartézsky SS	2	3	4	4	3
cylindrický SS	1	1	2	4	2
Sférický SS	2	3	1	2	1
Horizont.kĺby	1	1	4	3	1
vertikálne kĺby	4	4	3	3	2
viac ako 6 osí	4	4	2	1	1

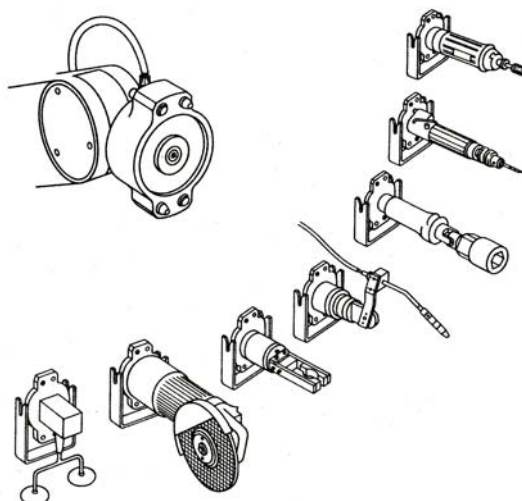
1 - osobitný prípad, 2 - ohraničene vhodný, 3 - vhodný, 4 - vysoko efektívny

Kinematickou schémou je premiestňovaná technologická hlavica. Technologické hlavice sú rôzneho určenia a k tomu majú prispôbenú konštrukciu. Na meracie a inšpekčné účely sú roboty vybavené senzorovým systémom, neseným koncovým členom. Príklady konštrukcie chápadiel pre manipulačné roboty sú na obr.4.13.



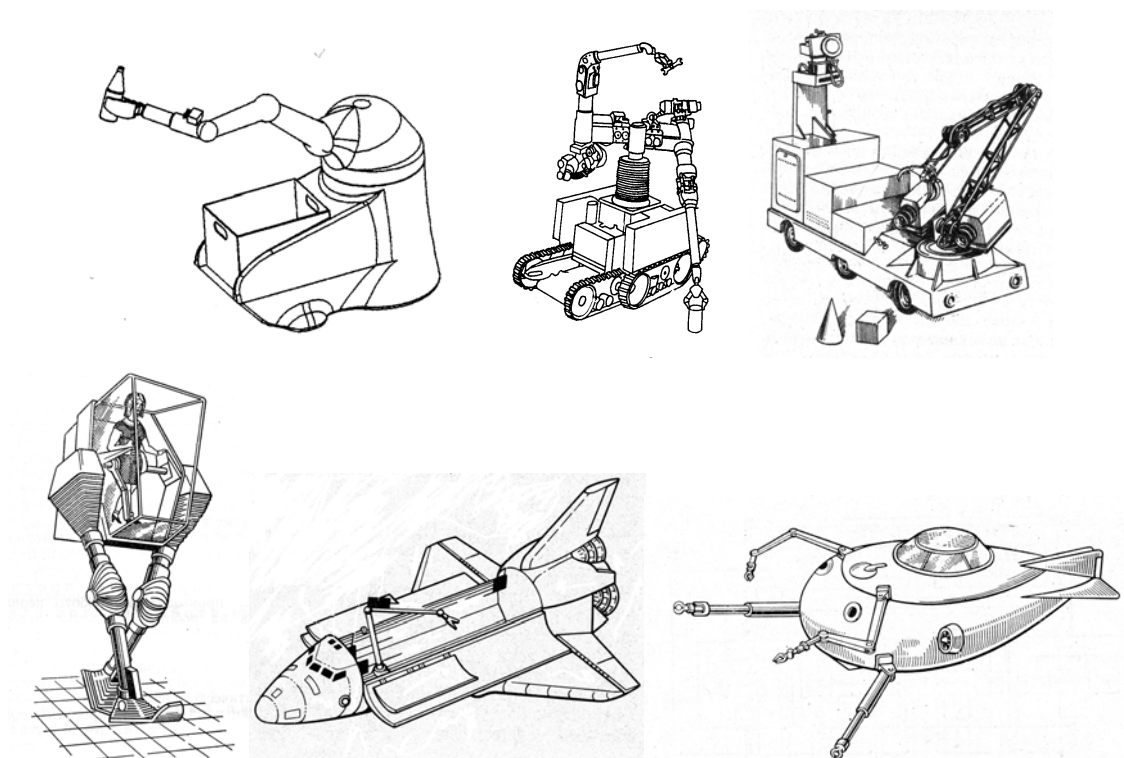
Obr. 4.13 Chápadlá manipulačných robotov

Pre viaceré aplikácie je vhodné, ak technologická hlavica je automaticky vymeniteľná. Príklad takéhoto riešenia je na obr. 4.14.

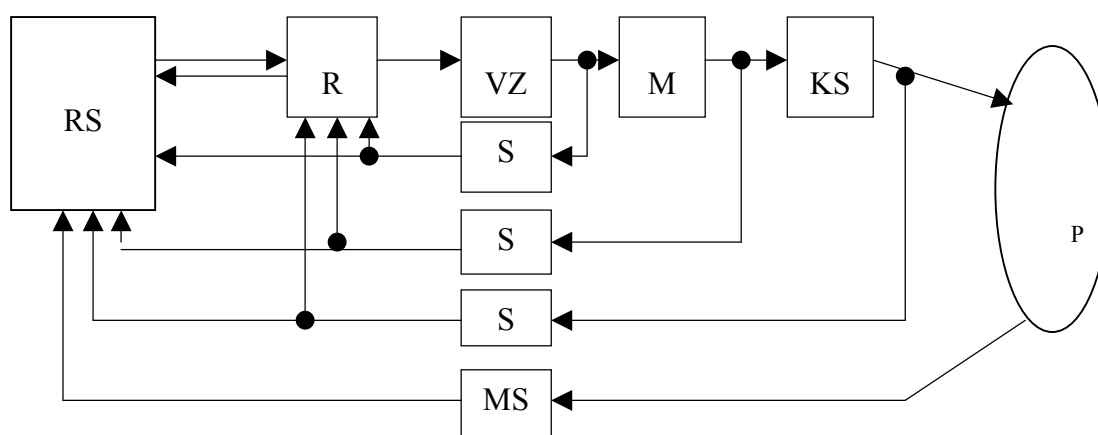


Obr.4.14. Príklad výmenných technologických hlavíc

Osobitnú skupinu robotov tvoria **mobilné roboty**, ktoré môžu byť: **kráčajúce**, **kolesové**, **pásové**, **plávajúce**, **lietajúce**. Poslanie mobilných robotov môže byť rôzne. Slúžia ako dopravné systémy v **automatickom dopravno - skladovom systéme**, ako inšpekčné roboty, môžu byť použité ako roboty v domácnosti, pre nemobilných ľudí, ako záchranné roboty a pod. Mobilný robot má nadstavbu podľa jeho určenia. Príklady realizácie takýchto robotov sú na obr.4.15. Mobilné roboty môžu pracovať ako automatické systémy alebo ako diaľančne riadené systémy. Mobilné roboty pre prácu v zložitom prostredí sú riadené s využitím princípov **teleexistencie** a **teleprítomnosti**. Počet aplikácií mobilných robotov prudko narastá. Hlbšie skúmanie tejto problematiky je v osobitnom predmete v inžinierskom štúdiu.



Obr. 4.15 Príklady mobilných robotov



Obr. 4.16 Funkčná schéma robota

Funkčná schéma robota môže byť podľa obr.4.16. Všetky signály v schéme sú vektory. Bloková schéma len principiálne znázorňuje spojenie blokov a ich hierarchiu. Na obrázku je: RS - riadiaci systém, R - regulátory, VZ - výkonové zosilňovače, M - motory, KS - kinematická schéma, P - prostredie, S - snímače napätia, prúdu, otáčok, polohy, zrýchlenia, MS - merací systém prostredia.

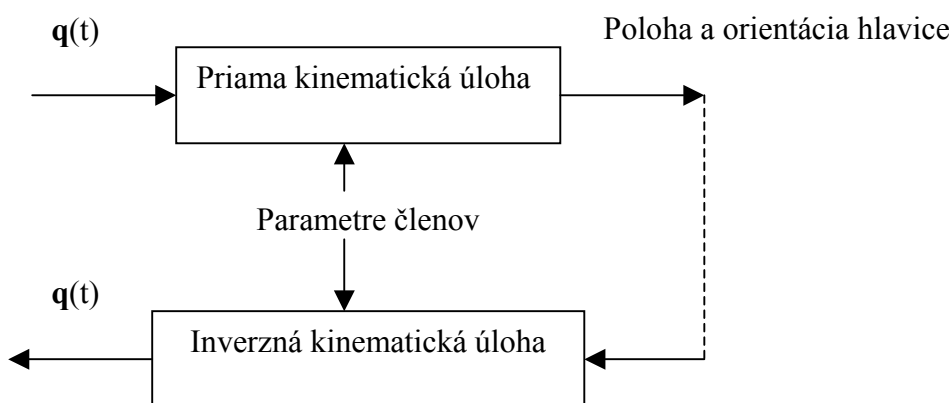
Na výkonný systém robotov sú kladené požiadavky na presnosť dosiahnutia polohy, na opakovanosť dosiahnutia polohy, na presnosť sledovania trajektórie, na dynamiku pohybu, na obchádzanie prekážok v pracovnom priestore,...Vlastnosti automatických robotických systémov sú hodnotené ich charakteristikami.

4.1 Kinematika manipulátora

Priestorové rozloženie členov a zmeny konfigurácie systému v procese jeho pohybu vyžadujú riešiť geometrické, kinematické a dynamické charakteristiky. Pre opis je možné použiť rôzne metódy. Najčastejšie sa na opis úloh kinematiky používa maticové vyjadrenie. Názornosť vyplýva z geometrickej interpretácie matice ako transformácie vektorov opisujúcich polohu bodu priestoru v rôznych súradnicových systémoch.

Pre vektor kĺbových premenných $\mathbf{q}(t)$ a známe geometrické vlastnosti robota sa určuje poloha a orientácia hlavice vzhľadom na základný súradnicový systém, čo je **priama kinematická úloha**. Priamou úlohou sa určí poloha a orientácia súradnicového systému chápädla v absolútnom, globálnom, systéme.

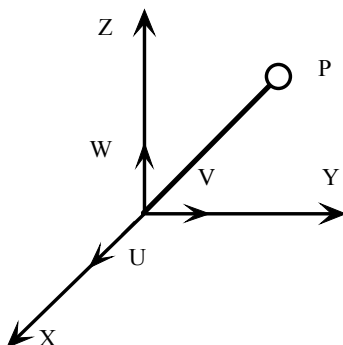
Inverzná kinematická úloha - pri známych geometrických parametroch členov sa určujú všetky možné vektory kĺbových premenných, ktoré zabezpečia danú polohu a orientáciu chápädla.



Obr.4.17 Priama a inverzná kinematická úloha

4.1.1 Matice otočenia

Prvou úlohou, ktorú je potrebné riešiť, je priama úloha kinematiky. Základnými úlohami je určenie vzájomného vzťahu polôh a pohybov súradnicových systémov. Tým najjednoduchším sa javí otočenie.



Obr.4.18 Súradnicové systémy OXYZ a OUVW

Systém OXYZ - je fixovaný v priestore, je to absolútny systém, globálny systém. Systém OUVW - je spojený s telesom a otáča sa s ním voči OXYZ. Bod P možno definovať v ľubovoľnom systéme

$$\mathbf{P}_{UVW} = |p_U, p_V, p_W|^T \quad (4.4)$$

$$\mathbf{P}_{XYZ} = |p_X, p_Y, p_Z|^T \quad (4.5)$$

Matica $\mathbf{R}$ transformuje $\mathbf{P}_{UVW}$ do $\mathbf{P}_{XYZ}$

$$\mathbf{P}_{XYZ} = \mathbf{R} \mathbf{P}_{UVW} \quad (4.6)$$

pre

$$\mathbf{P}_{UVW} = p_U \cdot \mathbf{i}_U + p_V \cdot \mathbf{j}_V + p_W \cdot \mathbf{k}_W \quad (4.7)$$

pre zložky vektora $\mathbf{P}_{XYZ}$ platí

$$\begin{aligned} p_X &= \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{P} = \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{i}_U p_U + \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{j}_V p_V + \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{k}_W p_W \\ p_Y &= \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{P} = \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{i}_U p_U + \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{j}_V p_V + \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{k}_W p_W \\ p_Z &= \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{P} = \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{i}_U p_U + \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{j}_V p_V + \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{k}_W p_W \end{aligned} \quad (4.8)$$

v maticovom zápise

$$\begin{pmatrix} p_X \\ p_Y \\ p_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{k}_W \\ \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{k}_W \\ \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{k}_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_U \\ p_V \\ p_W \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{P}_{XYZ} = \mathbf{R} \mathbf{P}_{UVW} \quad (4.10)$$

Podobne možno určiť $\mathbf{Q}$

$$\mathbf{P}_{UVW} = \mathbf{Q} \mathbf{P}_{XYZ} \quad (4.11)$$

$$\begin{pmatrix} p_U \\ p_V \\ p_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{i}_U \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{i}_U \cdot \mathbf{j}_Y & \mathbf{i}_U \cdot \mathbf{k}_Z \\ \mathbf{j}_V \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{j}_V \cdot \mathbf{j}_Y & \mathbf{j}_V \cdot \mathbf{k}_Z \\ \mathbf{k}_W \cdot \mathbf{i}_X & \mathbf{k}_W \cdot \mathbf{j}_Y & \mathbf{k}_W \cdot \mathbf{k}_Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_X \\ p_Y \\ p_Z \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Vzhľadom na komutatívnosť skalárneho súčinu platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T \\ \mathbf{Q}\mathbf{R} &= \mathbf{E} \end{aligned} \quad (4.13)$$

transformácie $\mathbf{P}_{UVW}$ a $\mathbf{P}_{XYZ}$ sú ortogonálne transformácie.

Základnou úlohou je otočenie systému OUVW okolo základných osí systému OXYZ. Vzniknú matice elementárnych otočení $\mathbf{R}_{X,\alpha}$; $\mathbf{R}_{Y,\varphi}$; $\mathbf{R}_{Z,\gamma}$.

Otočenie o uhol α okolo osi OX matica $\mathbf{R}_{X,\alpha}$

$$\mathbf{R}_{X,\alpha} = \begin{vmatrix} \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{i}_X \cdot \mathbf{k}_W \\ \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{j}_Y \cdot \mathbf{k}_W \\ \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{i}_U & \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{j}_V & \mathbf{k}_Z \cdot \mathbf{k}_W \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix} \quad (4.14)$$

Otočenie o uhol φ okolo osi OY

$$\mathbf{R}_{Y,\varphi} = \begin{vmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{vmatrix} \quad (4.15)$$

Otočenie o uhol θ okolo osi OZ

$$\mathbf{R}_{Z,\theta} = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.16)$$

Zložitejšie otočenie sa uskutoční vynásobením príslušných matic. Dôležitá je postupnosť násobenia matic. Zoberme príklad rôznej postupnosti násobenia matic:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{Y,\varphi} \mathbf{R}_{Z,\theta} \mathbf{R}_{X,\alpha} =$$

$$= \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \alpha - \cos \varphi \sin \theta \cos \alpha & \cos \varphi \sin \theta \sin \alpha + \sin \varphi \cos \alpha \\ \sin \theta & \cos \theta \cos \alpha & -\cos \theta \sin \alpha \\ -\sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta \cos \alpha + \cos \varphi \cos \varepsilon & \cos \varphi \cos \alpha - \sin \varphi \sin \theta \sin \alpha \end{vmatrix} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{X,\alpha} \mathbf{R}_{Z,\theta} \mathbf{R}_{Y,\varphi} =$$

$$= \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta \\ \cos \alpha \sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \alpha & \cos \alpha \sin \theta \sin \varphi - \cos \varphi \sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \theta \cos \varphi - \sin \varphi \cos \alpha & \cos \theta \sin \alpha & \sin \varphi \sin \alpha \sin \theta - \cos \varphi \cos \alpha \end{vmatrix} \quad (4.18)$$

Pre jednoduchší zápis nahradíme v ďalšom cos len „c“ a sin len „s“.

Systém OUVW sa môže otáčať aj okolo vlastných osí.

Platia pravidlá

- na začiatku sú oba systémy totožné
- ak sa systém OUVW otočí okolo niektorej osi X,Y,Z násobí sa výsledná matica predchádzajúceho pohybu zľava zodpovedajúcou maticou elementárneho pohybu
- ak sa koná pohyb okolo niektorej osi OUVW, násobí sa matica predchádzajúceho pohybu zprava zodpovedajúcou maticou elementárneho pohybu.

Otočenie sa môže uskutočňovať aj okolo ľubovolnej osi. Ide o otočenie systému OUVW, spojeného s pohybom telesa, okolo **vektora** $\mathbf{r}$ o uhol φ . Otočenie sa môže realizovať postupnosťou

$$\mathbf{R}_{X,\alpha}, \mathbf{R}_{Y,-\beta}, \mathbf{R}_{Z,\varphi}, \mathbf{R}_{Y,\beta}, \mathbf{R}_{X,-\alpha}$$

aby sa stotožnil vektor $\mathbf{r}$ s osou OZ, potom sa vykonalo otočenie o φ okolo OZ a vrátil sa systém do pôvodnej polohy.

Výsledná matica je

$$\mathbf{R}_r = \mathbf{R}_{X,-\alpha} \mathbf{R}_{Y,\beta} \mathbf{R}_{Z,\varphi} \mathbf{R}_{Y,-\beta} \mathbf{R}_{X,\alpha} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & s\alpha \\ 0 & -s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\varphi & -s\varphi & 0 \\ s\varphi & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & -s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$|\mathbf{r}| = 1, \quad \mathbf{a} = \sqrt{r_y^2 + r_z^2}, \quad (4.20)$$

$$s\alpha = \frac{r_y}{a}; \quad c\alpha = \frac{r_z}{a}; \quad s\beta = r_x; \quad c\beta = a \quad (4.21)$$

Po dosadení do predchádzajúceho vzťahu

$$\mathbf{R}_{r,\varphi} = \begin{bmatrix} r_x^2 V_\varphi + c\varphi & r_x r_y V_\varphi - r_z s\varphi & r_x r_z V_\varphi + r_y s\varphi \\ r_x r_y V_\varphi + r_z s\varphi & r_y^2 V_\varphi + c\varphi & r_y r_z V_\varphi - r_x s\varphi \\ r_x r_z V_\varphi - r_y s\varphi & r_y r_z V_\varphi + r_x s\varphi & r_z^2 V_\varphi + c\varphi \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$V_\varphi = 1 - c\varphi$$

4.1.2 Homogénne súradnice a transformačné matice

Matice otočenia nenesú informáciu o

- posunutí
- merítku.

Zavádzajú sa preto homogénne súradnice a transformačné matice. Homogénne transformačné matice sú 4x4. Nový vektor $\mathbf{p}$ v homogénnych súradniciach $\mathbf{p} = |wp_x, wp_y, wp_z, w|^T$. Vyjadrenie trojrozmerného vektora v homogénnych súradniciach nie je jednoznačné. Fyzikálne súradnice sú s homogénnymi spojené nasledovne

$$p_x = \frac{wp_x}{w} \quad w - \text{merítko}, \quad p_x - \text{fyzikálna súradnica}, \quad wp_x - \text{homogénna súradnica}$$

V robotike $w = 1$ vždy, vtedy sú pochopiteľne fyzikálne a homogénne súradnice rovnaké. Iné merítka sa používajú v grafike.

Homogénne transformačné matice obsahujú nasledovné submatice

$$\mathbf{T} = \begin{vmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{p}_{3 \times 1} \\ \mathbf{f}_{1 \times 3} & \mathbf{1}_{1 \times 1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{otočenie} & \text{posunutie} \\ \text{zmena perspektívy} & \text{merítka} \end{vmatrix} \quad (4.23)$$

Homogénne matice elementárnych otočení

$$\mathbf{R}_{X,\alpha} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.24)$$

$$\mathbf{R}_{Y,\varphi} = \begin{vmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.25)$$

$$\mathbf{R}_{Z,\Theta} = \begin{vmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.26)$$

Pre posunutie v OXYZ o $[d_x, d_y, d_z]^T$ je homogénna matica elementárneho posunutia

$$\mathbf{T}_{POS} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.27)$$

Matica zmeny merítok

$$\mathbf{T}_{MER} = \begin{vmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \end{vmatrix} \quad (4.28)$$

pričom: a - ovplyvňuje x , b - y , c - z , d – všetky súradnice. Preto a, b, c sú lokálne merítka, d – globálne. Ak $0 < d < 1$ - nastane „rozťahnutie“ súradníc

4.1.3 Homogénne transformačné matice viacerých pohybov

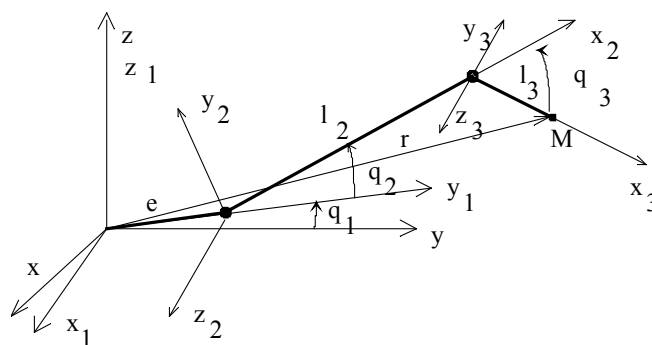
Výsledná transformačná matica sa získa vynásobením matíc elementárnych otočení a posuvov.

Platí:

- na začiatku sú oba systémy zhodné, preto transformačná matica je E
- ak sa pohyblivý systém OUVW otáča/posúva vzhľadom na OXYZ predchádzajúcu transformačnú maticu treba násobiť zľava homogénnou elementárnou maticou
- ak sa pohyblivý systém OUVW otáča/posúva vzhľadom na jednu z vlastných osí, potom sa predchádzajúca matica násobí sprava.

Pre opis rotačných a translačných spojení kinematických dvojíc je používaný maticový výpočet. Vychádza sa z homogénnych transformačných matíc opisujúcich polohu systému súradníc člena vo vzťahu k súradniciam predchádzajúceho člena.

Na obr.4.19 je príklad kinematickej schémy pre ktorú sú vypočítané zložky výsledného vektora $\mathbf{r}$ v pravouhlom súradnicovom systéme.



Obr.4.19 Príklad kinematickej schémy

Zložky výsledného vektora polohy koncového bodu sú:

$$\begin{aligned} x_{OM} &= -l_3 \sin q_1 \cos(q_2+q_3) - e \sin q_1 - l_2 \sin q_1 \cos q_2 \\ y_{OM} &= l_3 \cos q_1 \cos(q_2+q_3) + e \cos q_1 + l_2 \cos q_1 \cos q_2 \\ z_{OM} &= l_3 \sin(q_2+q_3) + l_2 \sin q_2. \end{aligned} \quad (4.29)$$

4.1.4 Vplyvy nepresnosti modelu

Chyby robotických systémov budú skúmané v časti o charakteristikách robotických systémov. Ak je model tvorený rovnicami napr. z príkladu na obr.4.19 potom je zrejmé, že:

- zmena dĺžky e (konštrukcia) sa prejaví na X a Y
- zmena dĺžky ktoréhokoľvek ramena (l_2 , l_3) sa prejaví na polohe X, Y, Z
- chyby uhlov q_2 a q_3 sa prejaví na všetkých súradniciach
- chyba uhlu q_1 sa prejaví na X a Y

Chyba modelu (zle identifikované parametre kinematickej schémy) ovplyvňuje pri programovom riadení polohu a orientáciu koncového bodu robota. Ak sa má kalibrovať systém, treba vychádzať z určenia e, l_2, l_3 . Je však potrebné určiť aj vektor konfigurácie $\mathbf{q}_0$ lebo tiež určuje východiskový stav a zároveň nepresnosť modelu.

Riadenie systému sa uskutočňuje zmenou $q_1 q_2 q_3$.

4.2 Pohonné systémy robotov

Pohonné systémy môžu byť realizované hydraulickými, pneumatickými alebo elektrickými motormi. Tieto môžu byť realizované s rotačným alebo translačným pohybom.

Vzhľadom na umiestnenie motorov, prenos síl a momentov sú dve základné skupiny:

- manipulátory, v ktorých sú pohony priamo v miestach spojenia kinematických dvojíc, pričom jedna časť pohonu je spojená s jedným členom a druhá s druhým členom kinematickej dvojice
- manipulátory, v ktorých sú pohony všetkých členov uložené na základni a prenos sa uskutočňuje pomocou prevodov.

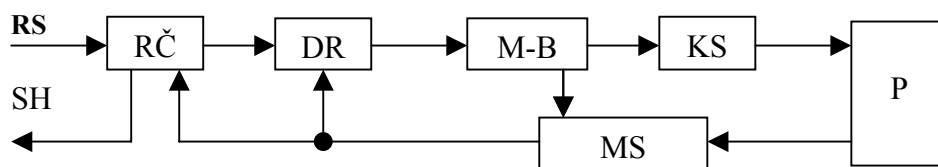
Sú realizované aj systémy s kombinovaným rozmiestnením pohonov.

Výhodou prvej koncepcie sú jednoduché väzby medzi motorom a kĺbom. Nevýhodou je zníženie nosnosti, zhoršenie dynamiky, ťažšia ochrana pohonov proti pôsobeniu prostredia, ťažká realizácia kompaktného a pružného mechanizmu schopného pracovať v zložitých podmienkach. Špecifické je postavenie systémov s tzv. priamymi motormi (bezreduktorové vysoko momentové motory).

Výhodou druhej koncepcie je sústredenie ťažkých motorov v blízkosti základne robota. Takáto koncepcia odstraňuje nevýhody prvej koncepcie. Nevýhodou tejto koncepcie sú vysoké požiadavky na presnosť zložitých prenosov síl a momentov od motorov do príslušnej kinematickej dvojice.

Pri analýze a návrhu systémov je potrebné poznať hmotnosti a momenty zotrvačnosti. Pri zjednodušenej analýze závislosti hmotnosti a rozmerov od zvolenej koncepcie umiestnenia motorov sa predpokladá, že členy kinematickej schémy sú valcové telesá s hmotou sústredenou v strede kĺbu a hmotnosti motorov a reduktorov sú tiež sústredené v kĺboch [Aplikovaná robotika].

Servosystém je riadiacou časťou mechanizmu robota. Všeobecná bloková schéma servosystému robota je na obr.4.20, kde RS je riadiaci signál, SH – spätné hlásenie, RČ – riadiaci člen, DR – dynamické regulátory, M-B – motory a brzdy, KS – kinematická schéma, MS – merací systém, P – prostredie.



Obr.4.20 Všeobecná bloková schéma servosystému robota

Riadiaci člen generuje signály želaných stavov pre regulátory dynamickej úrovne riadenia. Táto riadi motory a brzdy. Riadiaci člen potvrdzuje pre nadradenú úroveň vykonanie zadaných príkazov. Signál SH môže obsahovať i ďalšie informácie (napr. informáciu o odchyľkách, informáciu o zaťažení, informáciu o teplote a pod.).

Na servosystémy robotov sa kladú nasledovné požiadavky: minimálna hmotnosť a rozmery, vysoká presnosť, vysoká dynamika, necitlivosť na zmeny parametrov a záťažného momentu, plynulý rozbeh a zastavenie, rovnomerná rýchlosť pohybu, pohyb bez preregulovania. Od motorov sa vyžaduje: vysoký výkon na jednotku hmotnosti, dobré regulačné vlastnosti,

vysoká účinnosť, tichý chod, rovnomerný chod aj pri malých rýchlostiach, vysoká životnosť, minimálny vplyv na životné prostredie a pod.

V súčasnosti sa používajú tri typy motorov na pohon kinematickej schémy: hydraulické, pneumatické a elektrické. Konceptie týchto pohonných systémov môžu byť veľmi rôzne. Aj samotné motory môžu byť rôzne realizované aj pri použití uvedených základných princípov. V ďalšom sa zameriame len na „klasické“ motory a servosystémy.

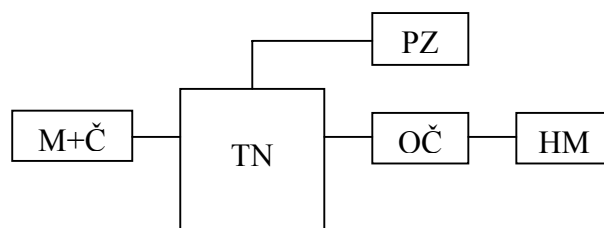
4.2.1 Hydraulické systémy

Hydraulické systémy sa vyznačujú:

- nízkou hmotnosťou na jednotku výkonu
- vysokou dynamikou (malou časovou konštantou, vysokou možnou frekvenciou reverzácie)
- dobrými regulačnými vlastnosťami (plynulý chod, plné zaťaženie aj pri $\omega=0$)
- možnosťou realizácie priamočiarych pohybov.

Nevýhody použitia týchto systémov sú:

- potreba samostatného energetického zdroja
- zmena vlastností motora so zmenou teploty a dobou prevádzky
- vysoké požiadavky na vlastnosti pracovného média
- možné znečisťovanie prostredia
- hluk agregátu
- pomerne zložité dosiahnutie vysokých rýchlostí
- systém má vlastnosti systému s rozloženými parametrami.



Obr.4.21 Principiálna bloková schéma servosystému s hydromotorom

Principiálna bloková schéma servosystému s hydraulickým motorom je na obr.4.21, kde je označené: M+Č – motor a čerpadlo, TN – tlaková nádoba, PZ – prídavné zariadenia (filtre, poistné ventily), OČ – ovládacie členy (prvky na ovládanie tlaku, prietoku, smeru), HM – hydromotor.

Pre lineárne hydraulické motory platia vzťahy:

$$P = p \cdot Q$$

$$F = p \cdot S$$

$$v = Q/S$$

kde P je výkon, F – sila, v – rýchlosť, p – tlakový spád, Q – prietok, S – plocha piesta.

Pre riadenie je obvykle prístupné len meranie výstupných veličín motora – rýchlosť a poloha, čo obmedzuje možnosti realizácie riadiacich štruktúr.

Na riadenie prietoku sa používajú elektrohydraulické ventily. Ich hysteréza závisí od nominálneho prietoku ventilu. Preto je mimoriadne dôležité správne dimenzovanie ventilu a motora.

4.2.2 Pneumatické systémy

Pre pneumatické motory možno uviesť nasledovné výhody:

- sú lacné
- jednoducho riaditeľné
- spoľahlivé, možno ich použiť v nebezpečnom prostredí
- neznečisťujú prostredie
- nepotrebujú odvádzanie média
- umožňujú vykonávať rýchle pohyby
- umožňujú realizovať veľké zdvihy
- majú „mäkké charakteristiky“.

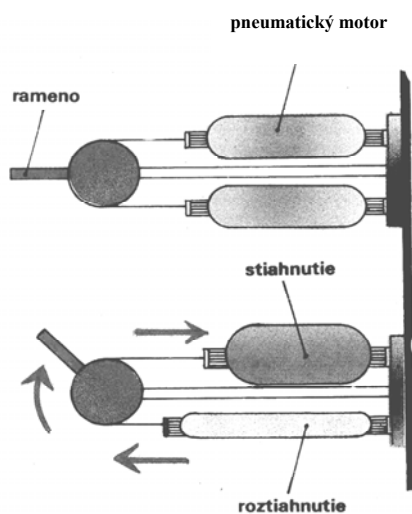
Základné nedostatky sú:

- menší výstupný výkon
- obtiažnejšie dosiahnutie želanej rýchlosti v dôsledku stlačiteľnosti média
- obtiažnejšie dosiahnutie želanej presnosti polohovania
- potreba čistenia vzduchu
- potreba mazania.

Pre lineárne motory platí:

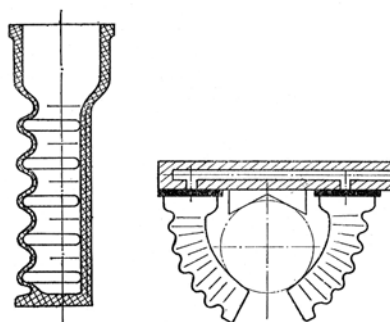
$F = kpS$, $k = 0,5-0,6$ pri rýchlych pohyboch a $k = 1$ pre piest bez pohybu, kde F je sila, p – tlakový spád, S – plocha piesta.

Na zlepšenie tuhosti servosystému sa používajú elektromechanické brzdy, ktoré po dosiahnutí želanej polohy znemožnia ďalší pohyb a tým sa môže dosiahnuť tuhosť hydraulického pohonu.



Obr.4.22 Pneumatický pohon ramena robota

Na obr.4.22 je príklad pohonu ramena pneumatickým motorom, ktorý pracuje na princípe zmeny tlaku v pružnom valci a tým zmeny rozmerov.



Obr.4.23 Pneumatický pohon chápadla

Na obr.4.23 je príklad pneumatického pohonu chápadla robota. Zmena tvaru sa dosahuje zmenou tlaku vzduchu v „prstoch“ chápadla.

4.2.3 Elektrické systémy

Ako hydraulické tak aj pneumatické servosystémy používajú predovšetkým elektrické meracie a riadiace členy. Na tej istej báze sú realizované systémy s elektrickými motormi. Výhodou týchto je:

- vysoká rýchlosť spracovania signálov
- jednoduchá obsluha a údržba
- výborné regulačné vlastnosti
- nízka hlučnosť
- nevyžadujú zmenu formy energie.

Elektrické motory sa používajú lineárne a rotačné (rýchlobežné, pomalobežné a tzv. priame motory). Pre niektoré aplikácie sú použité monobloky motor - brzda. Obvyklé je spojenie motor – prevodovka. Používajú sa jednosmerné motory ako aj striedavé motory. Používajú sa aj špeciálne elektrické pohonné systémy, ktoré sa vyznačujú novými vlastnosťami (podľa realizácie – vysokým momentom, vysokou dynamikou, veľmi malými rozmermi,...).

4.3 Úvod do projektovania výkonného systému

Pri projektovaní výkonného systému je potrebné vychádzať z návrhu koncepcie robota. Táto je závislá od radu faktorov, ktoré môžu byť špecifické pre danú aplikáciu. Celý proces je iteratívny a často je možné návrh pokladať len za kompromis splnenia požiadaviek, ktoré môžu byť protirečivé. Pre manipulačné roboty je obvyklé definovať charakteristiky, ktoré stanovujú základné vlastnosti roboty. V ďalšom sú uvedené základné údaje pre návrh výkonného systému robota.

4.3.1 Vstupné údaje pre projektovanie PR

Pre projektovanie robota je potrebné vychádzať z nasledovných charakteristík:

- *funkčné*: počet, trieda a vzájomné rozloženie osí pohybu, tvar a rozmery pracovnej zóny, nosnosť robota, prípustné technické sily na pracovný orgán, rozsahy rýchlostí a zrýchlení, presnosť zadania rýchlostí a zrýchlení, počet a typ príkazov v programe, počet a typ komunikačných kanálov, adaptácia robota na zmenu polohy objektu, adaptácia na zmenu tvaru, hmoty objektu
- *konštrukčné* (výpočet z hľadiska - presnosti, síl, hmotnosti, tuhosti...): spôsob umiestnenia PR, pracovný priestor, rozsahy regulácie vzájomnej polohy osí pohybu, systematická chyba polohovania, náhodná statická a dynamická chyba, maximálne zrýchlenie pri rozbehu a brzdení, pružnosť manipulátora, vlastné frekvencie a koeficienty tlmenia, hmotnosti členov robota

- *prevádzkové*: spoľahlivosť, ohodnotenie opraviteľnosti, čas preladenia na nové objekty alebo režimy práce, potrebný príkon, požiarne bezpečnosť, cena

Pri príprave je potrebné určiť: rozmery a tvar pracovnej zóny, počet bodov a presnosť polohovania, nosnosť, rýchlosť, typy pohonov, spôsob riadenia, spôsob komunikácie s druhými zariadeniami.

Potom sa určí: umiestnenie robota, typ chápadla, principiálna schéma manipulátora, typ, vzájomná orientácia, počet, rozloženie osí pohybu, typ pohonného systému, typ riadiaceho systému, rýchlosti a zrýchlenia bodov KS, zaťaženie pri najťažších prevádzkových podmienkach, presnosť pre jednotlivé uzly

Z tuhosti a pružnosti členov sa určia: tvary a rozmery členov KS, vedení..., požiadavky na presnosť zhotovenia, konštrukcia členov, regulačné štruktúry

4.3.2 Energetický návrh pohonného systému

Je potrebné určiť: typ pohonu, typ motora, výkon, moment, rýchlosť motora, prevodové číslo, reduktora, určiť parametre výkonových zosilňovačov, určiť dynamické obmedzenia pohonu. Súčasťou návrhu je aj výber štruktúry regulačných obvodov, návrh snímačov, syntéza parametrov regulátorov.

Pri optimalizácii systému je pozornosť venovaná hmotnosti modulov, energetickým ukazovateľom, maximálnemu zrýchleniu.

Je potrebné poznať maximálny moment záťažný, minimálnu a maximálnu hodnotu momentu zotrvačnosti, maximálnu rýchlosť, maximálne zrýchlenie, maximálnu hodnotu prípustnej chyby. Pritom je potrebné uvažovať pružnosť reduktora a členov výkonovej časti systému, nelineárne charakteristiky členov, presnosť kompenzácie vzájomného vplyvu pohybov členov, zmenu parametrov systému so zmenou pracovného bodu.

Pre výber motora sa uvažuje: maximálny moment záťaže, maximálna rýchlosť, maximálne zrýchlenie, moment zotrvačnosti. V ustálenom stave je potrebný výkon:

$$P = M_{ZMAX} \omega_{ZMAX} \text{ resp. } P = F \cdot v$$

Potom výkon motora je

$$P_M = kP \text{ kde } k \in (1,2;2,5).$$

Z katalógu sa vyberie motor s daným alebo väčším výkonom, s minimálnym momentom zotrvačnosti, minimálnou hmotnosťou a minimálnymi rozmermi. Tým je známe J_M , M_{MNOM} , ω_{MNOM} . Určí sa predbežná hodnota prevodu reduktora

$$i = \frac{\omega_{MNOM}}{\omega_{ZMAX}}. \quad (4.30)$$

Dve rovnice dynamiky systému

$$J_{M\phi}'' = M_M - M_{TM} - \frac{M}{i} \quad (4.31)$$

$$J_{Z\phi}'' = M - M_{TZ} - M_Z \quad (4.32)$$

pričom

$$i\phi = \phi_M$$

Po úprave

$$\varphi_M''(J_M + \frac{J_Z}{i^2}) = M_M - M_{ZN} \quad (4.33)$$

$$M_{ZN} = M_{TM} + \frac{M_{TZ} + M_z}{i} \quad (4.34)$$

Pri známom reduktore je moment motora

$$M_M = \varphi_M''(J_M + \frac{J_Z}{\eta i^2}) - M_{ZNU} \quad (4.35)$$

kde M_{ZNU} je M_{ZN} aj s uvažovaním účinnosti prevodu.

Ak sa režim činnosti skladá z úsekov s konštantným zrýchlením výstupného hriadeľa ε_{ZMAX} , potom je

$$M_M = (J_M + \frac{J_Z}{\eta i^2})i\varepsilon_{ZMAX} - M_{ZNU} \quad (4.36)$$

Pre systém, v ktorom dochádza k reverzácii je výhodnejšie vychádzať z predpokladu

$$\varphi(t) = \varphi \sin \omega t. \quad (4.37)$$

Motor musí byť napájaný z **výkonového zosilňovača**, ktorého parametre sú stanovené tak, že ako napäťové, tak prúdové obmedzenia zosilňovača sú vyššie ako maximálne dovolené príslušné parametre motora.

Pri **výbere prevodovky** je potrebné hodnotiť rozsah obvyklých prevodových pomerov, tuhosť a účinnosť prevodovky. Obvyklé parametre prevodoviek sú uvedené v tabuľke.

Tabuľka

typ	I	C [Nm/rad]	η
valcové, kónické	50-100	10^4 - 10^7	0,9-0,98
závitové	30-100	10^5 - 10^6	0,7-0,8
planetové	30-200		0,96-0,98
vlnové	80-250	10^4 - 10^5	0,7-0,9

Prevod na lineárny pohyb

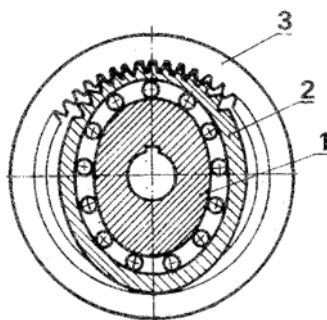
- **guličkové skrutky**

pre $\phi = 10$ – 50 mm je $i = \frac{\omega_M}{v} = 500 - 1600$; $c = 10^7 - 10^8$ N/m; $\eta = 0,9$ - $0,98$

- **hrebeňový prevod**

vhodné pre $v = 0,5$ - 1 m/s a dráhu $0,5$ - 10 m

$i = 50$ - 200 ; $c = 10^6 - 10^7$; $\eta = 0,9$ - $0,98$



Obr.4.24 Rez vlnovou (harmonickou) prevodovkou

Na obr.4.24 je označené: 1- generátor vln, 2- pružné koleso, 3 – stator. Vlnové prevodovky sa používajú veľmi často v robotoch pre výhodné vlastnosti. Ich významnou nevýhodou je existencia pomerne značnej pružnosti.

Pri výbere koncepcie pohonu z hľadiska použitia rýchlobežného alebo pomalobežného motora sa vychádza z hodnotenia hmotnosti modulu. Pre motor i reduktor platí:

$$M_{MN} = k_1 m_M \quad (4.38)$$

$$M_{RN} = k_2 m_R$$

kde M je moment a m je hmotnosť príslušného modulu. Koeficient $k_1 \in (0,1 + 0,35)$ Nm/kg pre jednosmerné motory s vlastným chladením a $k_2 \in (8;19)$ Nm/kg pre vlnové prevody. Uvedené komponenty sú veľmi častými pri konštruovaní robotov.

Hmota celého modulu motor – reduktor je

$$m = M_{RN} \left(\frac{1}{ik_1} + \frac{1}{k_2} \right) \quad (4.39)$$

minimálna hmotnosť bude pre $i \rightarrow \infty$. Obvykle je $i \in (2,5;5) \frac{k_2}{k_1}$, čo pre skôr uvedené hodnoty dáva interval pre prevodové číslo $i \in (125;400)$.

Výberom prevodového čísla je možné ovplyvniť aj tlmenie kmitov členov mechanizmu.

Z hľadiska extrému zrýchlenia výstupného hriadeľa a zároveň minima potrebného momentu je možné určiť prevodové číslo na základe rovnice

$$iM_M - M_{Z2} = (J_1 i^2 + J_2) s \omega_2 \quad (4.40)$$

Určením extrému zrýchlenia podľa prevodového čísla reduktora zistíme optimálnu hodnotu prevodového čísla i

$$i = \frac{M_Z}{M_M} \pm \sqrt{\frac{M_Z^2}{M_M^2} + \frac{J_2}{J_1}} \quad (4.41)$$

Z hľadiska parametrov systému je optimálne prevodové číslo

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{J_2}{J_1}} \quad (4.42)$$

Pre túto hodnotu má rovnaký vplyv na dynamiku systému vstupná i výstupná strana reduktora.

5. CHARAKTERISTIKY ROBOTOV

Vzhľadom na to, že robot je zložitý systém, ktorý má viacero subsystémov vykonáva sa hodnotenie jeho vlastností vo viacerých oblastiach. Charakteristiky robotov majú význam z hľadiska porovnania vlastností rôznych systémov ako aj z hľadiska definovania požiadaviek na systémy pri projektovaní. Vlastnosti priemyselného robota určujú charakteristiky:

mechanické

- **geometrické** - dosiahnuteľnosť
 - manipulatívnosť
- **presnosť** - polohovania, orientácie
- **kinematické** - mobilnosť
 - zrýchliteľnosť
- **statické** - poddajnosť
 - nosnosť

algoritmické

- **riadiace** - mnemotechničnosť
 - ekonomičnosť
 - dynamika.

V dôsledku nelinearit sú vlastnosti manipulačných systémov rôzne v rôznych bodoch pracovného priestoru. Spoločná metóda na opis a skúmanie charakteristík sú **elementárne operácie**. Sú to z pohľadu určenia charakteristík rôzne pohybové úlohy, ktoré sú nezávislé od konkrétnej konštrukcie.

Pri hodnotení sa uplatnia dve úlohy skúmania vlastností:

- analýza možností vykonania konkrétnej elementárnej operácie v určitom bode; vlastnosť sa skúma na základe analýzy geometrie, presnosti, kinematiky, statiky alebo algoritmov zostrojenia pohybov
- zostrojenie globálneho ohodnotenia vlastnosti, zahrňujúce celú skupinu výsledkov vykonania elementárnej operácie určitého typu; vlastnosť sa hodnotí pomocou integrovania elementárnych operácií a konfigurácií manipulačného systému.

Základné technické parametre (súvisiace s konštrukciou výkonného systému) sú:

- nosnosť - maximálna hmotnosť predmetov vrátane hlavice premiestňovaných pri zadaných podmienkach (rýchlosť, vysunutie ruky...)
- počet osí pohybu - počet možných pohybov vzhľadom na základný systém
- chyba polohovania - presnosť polohovania, opakovaná presnosť polohovania
- pracovná zóna – priestor.

5.1 Dosiahnuteľnosť

Časť úlohy polohovania - polohovanie bez orientácie. Dosiahnuteľnosť D_0 je určená polohami vektora

$$\mathbf{r}(\varphi) = \mathbf{T}(\varphi) \mathbf{r}_M \quad (5.1)$$

pričom pre kľbové premenné platí

$$\varphi = \{\varphi_{\text{IMIN}} < \varphi_1 < \varphi_{\text{IMAX}}\} \quad (5.2)$$

Dosiahnuteľnosť sa ohodnocuje veľkosťou (objemom) pracovného priestoru $V(D_0)$. Pri analýze dosiahnuteľnosti sú skúmané tri úlohy:

- určenie veľkosti $V(D_0)$
- určenie pre daný vektor $\mathbf{r}$, či patrí bod P do pracovného priestoru
- určenie uhla ϕ , ktorý zabezpečí polohovanie v bode P – inverzná kinematická úloha.

Používa sa označenie:

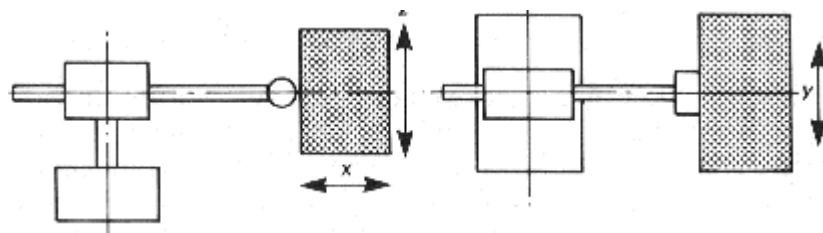
Pohybový priestor – priestor, ktorý obsiahnu pohybujúce sa časti robota okrem koncového efektora

Maximálny priestor – pohybový priestor zväčšený o priestor, ktorý obsiahne koncový efektora a obrobok

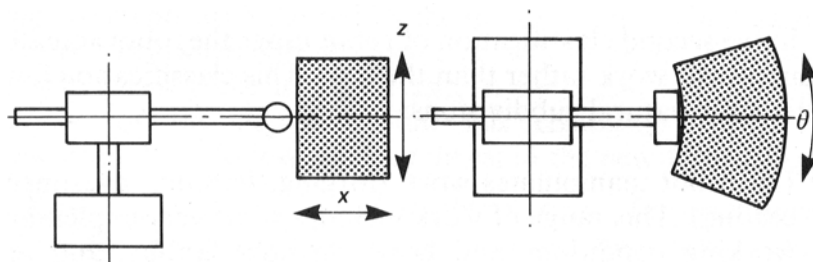
Vymedzený priestor – časť maximálneho priestoru ohraničená limitujúcimi prostriedkami vytvárajúcimi hranice, ktoré sa neprekročia ani v prípade nepredvídanej poruchy robota

Operačný priestor – časť vymedzeného priestoru, ktorý sa skutočne využíva pri vykonávaní naprogramovaných pohybov

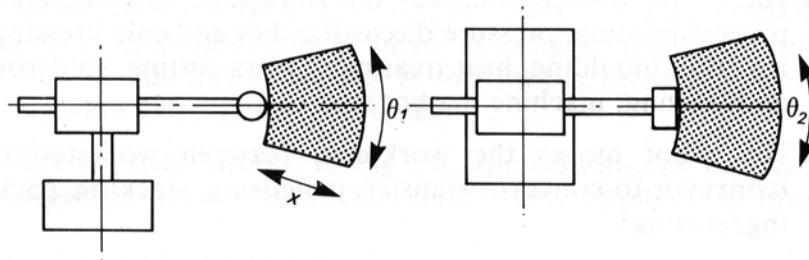
Pracovný priestor - množina polôh vo vzťahu k súradnicovému systému základne, ktoré môže dosiahnuť referenčný bod zápästia



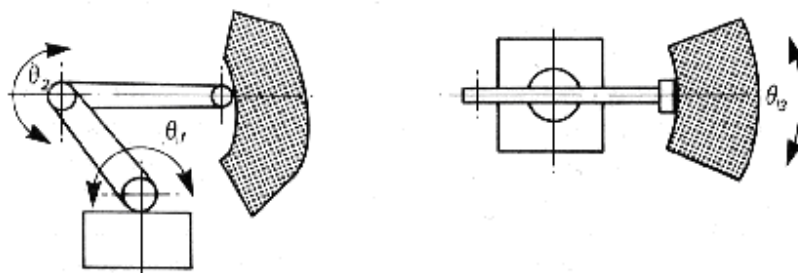
Obr.5.1 Pracovný priestor robota s translačnými kinematickými dvojicami



Obr.5.2 Pracovný priestor robota s dvoma translačnými a jedným rotačným pohybom



Obr.5.3 Pracovný priestor robota s dvoma rotačnými a jedným translačným pohybom



Obr.5.4 Pracovný priestor robota a tromi rotačnými pohybmi

5.2 Manipulatívnosť

Určuje možnosť orientácie chápadla v pracovnom priestore. Charakterizovaná je **uhlom** alebo **koefficientom uhlu servisu**. Pre každý bod z pracovného priestoru je možné určiť uhol ψ , ktorý ohraničuje interval uhlov, pod ktorými sa hlavica môže priblížiť k danému bodu. Môže ísť pri tom o priestorový alebo rovinný uhol.

Koeficient uhla servisu je pomer k

$$k = \frac{\psi}{\psi_{\max}}, \text{ pričom } k \in (0,1). \quad (5.3)$$

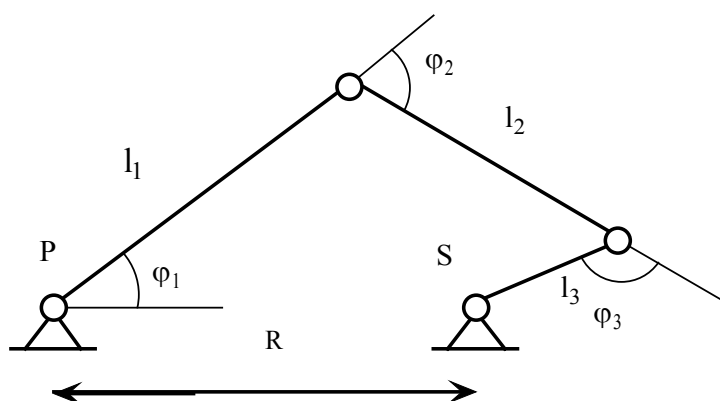
Pre priestorový uhol je koeficient uhla servisu

$$k = \frac{\psi}{4\pi} \quad (5.4)$$

pre rovinný

$$k = \frac{\psi}{2\pi} \quad (5.5)$$

Zavádza sa pojem - ideálny manipulátor, ktorý je charakterizovaný možnosťou zmien kĺbových premenných bez ohraničení na pohyb kinematických dvojíc a možnosťou zanedbať hrúbku členov. Nech ideálny manipulátor má konfiguráciu podľa obr.5.5.



Obr.5.5 Ideálny manipulátor

Body P a S sú kĺby 3.triedy. Predpokladáme, že manipulátor je rovinný - všetky jeho členy ležia v rovine. Táto rovina sa môže otáčať okolo spojnice bodov P a S. Vzdialenosť týchto bodov sa môže pri činnosti manipulátora meniť. Pre rozmery členov manipulátora sa

predpokladá $l_1 \geq l_2 > l_3$. Existujú tri oblasti vzhľadom na možnú vzájomnú polohu členov manipulátora:

1. $l_1 + l_2 - l_3 \geq R \geq l_1 - l_2 + l_3$
 2. $l_1 + l_2 + l_3 \geq R \geq l_1 + l_2 - l_3$
 3. $l_1 - l_2 + l_3 \geq R \geq l_1 - l_2 - l_3$
- (5.6)

Je zrejmé, že pri konfigurácii $R = l_1 + l_2 + l_3$ ako aj $R = l_1 - l_2 - l_3$ manipulátor dosahuje hraničné hodnoty a nie je možná žiadna zmena vzájomného uhlu ramien. Vtedy určité uhol servisu bude rovný nule. Naopak v prípade $R = l_1 + l_2 - l_3$ alebo $R = l_1 - l_2 + l_3$ manipulátor môže vykonať pohyb s plným rozsahom uhlov, vtedy bude uhol servisu maximálny, a koeficient servisu rovný jednej. V intervaloch 2. a 3. bude sa postupne meniť od hodnoty 1 do 0.

Možno určiť ideálne rozmery ramien, aby interval s maximálnym uhlom servisu bol čo najväčší. Pre ideálny manipulátor možno dosiahnuť jednotkový koeficient uhlu servisu v najširšom intervale zmien R ak $l_1 = l_2$ a $l_3 \rightarrow 0$. Tomu zodpovedajú aj obvyklé konštrukcie manipulátorov, keď majú dve ramená približne rovnakých rozmerov a „zápästie“ je veľmi malej dĺžky.

5.3 Presnosť

Manipulačný systém má v závislosti na použitej koncepcii rôznu citlivosť na zmeny a nepresnosti. Chyby v systéme sú:

- | | |
|-----------|---|
| Statické | <ul style="list-style-type: none"> - nepresnosť výroby, rozmery členov, vôle - nepresnosť regulačných obvodov (zaťaženie, riadenie..) - nepresnosť snímačov - kvantovanie - riadiacich členov <ul style="list-style-type: none"> - snímačov - motorov - nepresnosti výpočtu <ul style="list-style-type: none"> - nepresný model - nesprávny algoritmus výpočtu |
| dynamické | <ul style="list-style-type: none"> - kvalita servosystémov - pružnosť kinematickej schémy - nepresnosť modelu - štruktúra <ul style="list-style-type: none"> - koeficienty |

Odchýlky od želaného pohybu spôsobujú:

1. Technologické nepresnosti zhotovenia členov
 - iné rozmery členov než sú použité pri výpočtoch
 - rozmery možno určiť meraním členov, čo však je možné len pre unikátne systémy. Vo všeobecnosti treba počítať s konštrukčnými rozmermi. Sumárna chyba sa počíta lineárnou teóriou presnosti. Efekt pôsobenia každej prvotnej chyby možno určiť nezávisle od pôsobenia iných prvotných chýb a výsledná chyba je superpozíciou prvotných chýb.
2. Pohyb sa uskutočňuje pri pohybe viacerých členov manipulačného systému, každý so svojim programom pre servosystémy. Delenie pohybov medzi členy manipulačného systému je dané programom. Realizácia programu je však vždy s určitou presnosťou.

Chyby vo všetkých etapách prevodov – výpočtových hodnôt zobecnených súradníc na realizované hodnoty sú chybami riadenia.

Chyby technologické a chyby riadenia tvoria podstatnú zložku chýb manipulátorov. Ako technologické tak aj chyby riadenia sú náhodné a určujú sa nezávisle pre každý člen.

3. Podstatným faktorom odchýlok od vypočítaných trajektórií sú pružné vlastnosti manipulátora. Vplyv tohto faktora sa skúma v statickom a dynamickom režime. V prvom prípade je chyba funkciou zaťaženia. Veľkosť chýb závisí od parametrov manipulátora - pružnosti členov a pohonov a od ich konfigurácie.

Ak sa vychádza z predpokladu, že statické chyby deformácie sú malé možno použiť princíp superpozície – nezávisle vypočítať veľkosť deformácie jednotlivých elementov manipulátora od každej sily a potom ich spočítať.

4. Podstatný vplyv na presnosť majú vôle v kinematických dvojiciach. Celková vôľa je

$$v_c = v_z + v_o = uv_z$$

kde v_z je vôľa, ktorá existuje už v novom manipulátore, v_o je vôľa, ktorá vznikne opotrebovaním, u je koeficient, ktorého veľkosť je úmerná režimu a dobe prevádzky mechanizmu.

Zvláštnosť presnosti ako charakteristiky:

- presnosť sa hodnotí ako ohodnotenie so štatistickým charakterom
- pre určenie presnosti sa predpokladá vykonanie viacerých elementárnych operácií:
 - polohovanie
 - orientácia
 - pohyb so zadanou rýchlosťou alebo zrýchlením.

Na dynamické chyby vplýva:

- pružnosť a vôle
- nepresnosť identifikovaných matematických modelov systémov
- ohraničenosť výkonov.

Ak aj možno pokladať systém za absolútne tuhý a bez vôle, existujú ešte ďalšie faktory:

- sily potrebné na zabezpečenie programového pohybu nemôžu byť realizované absolútne presne existujúcimi technickými prostriedkami. Reálne vlastnosti výkonných častí systému sú ohraničené.
- štruktúra dynamických rovníc vždy len približne opisuje skutočné charakteristiky reálneho mechanického systému, jej pružné a tlmiace vlastnosti
- koeficienty nemôžu byť určené absolútne presne.

Technologické a riadiace chyby je potrebné sledovať pre skupinu robotov. Pre konkrétny robot sú technologické chyby konštantné a teda predstavujú systematickú chybu polohovania. Ostatné chyby riadenia predstavujú náhodné chyby. Strednú chybu určíme vykonaním viacerých meraní – predstavuje systematickú chybu v danej konfigurácii ϕ . Často sa používa „**zóna rozptylu**“. Polomer zóny rozptylu r predstavuje náhodnú zložku tejto chyby.

Rozmer zóny rozptylu sa používa ako charakteristika – **opakovateľnosť**. Pre zónu rozptylu platí:

- forma zóny rozptylu nemusí byť kruh
- rozmery zóny môžu byť rôzne pre rôzne konfigurácie
- nemožno vylúčiť možnosť závislosti chyby riadenia a teda opakovateľnosti od režimu pohybu, ktorý sa použije na vykonanie operácie polohovania.

Predpokladajme, že sa experimentálne určí vektor $\Delta \mathbf{r}$ systematická zložka pre rôzne konfigurácie φ . Potom možno spätne určiť prvotné chyby – riešiť spätnú úlohu presnosti.

V kinematickej schéme pracujúcej v pravouhlom súradnicovom systéme je celková chyba daná chybami v jednotlivých súradniciach

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

$$\Delta z = z_2 - z_1$$

Celková chyba potom je

$$\Delta c = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (5.7)$$

Zo vzťahu vyplýva, že pre danú kinematickú schému chyba nezávisí na pracovnom bode a v celom pracovnom priestore je konštantná.

V kinematickej schéme pracujúcej v cylindrickom súradnicovom systéme platí pre presné nastavenie želaney polohy

$$x_1 = R \cos \varphi$$

$$y_1 = R \sin \varphi \quad (5.8)$$

$$z_1 = z$$

Pri chybách sa dosiahne poloha:

$$x_2 = (R + \Delta R) \cos(\varphi + \Delta \varphi)$$

$$y_2 = (R + \Delta R) \sin(\varphi + \Delta \varphi) \quad (5.9)$$

$$z_2 = z + \Delta z$$

Výsledná chyba polohovania je

$$\Delta c = \sqrt{2R^2(1 - \cos \Delta \varphi)(1 + \frac{\Delta R}{R}) + \Delta R^2 + \Delta z^2} \quad (5.10)$$

Celková chyba je závislá na polohe pracovného bodu.

V kinematickej schéme pracujúcej vo sférickom súradnicovom systéme je presne určený pracovný bod:

$$x_1 = R \cos \varphi_1 \cos \varphi_2$$

$$y_1 = R \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \quad (5.11)$$

$$z_1 = R \sin \varphi_1$$

Pri chybách sa dosiahne poloha:

$$x_2 = (R + \Delta R) \cos(\varphi_1 + \Delta \varphi_1) \cos(\varphi_2 + \Delta \varphi_2)$$

$$y_2 = (R + \Delta R) \cos(\varphi_1 + \Delta \varphi_1) \sin(\varphi_2 + \Delta \varphi_2) \quad (5.12)$$

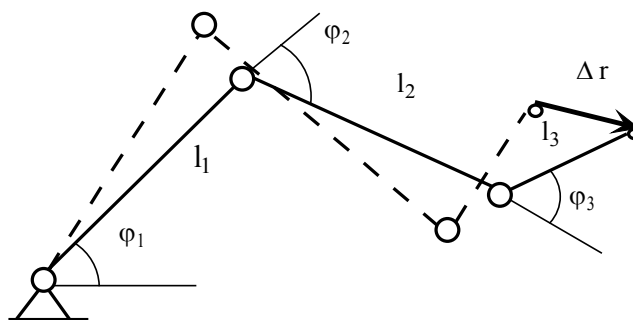
$$z_2 = (R + \Delta R) \sin(\varphi_1 + \Delta \varphi_1)$$

Celková chyba je

$$\Delta c = \sqrt{R^2(\Delta \varphi_1^2 + \Delta \varphi_2^2 \cos^2 \varphi_1) + \Delta R^2} \quad (5.13)$$

Celková chyba je závislá na polohe pracovného bodu.

5.3.1 Presnosť polohovania rovinného mechanizmu



Obr. 5.6 Presnosť rovinného mechanizmu

Súradnice bodu M sú určené

$$x = \sum a_j \cos(\varphi_1 + \dots + \varphi_j) \quad (5.14)$$

$$y = \sum a_j \sin(\varphi_1 + \dots + \varphi_j) \quad (5.15)$$

Je potrebné určiť chybu polohovania ako dôsledok technologickej chyby. Technologické chyby môžu byť Δa_j a v riadení $\Delta \varphi_j$. Obe možno pokladať za náhodné veličiny pri projektovaní. Ich charakteristiky sú určené technológiou výroby, vlastnosťami riadiaceho systému a metodickými chybami programovania.

V dôsledku chýb bude

$$x' = \sum (a_j + \Delta a_j) \cos(\varphi_1 + \Delta \varphi_1 + \dots + \varphi_j + \Delta \varphi_j) \quad (5.16)$$

$$y' = \sum (a_j + \Delta a_j) \sin(\varphi_1 + \Delta \varphi_1 + \dots + \varphi_j + \Delta \varphi_j) \quad (5.17)$$

pre chyby je

$$\Delta x = \sum \Delta a_j \cos(\varphi_1 + \dots + \varphi_j) - \sum a_j (\Delta \varphi_1 + \dots + \Delta \varphi_j) \sin(\varphi_1 + \dots + \varphi_j) \quad (5.18)$$

$$\Delta y = \sum \Delta a_j \sin(\varphi_1 + \dots + \varphi_j) + \sum a_j (\Delta \varphi_1 + \dots + \Delta \varphi_j) \cos(\varphi_1 + \dots + \varphi_j). \quad (5.19)$$

5.3.2 Chyby v dôsledku pružnosti systému

Chyby dosiahnutia polohy vznikajú nie len v dôsledku vôle, ale aj v dôsledku pružnosti členov kinematickej schémy. Pružnosť sa môže prejaviť: v dôsledku priehybu členov pri pôsobení síl a v dôsledku pružnosti prevodov a pohonov (vlnové prevodovky, lanové prevody, zmena polohy hriadeľov motorov v dôsledku zaťaženia...).

Definovaná je tuhosť k_p v posunutí ako pomer medzi zaťažujúcou silou a statickou deformáciou

$$k_p = \frac{F}{y} \quad (5.20)$$

a podobne tuhosť v natočení k_n

$$k_n = \frac{M}{\varphi} \quad (5.21)$$

Čím vyššia je tuhosť, tým je mechanizmus presnejší.

5.4 Mobilnosť

Pri zadanej trajektórii (z analýzy presnosti) možno nájsť optimálnu konfiguráciu manipulačného systému z hľadiska presnosti. Súbor týchto konfigurácií určuje optimálny zákon riadenia z hľadiska presnosti. Pri tom zostane ešte jeden voľný parameter - rýchlosť. Ak sa určí zákon riadenia, vychádzajúc zo súboru $\varphi(t)$ konfigurácií optimálnych z hľadiska presnosti, môže sa ukázať, že potrebné hodnoty $\varphi'(t)$ ležia za hranicami možností výkonného systému. Pohybová nadbytočnosť manipulačného systému pri tvorbe pohybu môže byť použitá na plné využitie rýchlostných rezerv ale na úkor presnosti. Mobilnosť sa charakterizuje prípustnými rýchlosťami premiestnenia chápadla, v bode M určenom vektorom $\mathbf{r}$ zabezpečiť vektor rýchlosti $\mathbf{v}$.

5.5 Zrýchľiteľnosť

Obvykle priemyselné roboty pracujú v periodickom režime. Na určenie zrýchľiteľnosti treba poznať dynamický model robota. Úlohou je zabezpečiť bodu M v bode X pracovného priestoru zrýchlenie $\mathbf{a}$ pri známych φ a φ' . Zrýchľiteľnosť závisí od: geometrie manipulačného systému, vlastností pohonov a momentov zotrvačnosti.

Pri realizácii želanej trajektórii $\mathbf{r}(t)$ je potrebné zabezpečiť $\mathbf{r}'(t)$ a $\mathbf{r}''(t)$. Pritom

- analýza dosiahnuteľnosti určuje či $\mathbf{r}$ je realizovateľné
- analýza mobility určuje či $\mathbf{r}'$ je realizovateľné
- analýza zrýchľiteľnosti určuje či sa $\mathbf{r}''$ dá dosiahnuť na začiatku pohybu.

5.6 Poddajnosť

Charakterizuje sa veľkosťou deformácie kinematického reťazca, ktorá vzniká v statickom alebo kvázistatickom režime v dôsledku pôsobenia vonkajších síl. Vzniká v servosystémoch a v členoch kinematickej schémy. Pružné deformácie tvoria podstatnú časť chýb pri polohovaní. Poddajnosť je charakterizovaná mechanickou impedanciou.

Poddajnosť nie je vždy len neželanou vlastnosťou. Pri tzv. pasívnej adaptácii sa systém navrhuje s definovanou poddajnosťou.

Nosnosť

Nosnosť je funkciou hmotnosti, momentu zotrvačnosti, statických a dynamických síl pôsobiacich na robot, vyjadrená ako sily a krútiace momenty, ktoré môžu pôsobiť v rôznych osiach pohybu za určitých špecifických podmienok (konfigurácia kinematickej schémy, rýchlosti a zrýchlenia). Okrem toho, že nosnosť charakterizuje podstatnú vlastnosť z hľadiska možného zaťaženia systému je pre bezpečnosť práce s robotickým systémom dôležité udržanie predmetu v každom režime činnosti.

5.7 Mnemotechničnosť

Kvalita biotechnických systémov závisí od radu faktorov: kvalifikácie, trénovanosti a podmienok práce operátora, zložitosti úlohy, technických parametrov stroja určujúcich riaditeľnosť stroja. Kvantitatívne ohodnotenie mnemotechničnosti sa určuje pre kopírujúce manipulátory. Charakterizuje kvalitu mechanizmu prenosu pohybu rúk operátora na pohyb manipulátora. Základné ohodnotenie mnemotechničnosti je charakterizované tým, nakoľko sa líši premiestnenie chápadla v niektorom bode pracovného priestoru od vektora premiestnenia riadiaceho člena. Kritériom je hodnota vzťahu presnosti a času

$$J = D T \quad (5.22)$$

D - presnosť , T - čas vykonania operácie.

Zlepšenie jedného ukazovateľa vedie k zhoršeniu druhého.

5.8 Ekonomičnosť

Ekonomičnosť charakterizuje možnosť vytvorenú riadiacim systémom, dosiahnuť želanú polohu s minimálnym objemom telesa vytvoreného pohybom všetkých častí mechanizmu pri vykonaní želaného premiestnenia. Je zrejmé, že kritérium má priamy vzťah k spotrebe energie.

5.9 Dynamika

Charakterizuje možnosť vytvorenú riadiacim systémom, dosiahnuť maximálnu rýchlosť premiestnenia koncového bodu robota. Predpokladá sa pri tom pohyb viacerých osí. Ak je táto charakteristika prioritou, potom je v protiklade s požiadavkou ekonomičnosti.

6. NÁVRH ŠTRUKTÚR A PARAMETROV SERVOSYSTÉMOV ROBOTOV

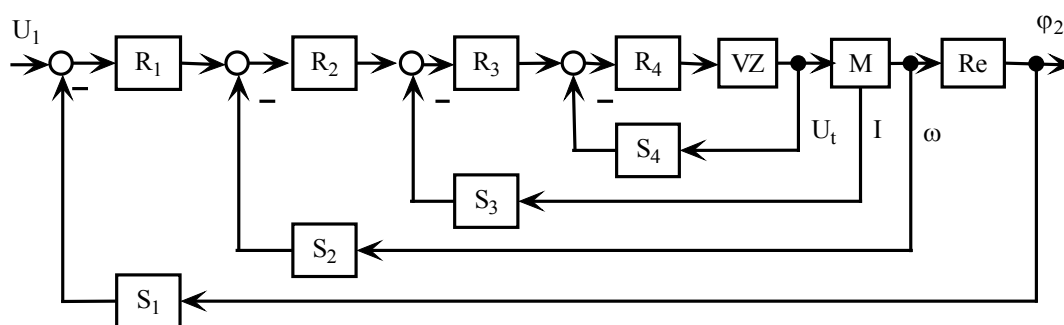
Servosystémy robota musia zabezpečiť požadovanú presnosť a dynamiku. Vyžaduje sa, aby zabezpečovali požadovanú kvalitu pohybu po želanej trajektórii. Na ich vlastnosti sú teda kladené často extrémne požiadavky. Požaduje sa, aby želané vlastnosti mali servosystémy aj pri pôsobení poruchových signálov a zmene parametrov. V manipulačných systémoch je významná zmena záťažného momentu a momentu zotrvačnosti systému.

6.1 Konceptie štruktúr servosystémov

Štruktúrne schémy regulačných obvodov servosystémov sa volia tak, aby splnili požiadavky na riadenie výkonového člena (ochrana proti preťaženiu), požiadavky na riadenie procesov (presnosť, dynamika a pod.) a požiadavky realizovateľnosti.

Okrem uzatvorených regulačných obvodov so zápornou spätnou väzbou sa používajú aj štruktúrne schémy s kladnými kompenzačnými väzbami ako od vstupných tak aj od výstupných signálov. Vytvárajú sa tak kombinované štruktúry, ktoré obsahujú uzavreté slučky a pre niektoré signály sú otvorené.

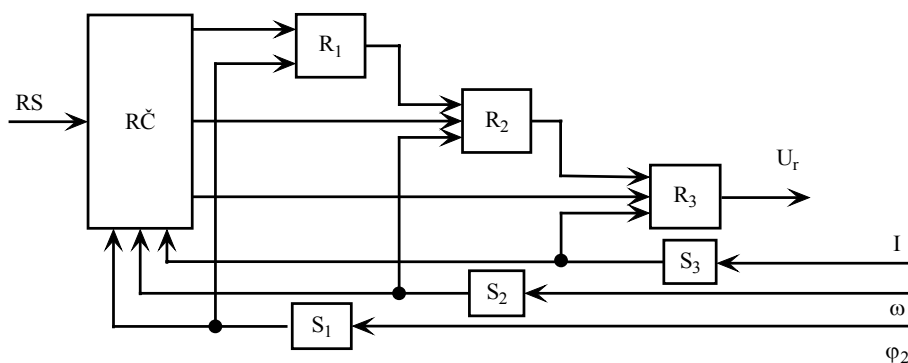
V servosystémoch sa obvykle používa kaskádne radenie regulátorov – obr.6.1



Obr.6.1 Kaskádne radenie regulátorov

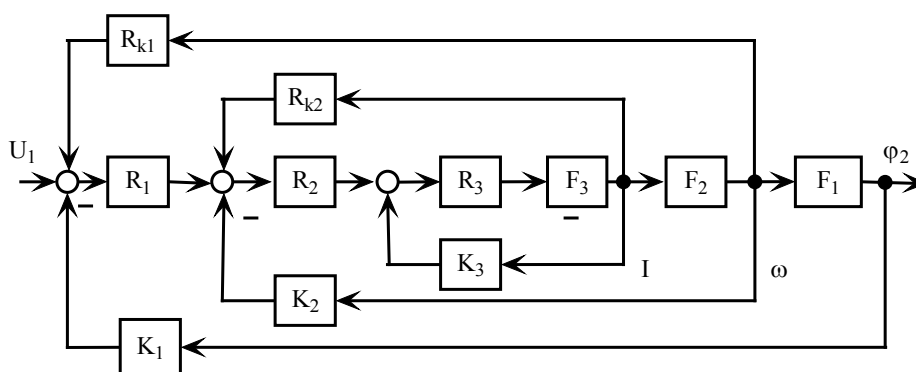
Na obr.6.1 je R_i – regulátor polohy, rýchlosti, prúdu, napätia a podobne S_i sú príslušné snímače veličín, Re – reduktor, VZ – výkonový zosilňovač, M – motor.

V servosystémoch robotov sa vyžaduje vysoká kvalita riadenia prechodných procesov. Pri riadení súčinnosti viacerých servosystémov pri realizácii priestorovej trajektórie sa vyžaduje, aby všetky servosystémy pracovali v lineárnej časti charakteristík, aby nedochádzalo k skresleniu želaného priebehu stavových veličín. Používa sa štruktúrna schéma uvedená na Obr. 6.2.



Obr.6.2 Štruktúrna schéma servosystému s riadiacim členom s hierarchickým usporiadaním regulátorov

Nezávislú reguláciu veličín možno dosiahnuť aj v systéme s kaskádnym radením regulátorov. V tomto prípade sa používa kompenzácia vplyvu spätnej väzby vnútorného regulačného obvodu na prácu vonkajšieho regulačného obvodu pomocou kladnej spätnej väzby – obr.6.3.



Obr.6.3 Štruktúrna schéma servosystému s kaskádnym radením regulátorov s nezávislou reguláciou stavových veličín

Ak pre prenosy korekčných členov platí

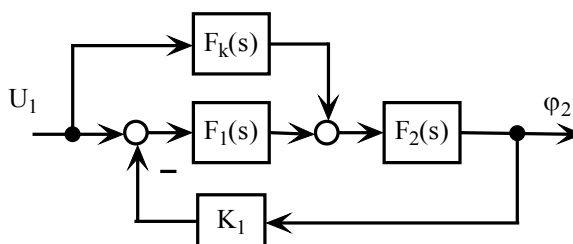
$$R_{k1}(s) = \frac{K_2}{R_1(s)} \quad (6.1)$$

a

$$R_{k2}(s) = \frac{K_3}{R_2(s)} \quad (6.2)$$

V lineárnej časti charakteristík neovplyvňujú vnútorné regulačné obvody odozvy systému. Ak sa nasýti regulátor polohy, potom reguluje regulačný obvod rýchlosti.

V servosystémoch sa využívajú aj štruktúry kombinovaného riadenia. Princiálna schéma takého obvodu je na obr.6.4.



Obr.6.4 Bloková schéma s kombinovanou štruktúrou riadenia

Ak bude

$$F_k(s) = \frac{1}{K_1 F_2(s)} \quad (6.3)$$

potom výstupný signál bude presne sledovať vstupný. Okrem toho člen $F_k(s)$ sa nevyskytuje v charakteristickej rovnici a preto nevlýva na kvalitu prechodných procesov v uzatvorenej slučke. Nevýhodou je, že pri realizácii korekčného člena sa vyžaduje realizovať prevrátenu hodnotu prenosu $F_2(s)$, čo pri reálnych sústavách znamená nutnosť realizovať derivačné členy. Aj pri približnej realizácii odvodeného prenosu možno dosiahnuť zlepšenie sledovania signálu, je potrebné však uvažovať výkonové obmedzenie systému a zabezpečiť vhodné filtrovanie vysokofrekvenčných šumov.

6.2 Statické zaťaženie manipulátora

Pre pohony manipulátorov existujú dve základné koncepcie – motory umiestnené v kĺboch a motory umiestnené na základni. Prvá koncepcia sa vyznačuje jednoduchšou konštrukciou, vyššou tuhosťou pohonov, minimálnou vôľou a tým, že sa nevyskytuje vzájomné ovplyvňovanie pohybov. Druhá koncepcia má nižšie energetické požiadavky, minimálnu hmotnosť a rozmery ramien.

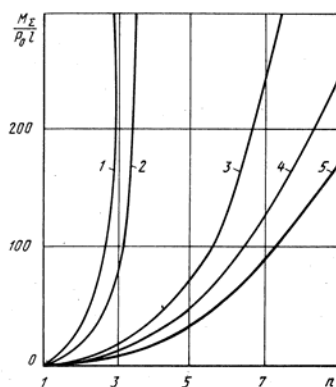
Predpokladajme najnepriaznivejšie zaťaženie manipulátora, keď všetky členy sú vo vodorovnej polohe. Pre jednoduchosť predpokladajme, že všetky členy majú rovnakú hmotnosť m_0 a dĺžku l , pričom sa predpokladá, že účinok hmoty je sústredený na konci ramena. Pre každý motor platí $m_M = kM_M$. Na konci robota teda pôsobí hmota m_0 . V prvom kĺbe od konca robota pôsobí hmota

$$m_n = m_0 + klm_0. \quad (6.4)$$

V ďalších

$$m_{n-1} = k(km_0l^2 + 3m_0l) + m_0 \quad (6.5)$$

$$m_{n-2} = k(k^2m_0l^3 + 5km_0l^2 + 6m_0l) + m_0 \quad (6.6)$$



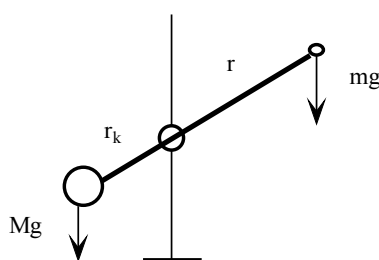
Obr.6.5 Závislosť celkového momentu motorov robota od počtu osí pohybu
Závislosti 1-4 sú pre roboty s motormi umiestnenými v kĺboch, pričom 1 je pre krokové motory, 2- jednosmerné motory, 3 – pneumatické motory, 4 – hydraulické motory. Krivka 5 je pre prípad, keď motory sú umiestnených na základni.

6.3 Vyvažovanie síl tiaže

Na vykonanie určitej činnosti je potrebná statická a dynamická sila alebo moment. Statické sily sú zvyšované silami tiaže. Tieto sily zvyšujú zaťaženie systému a znižujú regulačný rozsah. Sily tiaže môžu spôsobiť aj úraz, ak po vypadnutí energie systém sa ďalej pohybuje pôsobením tiaže. Problém samovoľného pohybu možno odstrániť použitím brzd, použitím samosvorných prevodoviek alebo použitím motorov s definovanou polohou aj bez napájania.

Ak sa urobia opatrenia, aby sily tiaže neovplyvňovali pohyby systému, potom to umožňuje použiť vo výkonnom systéme robota motory menšieho výkonu, znižuje sa energetická náročnosť celého systému a dosiahne sa nezávislosť potrebných momentov od smeru pohybu. Úplné odstránenie pôsobenia síl tiaže pri mechanizmoch však obvykle nie je možné. Sily závisia od konfigurácie a od pripojeného bremena.

Na zníženie vplyvu síl tiaže sa používajú pasívne a aktívne systémy. Pri pasívnych sa používa vyváženie systému – obr.6.6.



Obr.6.6 Pasívna kompenzácia síl tiaže

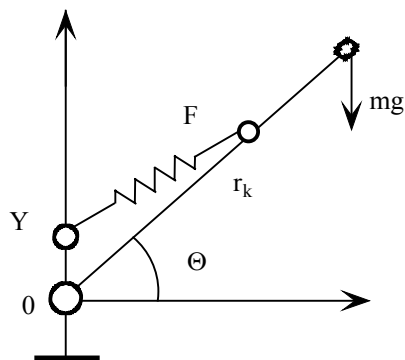
Musí platiť

$$Mg r_k = mgr \quad (6.7)$$

Pre moment zotrvačnosti

$$J = mr^2 \left(1 + \frac{r_k}{r}\right) \quad (6.8)$$

Okrem vyváženia hmotou možno dosiahnuť vyváženie pneumatickým pohonom, elektrickým pohonom, silami od pružnej deformácie.



Obr.6.7 Kompenzácia síl tiaže pružinou

Je potrebné určiť parametre pružiny (koeficient k a počiatočnú dĺžku d , polohu upevnení) pri ktorom moment sily pružiny na rameno zodpovedá momentu tiaže. Moment pružiny je

$$M = kr_k(Y \cos \theta - X \sin \theta) \left(1 - \frac{d}{\sqrt{r_k^2 + X^2 + Y^2} - 2r_k(X \cos \theta + Y \sin \theta)} \right) \quad (6.9)$$

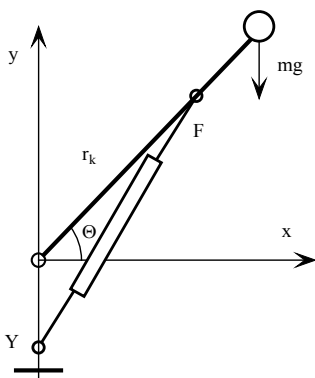
tento moment sa musí rovnať momentu od tiaže

$$M_m = -mgr \cos \theta \quad (6.10)$$

Je zrejmé, že rovnosť môže nastať len približne. Aby vyváženie bolo rovnaké pre strednú hodnotu polohy $\theta = \pi/2$ je $X=0$. Vyváženie bude tým presnejšie, čím $Y \ll r_k$. Potom podmienka rovnováhy bude

$$k(r_k - d)Y = mgr. \quad (6.11)$$

Vyvažovanie je možné aktívne - pomocou silového valca. Sila má konštantnú hodnotu nezávislú od riadenia daného kľbu, jej smer sa môže meniť. Obvykle sa používajú pneumatické valce.



Obr.6.8 Aktívne vyvažovanie síl tiaže

Pre prípad na obr.6.8 je moment od sily F

$$M = \frac{Fr_k(X \sin \theta - Y \cos \theta)}{\sqrt{(X - r_k \cos \theta)^2 + (Y - r_k \sin \theta)^2}}. \quad (6.12)$$

Rovnováha vo vertikálnej polohe je možná pri podmienke $X=0$.

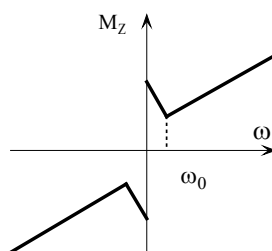
Systémy vyvažovania sa obvykle spájajú aj s riešením úlohy zvýšenia tlmenia systému. Obvykle sa tlmenie systému zvyšuje prídavnými tlmičmi pripojenými k vyvažovaciemu systému. Túto úlohu budeme riešiť v inej časti pomocou aktívnych tlmiacich systémov.

6.4 Vplyv záťažného momentu

Pre jednosmerný motor pri pôsobení trenia platí:

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{1}{C_u(1 + T_m s + T_m T_e s^2) + \frac{B(\omega)R}{C_u^2}(1 + T_e s)} \quad (6.13)$$

Ak sa uvažuje charakteristika trenia podľa obr.6.9



Obr.6.9 Charakteristika trenia

platí

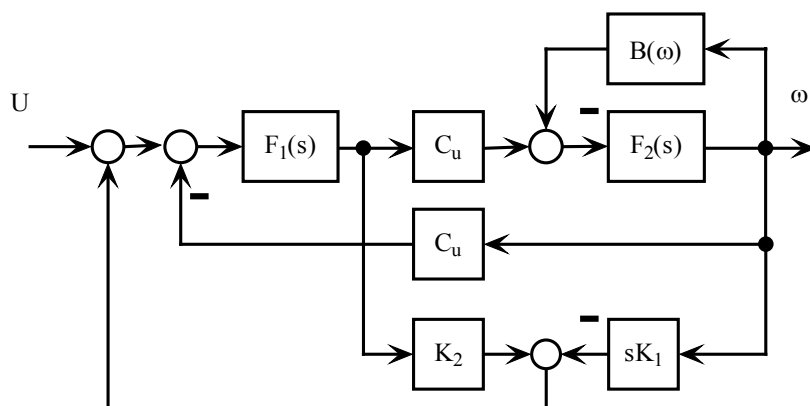
$$B(\omega) = -B_1 \quad \text{pri} \quad |\omega| < \omega_0 \quad (6.14)$$

$$B(\omega) = B_2 \quad \text{pri} \quad |\omega| > \omega_0. \quad (6.15)$$

Potom pre stabilitu motora platia podmienky:

$$\frac{J}{T_e} > B_1 \quad \text{a} \quad \frac{C_u^2}{R} > B_1 \quad (6.16)$$

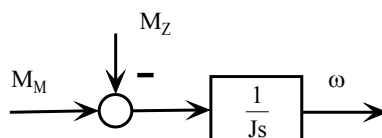
Tieto podmienky sú jednak viazané na parametre motora, jednak sú protichodné. Stabilitu motora aj v klesajúcej časti trenia možno zabezpečiť nasledovnou schémou – obr.6.10.



Obr.6.10 Bloková schéma stabilizácie motora

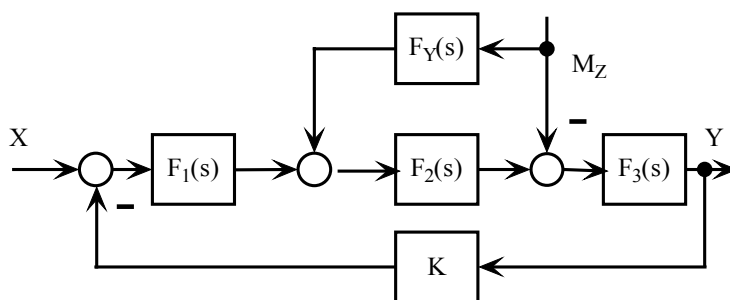
kde $F_1(s) = \frac{1}{R + sL}$, $F_2(s) = \frac{1}{Js}$. Ak $K_2 = R$ absolútny člen charakteristickej rovnice nezávisí od trenia a ak $K_1 > \frac{RT_e B_1}{C_u}$ nedochádza k zmene znamienka koeficientov charakteristickej rovnice.

Záťažný moment je poruchovým signálom, ktorý ovplyvňuje chod servosystémov robota a spôsobuje nepresnosť v ustálenom i v prechodných stavoch. Keď vezmeme do úvahy schému na obr.6.11



Obr.6.11 Bloková schéma pre analýzu vplyvu M_Z

je potrebné pre odstránenie vplyvu M_Z dosiahnuť, aby trvalo platilo $M_M - M_Z = 0$. Jednou z možností splnenia požiadavky je, použitie schémy na obr.6.12



Obr.6.12 Bloková schéma s meraním poruchy

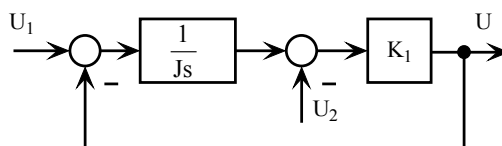
Ľahko možno odvodiť, že pri splnení podmienky

$$F_Y(s) = \frac{1}{F_2(s)} \quad (6.17)$$

bude trvalo zabezpečené splnenie požiadavky, že obvod nebude reagovať na zmeny M_Z . Existujú však dve ohraničenia, ktoré realizáciu uvedenej blokovej schémy komplikujú. Prvou požiadavkou, ktorú nie je možné splniť je presná realizácia prenosu $F_Y(s)$. Pri jeho realizácii sa vyžaduje realizovať derivačné členy. Druhým obmedzením je skutočnosť, že je potrebné merať poruchový signál. Existujú snímače momentu, ktoré sú však obvykle príliš veľkých rozmerov a hmotnosti, aby ich bolo možné aplikovať v servosystémoch robotov. Záťažný moment možno určiť zo vzťahu

$$M_Z = M_M - Js\omega. \quad (6.18)$$

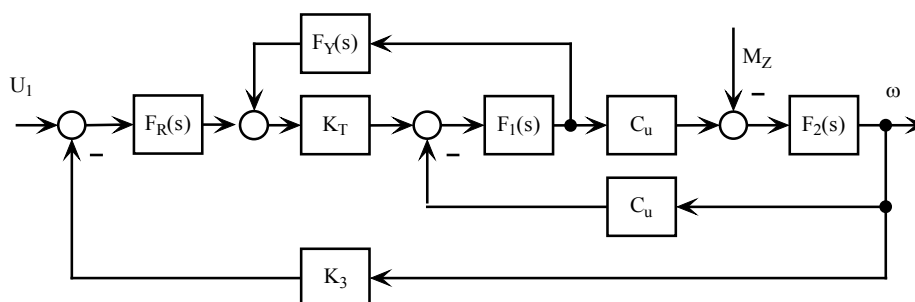
Iným vhodnejším spôsobom určenia je použitie schémy podľa obr.6.13

Obr.6.13 Obvod na určenie M_Z

Na obr.6.13 je $U_1 = K_0 M_M$, $U_2 = K_0 \omega$. Potom

$$U = \frac{K_0}{\frac{1}{Js} + 1} M_Z \quad (6.19)$$

Ďalšou možnosťou je použitie obvodu podľa obr.6.14

Obr. 6.14 Bloková schéma obvodu na potlačenie vplyvu M_Z

Kde $F_R(s)$ je prenos regulátora rýchlosti, K_T – zosilnenie výkonového zosilňovača, $F_1(s)$, $F_2(s)$, C_u – bloky prenosu motora, $F_Y(s)$ – prenos korekčného člena. Ak platí

$$F_Y(s) = \frac{R + sL}{K_T} \quad (6.20)$$

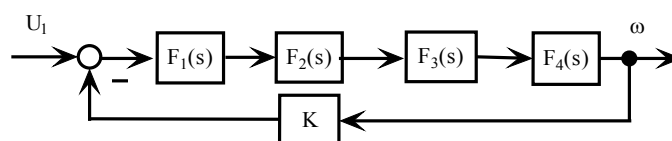
potom uhlová rýchlosť nebude závislá na zmenách M_Z . Z prenosu obvodu vyplýva, že vlastnosti obvodu nebudú závislé ani na momente zotrvačnosti J . Pri realizácii obvodu sú problémy spojené s meraním signálu, z ktorého sa zavádza korekčný signál a s realizáciou samotného korekčného člena. Meraný signál môže byť silne zvlhnený a z toho signálu je potrebné realizovať deriváciu (obálky).

Približné dosiahnutie necitlivosti obvodu na zmeny záťažného momentu možno realizovať kaskádnym radením regulátorov ako aj použitím tzv. štruktúrnych schém s dvoma stupňami voľnosti (ktoré umožňujú nastaviť želanú kvalitu prechodných procesov osobitne pre riadiaci signál a osobitne pre pôsobenie poruchového signálu).

6.5 Vplyv zmien momentu zotrvačnosti

Podľa obr.6.11 ak sa mení moment zotrvačnosti mení sa zosilnenie časti obvodu. Je zrejmé, že tieto zmeny zosilnenia spôsobia zmeny kvality prechodných procesov. Snahou pri riadení robotov je, aby sa udržali garantované dynamické vlastnosti systému. Pre určitú oblasť zmien možno zabezpečiť predpísanú kvalitu s určitou chybou jednoduchými prostriedkami. Pre širší rozsah zmien je potrebné uvažovať s aplikáciou vyšších foriem riadenia.

Pre rýchlostný servosystém je zjednodušená bloková schéma na obr.6.15



Obr.6.15 Rýchlostný servosystém

$$\text{kde } F_1(s) = \frac{1 + sT_2}{sT_3}; F_2(s) = \frac{1}{1 + sT_1}; F_3(s) = C_u; F_4(s) = \frac{1}{Js}.$$

Prenos otvoreného obvodu je

$$F_0(s) = \frac{(1 + sT_2)C_u K}{sT_3(1 + sT_1)Js} \quad (6.21)$$

Z uvedeného je zrejmé, že je možné:

- kompenzovať zmeny J zmenou časovej konštanty T_3
- vybrať T_2 tak, aby bola dynamika v celom rozsahu zmien momentu zotrvačnosti vyhovujúca.

Okrem uvedených prístupov možno zvoliť štruktúru z obr.6.14. Pri obr.6.14 sú uvedené výhodné vlastnosti štruktúry z hľadiska potlačenia zmien momentu zotrvačnosti.

6.6 Pružné členy vo výkonovom reťazci

Systém má byť pre určité úlohy projektovaný tak, aby bol poddajný. Umožňuje to realizovať úlohy napr. montáže aj pri nižších nákladoch na konštrukciu systému a jeho riadenie. Možno teda predpokladať, že niekedy je do kinematického reťazca úmyselne zavedená pružnosť. Hraničným prípadom je existencia tzv. rezonančných robotov, ktoré sú naladené na určitú frekvenciu, ktorá je ich pracovnou frekvenciou.

V každom výkonovom reťazci existuje pružnosť, ktorá spôsobuje problémy z hľadiska statickej a dynamickej presnosti. V statickom stave aj pri nulových regulačných odchýlkach kĺbových premenných existuje trvalá chyba v dosiahnutí želanej polohy koncového bodu. V dynamickom stave môžu vzniknúť v systéme málo tlmené kmity. Táto pružnosť existuje v magnetických obvodoch elektrických motorov, pružne vlastnosti majú i pneumatické motory, existuje pružnosť v prevodoch, skrute hriadeľov a pružnosť ramien.

V dôsledku existencie uvedených pružností môžu v systéme existovať kmity, ktoré sú vyvolané prechodnými dejmi pri riadení, zmenou zaťaženia, vplyvom periodických zmien pri chode motorov nástrojov a pod.

Úlohy pri uvažovaní pružnosti členov systému sú: výber spôsobu potlačenia kmitov (výber konštrukcie systému, štruktúry regulačných obvodov, motorov, prevodového čísla reduktora), určenie výkonu motora na tlmenie kmitov, určenie riadenia, ktoré zníži dynamické zaťaženie členov systému prípadne vylúči vznik kmitov.

Najčastejšie sa analýza systému vykonáva pre pružnosť sústredenú v kinematickej dvojici – uvažuje sa dvojhmotový systém. Pri tvorbe modelu sa vychádza z momentovej rovnováhy

$$M_M - \frac{M_{skr}}{i} - M_{Tl} = J_l s \omega_l \quad (6.22)$$

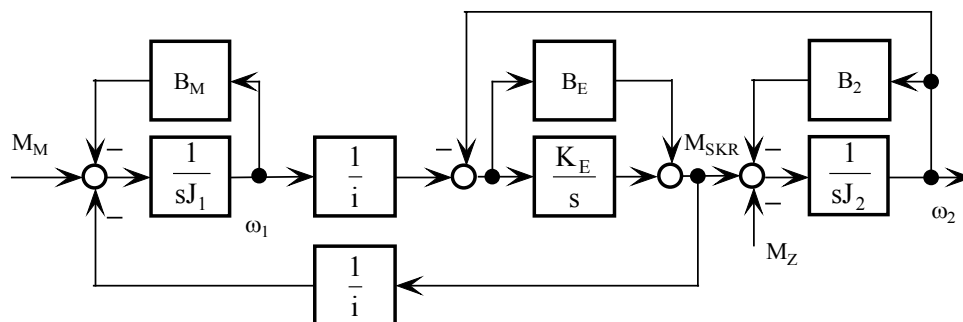
$$M_{T1} = B_M \omega_1$$

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{s} K_E + \left(\frac{\omega_1}{i} - \omega_2\right) B_E = M_{skr} \quad (6.23)$$

$$M_{skr} - M_z - M_{T2} = J_2 s \omega_2 \quad (6.24)$$

$$M_{T2} = B_2 \omega_2$$

Bloková schéma je na obr.6.16.



Obr.6.16 Bloková schéma dvojmotového systému

Vlastná frekvencia systému je pre $B_M=B_E=B_2=0$

$$\omega_{vl} = \frac{1}{i} \sqrt{\frac{K_E}{J_1} \left(1 + \frac{J_1 i^2}{J_2}\right)} \quad (6.25)$$

Ako už bolo uvedené obvykle $J_2 = i^2 J_1$. Ak sa v systéme J_2 mení nech platí

$$J_2 = i^2 J_1 k. \quad (6.26)$$

Potom pre $k \rightarrow 1$ je

$$\omega_{vl} = \frac{1}{i} \sqrt{2 \frac{K_E}{J_1}} \quad (6.27)$$

a pre $k \rightarrow \infty$ je

$$\omega_{vl} = \frac{1}{i} \sqrt{\frac{K_E}{J_1}}. \quad (6.28)$$

Celková zmena frekvencie pri vhodnom návrhu prevodového čísla reduktora nie je podstatná.

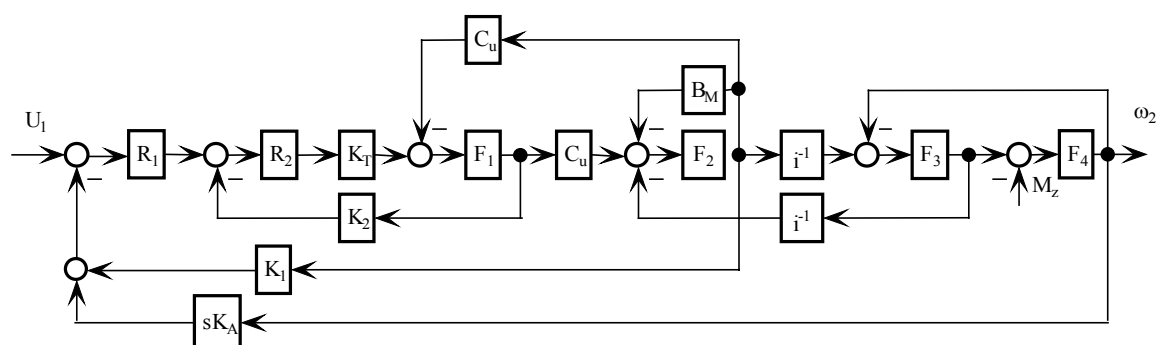
Tmenie systému pri $B_M=B_2=0$ je

$$b = 0,5 \frac{B_E}{K_E} \omega_{vl}. \quad (6.29)$$

Pre obvyklé parametre systémov je b veľmi malá hodnota, ktorá nevyhovuje požiadavkám na kvalitu prechodných procesov.

Tlmenie prechodných procesov možno zvýšiť okrem konštrukčných úprav systému aj zavedením nových spätných väzieb alebo použitím korekčných členov, rozbehových členov, filtrov.

Bloková schéma systému s akceleračnou spätnou väzbou je na obr.6.17.



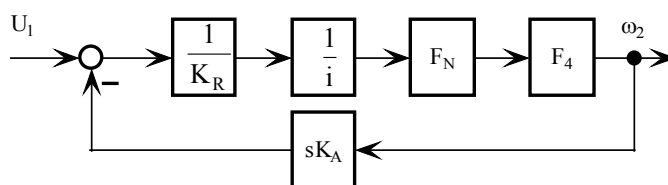
Obr.6.17 Bloková schéma systému s pružnosťou s akceleračnou spätnou väzbou

kde $F_1(s) = \frac{1}{R + sL}$, $F_2(s) = \frac{1}{sJ_1}$, $F_3(s) = B_E + \frac{K_E}{s}$, $F_4(s) = \frac{1}{B_2 + sJ_2}$.

Uzatvorený regulačný obvod prúdu môžeme nahradiť prenosom

$$F_1(s) = \frac{1}{K_C(1 + sT_C)}. \quad (6.30)$$

Ďalšou úpravou možno získať obvod uvedený na obr.6.18.



Obr.6.18 Zjednodušená bloková schéma obvodu s akceleračnou spätnou väzbou

kde $\frac{1}{K_R}$ je náhradný prenos rýchlostného servosystému, $F_N(s) = \frac{K_E(B_2 + sJ_2)}{s(B_2 + sJ_2) + K_E}$,

$$F_4(s) = \frac{1}{B_2 + sJ_2}.$$

Keďže obvykle je $B_2 \ll K_A K_E$ pre zosilnenie K_A platí

$$K_A = 2b i K_R \sqrt{\frac{J_2}{K_E}}.$$

Týmto možno určiť všetky dôležité veličiny v systémoch s pružnosťou vo výkonovom reťazci. Pre overenie analýzy a syntézy je vhodné celý systém namodelovať.

Pri realizácii je potrebné, aby motor mal vysokú dynamiku pre neskreslenú realizáciu výkonových signálov, prípustné preťaženie 5-7x, minimálny moment zotrvačnosti. Preto na realizáciu pohonných systémov sú vhodné len niektoré typy motorov.

7. ROBUSTNÉ SYSTÉMY S PREMENLIVOU ŠTRUKTÚROU

Riadenie polohy a jej derivácií patrí medzi aktuálne úlohy technologickej praxe (napríklad v pohonoch obrábacích strojov, v robotike, v leteckej a raketovej technike, v mechatronike a pod.). S polohovaním súvisia vo všeobecnosti dva problémy. Na jednej strane je to **sledovanie predpísanej trajektórie** pri vykonávaní danej technologickej operácie, na druhej strane zas **premiestňovanie sa medzi dvoma polohami** bez špecifických požiadaviek na tvar trajektórie. V oboch prípadoch je potrebné zachovať **stabilitu** systému, pričom pri konkrétnych aplikáciách môžu vystupovať rôzne požiadavky na **kvalitu** polohovania. Pri pohybe po požadovanej trajektórii sú to najmä presnosť a dynamika sledovania, pri premiestňovaní je to opäť dynamika, presnosť dosiahnutia konečnej polohy a súčasne napríklad silná aperiodicita polohovania, teda polohovanie bez prerégulovania. Na pohybový systém pritom pôsobia rôzne vplyvy, či už **vnútorné** (zmeny parametrov systému – parametrické poruchy) alebo **vonkajšie** (signálové poruchy alebo interakcie s prostredím). V niektorých aplikáciách sa amplitúda týchto porúch mení vo veľmi širokom intervale. Klasické metódy teórie riadenia v takýchto prípadoch zlyhávajú, najmä ak uvážime, že pri syntéze riadenia nemusí byť dokonalá ani znalosť štruktúry riadeného objektu ani znalosť jeho parametrov (neurčitosť systému).

V uvedených súvislostiach budeme v ďalšom používať pojmy invariantnosť a robustnosť. Pod **invariantnosťou** systému budeme rozumieť necitlivosť systému, najmä kvality riadenia, na poruchy daného druhu (napr. parametrická invariantnosť – necitlivosť riadenia voči parametrickým poruchám).

Pojem **robustnosť** je menej prísny a vyjadruje splnenie nejakých kritérií s istou dovolenou mierou vplyvu porúch, pri zachovaní základných cieľov riadenia. Robustné systémy sú obvykle spájané s minimálnou začiatočnou znalosťou objektu riadenia a s pevnou riadiacou štruktúrou, čo však nie je podmienkou.

Aké sú najrozšírenejšie metódy zabezpečenia invariantnosti resp. robustnosti riadenia? Už klasická **záporná spätná väzba** v uzavretom regulačnom obvode má okrem stabilizujúcich účinkov aj schopnosť do určitej miery potlačiť vplyv zmien parametrov a niekedy aj signálových porúch (v závislosti od miesta ich pôsobenia). **Zvyšovanie zosilnenia** v kanále riadenia má tiež pozitívny vplyv na robustnosť, môže však negatívne pôsobiť na stabilitu systému. Iná cesta ako získať robustnosť resp. invariantnosť spočíva v **generovaní prídavných signálov** v rôznych štruktúrach (napríklad princíp invariantnosti, princíp kompenzácie, riadenie s referenčným modelom a pod.). V takýchto lineárnych systémoch možno potlačiť len vplyv malých parametrických porúch (napr. malé zmeny momentu zotrvačnosti J).

Medzi vyššie formy riadenia s účinkami invariantnosti alebo robustnosti môžeme zaradiť **adaptívne** alebo **samonastavujúce sa systémy**. Väčšinou však vedú na zložité algoritmy riadenia nevhodné na riešenie v reálnom čase.

Zvláštnu kategóriu robustných systémov tvoria **nelineárne štruktúry** (v praxi sem patria aj systémy s vysokým zosilnením, kde prirodzene dochádza k obmedzeniu signálov) a z nich najmä **systémy s premenlivou štruktúrou** (po anglicky: Variable Structure Systems – VSS), ktorým je venovaná táto kapitola. Špeciálnu oblasť robustných algoritmov riadenia s premenlivou štruktúrou (Variable Structure Control – VSC) tvorí **riadenie s kľzavým režimom** (Sliding Mode Control – SMC), kde je dosahovaná robustnosť v klasickom zmysle,

teda robustnosť vďaka rezervám vo výkone, bez potreby adaptivity (regulačná štruktúra a algoritmus jej prepínania sú pevne dané).

Cieľom teórie a aplikácie systémov s premenlivou štruktúrou je získanie a uplatnenie takých vlastností, aké často nie je možné dosiahnuť v klasických spojitých systémoch, najmä pri existencii prirodzených obmedzení fyzikálnych veličín v reálnych systémoch. Popri nových, netradičných spôsoboch riešenia stability a kvality poskytuje teória VSS účinné nástroje na získanie invariantnosti resp. robustnosti, pričom je tu samozrejme aj priestor pre optimalizáciu.

Pôvodná teória systémov s premenlivou štruktúrou je rozpracovaná pre systémy s viacerými vstupmi a výstupmi (MIMO systémy) n -tého rádu. My si základy teórie VSS vysvetlíme na robustnom riadení polohy jedného stupňa voľnosti.

To nás oprávňuje k dvom zásadným zjednodušeniam:

1. Redukcia počtu vstupných a výstupných signálov – pôjde o systémy s jedným vstupným a jedným výstupným signálom, teda o **SISO systémy**.
2. Redukcia rádu systému – pôjde o **systémy druhého rádu**.

Formulácia problému

Pohonný systém robota: riadenie uhlovej polohy φ jedného stupňa voľnosti robota v prítomnosti výrazných **parametrických porúch** (zmena momentu zotrvačnosti J) a **signálových porúch** (prítomnosť a zmena momentu záťaže M_Z). Snaha dosiahnuť zníženie resp. odstránenie vplyvu týchto porúch na riadenú veličinu φ pri prechode medzi dvoma polohami.

Pri vystieraní ramena robota dochádza k veľkým zmenám J , pretože moment zotrvačnosti rotujúceho telesa je úmerný štvorcu vzdialenosti ťažiska telesa od stredu otáčania (klíbu). Zmena momentu zotrvačnosti znamená zmenu časových konštánt, teda zmenu dynamiky systému. Pri takomto rozsahu parametrickej poruchy klasické regulátory ani iné lineárne algoritmy riadenia nie sú schopné zabezpečiť kvalitu ani stabilitu polohovania.

Možné riešenie

Použitie nelineárnych štruktúr bez prvkov adaptivity v regulačnom obvode – systémy s premenlivou štruktúrou.

Základné pojmy

Fázový vektor systému – vektor $\mathbf{x}$, ktorého prvkami sú výstup riadeného systému φ (označme ho ako fázovú veličinu x) a jeho derivácia, teda $\mathbf{x} = (x, \dot{x})^T$. Pre nás bude výhodné uvažovať ako fázový vektor **vektor regulačnej odchýlky** $\mathbf{e}$, teda $\mathbf{e} = (e, \dot{e})^T$.

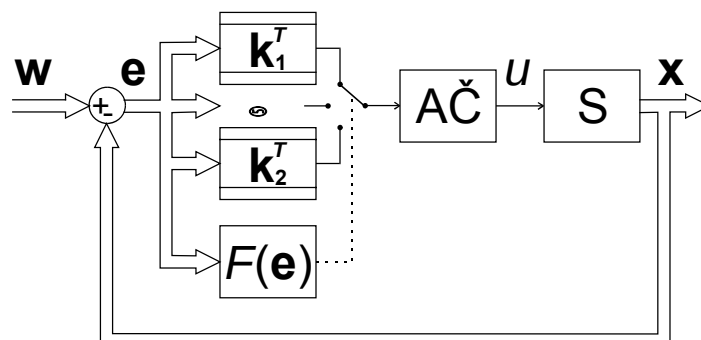
Zastupujúci bod – koncový bod fázového vektora $\mathbf{e}$.

Polohovanie – zmena a riadenie polohy zastupujúceho bodu.

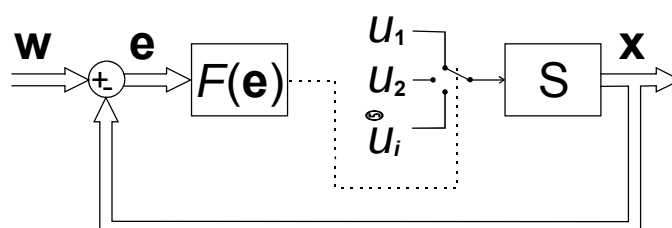
Systémy s premenlivou štruktúrou (VSS) – nelineárne spätnoväzbové systémy, u ktorých sa algoritmus výpočtu akčnej veličiny mení nespojito v závislosti od hodnoty vektora regulačnej odchýlky $\mathbf{e}$.

V zásade rozlišujeme dva typy VSS:

- systémy s **prepínaním štruktúry regulačného obvodu** (obr.7.1),
- systémy s **prepínaním úrovni akčnej veličiny** (obr.7. 2).



Obr.7. 1 VSS s prepínaním štruktúry regulačného obvodu.



Obr.7. 2 VSS s prepínaním úrovni akčnej veličiny.

Na obrázkoch je $\mathbf{w}$ – vektor žiadaných hodnôt, AČ – akčný člen, u resp. u_i – akčná veličina a S – riadená sústava. Blok $F(\mathbf{e})$ predstavuje blok prepínacej funkcie. **Krivka** $F(\mathbf{e}) = \text{konšt.}$ tvorí v rovine vektora $\mathbf{e}$ rozhranie, na ktorom sa mení algoritmus výpočtu akčnej veličiny podľa hodnoty vektora $\mathbf{e}$. Je zrejmé, že vhodným výberom vektorov $\mathbf{k}_i$ resp. úrovní u_i a krivky $F(\mathbf{e}) = \text{konšt.}$ je možné modelovať neštandardné správanie sa fázového vektora $\mathbf{x}$ resp. $\mathbf{e}$ riadeného objektu S .

Riadený objekt

V polohovom systéme **jedného stupňa voľnosti robota** so spojitými pohonnými jednotkami je zmena výstupnej veličiny (t.j. rýchlosť pohybu) úmerná akčnej veličine, pričom dynamika tejto zmeny súvisí s časovými konštantami systému. V pohonoch robotov môžeme časovú konštantu T súvisiacu s momentom zotrvačnosti J rotujúcich hmotností považovať za **dominantnú**. Teda v dominantnej časovej konštante sa uplatňuje vplyv parametrickej poruchy. Proti vplyvu akčnej veličiny pôsobí moment záťaže M_Z ako signálová porucha.

V prvom priblížení zanedbajme vplyv všetkých časových konštant okrem dominantnej T . Z toho vyplýva, že **riadený objekt bude mať prenosovú funkciu druhého rádu s astatizmom prvého rádu** a pre riadenú veličinu – polohu x platí

$$x = \frac{Ky - K_Z M_Z}{s(Ts + 1)} = \frac{K}{s(Ts + 1)} \left(y - \frac{K_Z}{K} M_Z \right) = \frac{K}{s(Ts + 1)} u \quad (7.1)$$

y – akčná veličina, K – zosilnenie kanála riadenia, K_Z – zosilnenie kanála poruchy M_Z , u – **transformácia signálovej poruchy** na novú akčnú veličinu.

Pretože K a u vystupujú v súčine, vonkajšiemu pozorovateľovi sa zmena akčnej veličiny u javí rovnako ako zmena zosilnenia K (pri zachovaní rovnakej hodnoty súčinu Ku), teda **vplyv signálovej poruchy M_Z sa dá interpretovať ako variabilita parametra K , čiže ako parametrická porucha**.

Pretože ide o systém druhého rádu, pri analýze jeho správania sa v nelineárnych štruktúrach nemôžeme použiť metódu harmonickej rovnováhy (metódu ekvivalentného prenosu) ale naopak, s výhodou môžeme použiť metódu stavového priestoru, v našom prípade **metódu fázovej roviny**. Zavedením fázových veličín x a $\dot{x}$ vytvoríme **vnútorný model systému** jednoznačne opísaný sústavou dvoch diferenciálnych rovníc prvého rádu:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \dot{x} \\ \frac{d\dot{x}}{dt} &= \frac{1}{T}(Ku - \dot{x})\end{aligned}\quad (7.2)$$

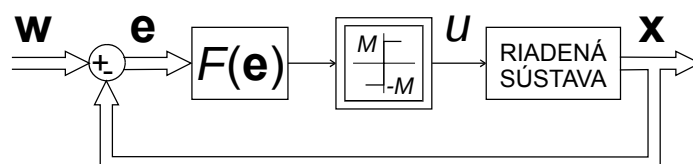
Položme si ako cieľ riadenia systému (7.2) dosiahnutie konštantnej žiadanej polohy definovanej vo fázovej rovine vektorom $(w, 0)^T$, $w = \text{konšt.}$ Zavedením regulačnej odchýlky $e = w - x$ možno systém (7.2) transformovať na systém

$$\begin{aligned}\frac{de}{dt} &= \dot{e} \\ \frac{d\dot{e}}{dt} &= -\frac{1}{T}(Ku + \dot{e})\end{aligned}\quad (7.3)$$

Tu si treba uvedomiť, že ak regulačná odchýlka e vyjadruje rozladenie polohy systému voči konštantnej žiadanej polohe w , potom derivácia regulačnej odchýlky $\dot{e}$ má význam rýchlosti pohybu systému. Žiadaný stav systému (7.3) vo fázovej rovine regulačnej odchýlky e a jej derivácie $\dot{e}$ je **začiatok súradnicového systému** $O(0,0)$, v ktorom je nulová regulačná odchýlka aj rýchlosť pohybu. Cieľom riadenia je teda dosiahnutie začiatku súradnicového systému pri požadovanej kvalite regulačného pochodu.

Štruktúra regulačného obvodu

Vyšetrite správanie sa systému (7.2) resp. (7.3) v špeciálnej štruktúre s prepínaním úrovni akčnej veličiny u podľa obr. 7. 3. Všimnite si, že táto štruktúra je zhodná so štruktúrou časovo optimálneho (**t-optimálneho**) riadenia deterministických systémov.



Obr.7. 3 Bloková schéma systému s premenlivou štruktúrou

Akčná veličina môže nadobudnúť len dve hodnoty

$$u = \begin{cases} +M > 0 & \text{pre } F(e) > 0 \\ -M & \text{pre } F(e) < 0 \end{cases}, \text{ t.j. } u = M \operatorname{sign}(F) \quad (7.4)$$

teda ide o VSS s prepínaním dvoch symetrických úrovni akčnej veličiny podľa znamienka funkcie $F(e)$. Vďaka reléovému charakteru prepínania akčnej veličiny má systém pre hodnoty $F(e) = 0$ vysoké zosilnenie. Funkcia

$$F(e) = 0 \quad (7.5)$$

tu tvorí *implicitný model prepínacej krivky*.

Analýza štruktúry s prepínaním úrovni akčnej veličiny

Analýza správania sa systému (7.3) v štruktúre podľa obr. 7. 3 spočíva vo vyšetrení fázového portréту riadeného objektu pri algoritme riadenia (7.4). Do riadenej sústavy teda vstupuje konštantný signál veľkosti $+M$ alebo $-M$. Fázový portrét tvoria trajektórie zastupujúceho bodu

vo fázovej rovine. Riešením systému diferenciálnych rovníc (7.3) je priebeh fázových veličín - regulačnej odchýlky e resp. jej derivácie $\dot{e}$ v čase

$$e(t) = e(0) - Kut + [Ku + \dot{e}(0)]T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (7.6)$$

$$\dot{e}(t) = -Ku + [Ku + \dot{e}(0)]e^{-\frac{t}{T}}$$

Vylúčením parametra t zo sústavy rovníc (7.3) dostaneme tzv. **rovniciu izoklín**

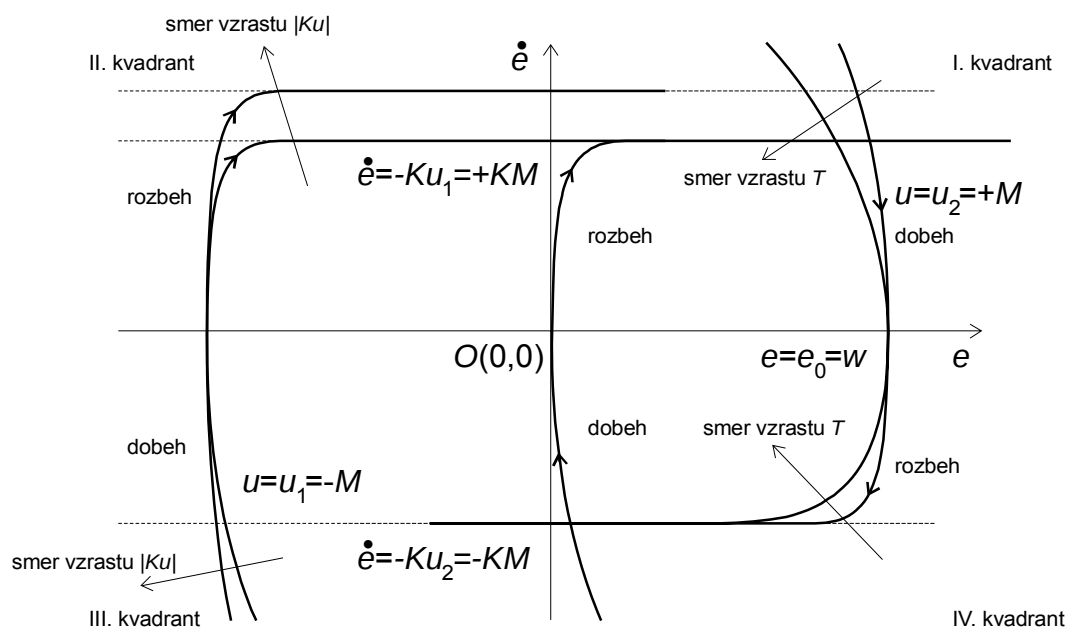
$$\frac{d\dot{e}}{de} = -\frac{1}{T} \frac{Ku + \dot{e}}{\dot{e}} \quad (7.7)$$

ktorá pre konštantnú hodnotu ľavej strany predstavuje geometrické miesto konštantných smerníc trajektórií systému (7.3) vo fázovej rovine. Riešením (7.7) ako diferenciálnej rovnice so separovateľnými premennými získame explicitný analytický výraz pre fázové trajektórie systému (7.3)

$$e = e_0 - T\dot{e} + KuT \ln \left(1 + \frac{\dot{e}}{Ku} \right) \quad (7.8)$$

kde e_0 je priesečník trajektórie s osou e resp. posunutie trajektórie v smere osi e .

Vlastnosti fázového portréту (viď obr.7. 4)



Obr.7. 4 Fázový portrét systému (7.3).

Na základe výrazov (7.3), (7.4), (7.6) až (7.8) je možné zhrnúť **vlastnosti** fázového portrétu systému (7.3) do nasledujúcich bodov:

1. *Trajektórie majú asymptoty $\dot{e} = -Ku$ nezávislé na T , teda vždy platí $-KM < \dot{e} < KM$, čo súvisí s fyzikálnym obmedzením rýchlosti na výstupe pohonu. Medzi asymptotami leží tzv. dovolená (dosiahnuteľná) oblasť fázovej roviny.*
2. *Tvar trajektórií je nezávislý na posunutí v smere osi e , teda aj na veľkosti riadiacej veličiny $w = \text{konšt.}$; trajektórie sú pre opačné hodnoty akčnej veličiny u stredovo*

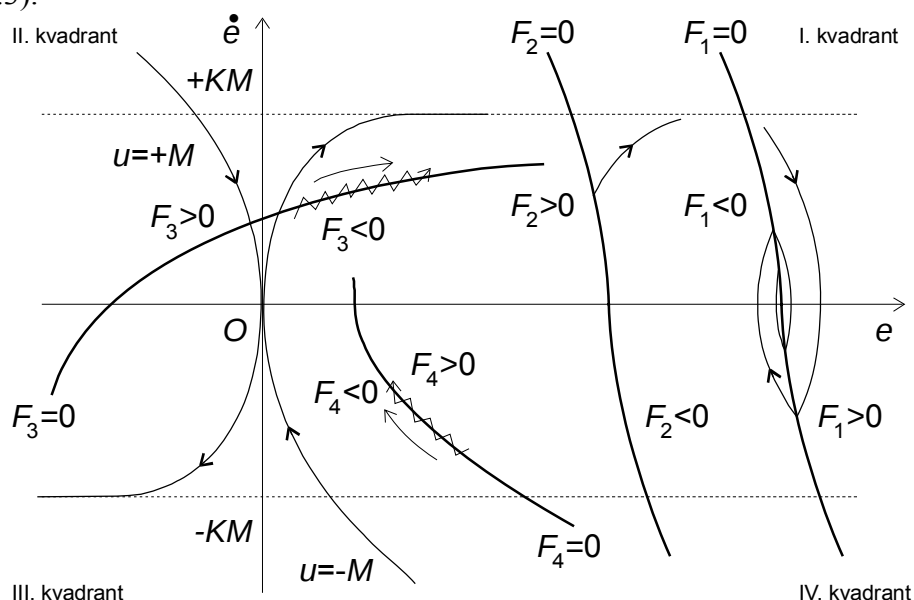
súmerné podľa začiatku fázovej roviny; trajektórie pretínajú os e kolmo na ňu a ich strmosť so vzdialenosťou od osi e klesá; trajektórie majú menšie zakrivenie dobehovej (brzdnej) časti oproti rozbehovej (akceleračnej).

3. Pod osou e , t.j. v dolnej polrovine fázovej roviny je e klesajúcou funkciou času, nad osou e je rastúcou funkciou.
4. Vzrast hodnoty súčinu KM resp. pokles hodnoty T zväčšuje strmosť trajektórií, t.j. zrýchľuje dynamiku systému.

Poznámka: **Zakrivenie** trajektórie súvisí so zmenou jej strmosti. Čím rýchlejšie sa mení strmosť trajektórie, tým má väčšie zakrivenie.

Akým spôsobom sa prejaví vplyv štruktúry VSS podľa obr.7. 3 na výslednom fázovom portréte v rovine $(e, \dot{e})$?

Rozhodovanie o prepnutí akčnej veličiny u medzi hodnotami $+M$ a $-M$ závisí od znamienka funkcie $F(e)$, teda graf funkcie $F(e) = 0$ (t.j. **prepínacia krivka**) rozdeľuje fázovú rovinu na **dve polroviny** líšiac sa znamienkom akčnej veličiny. Fázová trajektória sa vďaka prepínaniu u podľa algoritmu (7.4) pohybuje vo väčšom – menšom okolí prepínacej krivky, viď obr.7. 5. Na obrázku sú príklady štyroch prepínacích kriviek a im odpovedajúce fázové trajektórie systému (7.3).



Obr.7. 5 Príklady vplyvu prepínacej krivky na priebeh fázovej trajektórie
1,4 stabilný, 2,3 nestabilný

V závislosti od parametrov systému (7.3) a parametrov prepínacej krivky $F(e) = 0$ môžu vo všeobecnosti v stabilnom regulačnom obvode podľa obr.7. 3 vzniknúť dva typy priebehu fázovej trajektórie:

1. tlmené autooscilácie (priebeh 1) a
2. **kĺzavý režim** (priebeh 4), resp. ich kombinácia.

Tlmené autooscilácie nemajú pri riadení polohy robota veľké praktické využitie, pozrime sa však na možnosť využitia kĺzavého režimu.

Kĺzavý režim

Charakteristickou vlastnosťou pohybu v kĺzavom režime je teoreticky nekonečne vysoká frekvencia autooscilácií s nulovou amplitúdou, pričom zastupujúci bod sleduje povrch prepínacej krivky. Pohyb po prepínacej krivke je však opísaný rovnicou prepínacej krivky a je

nezávislý na parametroch riadeného objektu. To ukazuje možnosť využitia pohybu v kľzavom režime: ak pri zmene parametrov riadeného objektu zabezpečíme kľzavý pohyb po tej istej prepínacej krivke $F(\mathbf{e}) = 0$, regulačný obvod bude mať vlastnosť **parametrickej invariantnosti**. Ak bude syntéza vhodnej funkcie $F(\mathbf{e})$ apriórna, bez potreby priebežnej identifikácie resp. adaptácie, regulačný pochod bude **robustný**.

Opis pohybu v kľzavom režime

V kľzavom režime trajektória systému kopíruje prepínicu krivku. Kopírovanie povrchu prepínacej krivky $F(\mathbf{e}) = 0$ možno dosiahnuť v ekvivalentnom lineárnom regulačnom obvode generovaním tzv. **ekvivalentného riadenia** u_{ekv} , ktoré zaručí splnenie podmienky

$$\frac{dF(\mathbf{e})}{dt} = 0 \quad (\text{pri } F(\mathbf{e}(0)) = 0) \quad (7.9)$$

Rovnica (7.9) vyjadruje požiadavku, aby sa pri pohybe systému nemenila hodnota prepínacej funkcie. Ak trajektória systému začne na prepínacej krivke, potom túto krivku už neopustí, teda kopíruje ju. Rovnako sa trajektória systému správa aj v kľzavom režime, preto je riadenie spĺňajúce podmienku (7.9) ekvivalentné riadeniu v kľzavom režime.

Ekvivalentné riadenie u_{ekv} možno teda chápať ako **strednú hodnotu** vysokofrekvenčných oscilácií akčnej veličiny u v kľzavom režime v pôvodnej štruktúre VSS.

Pretože pohyb systému je viazaný rovnicou prepínacej krivky, čo je diferenciálna rovnica nižšieho rádu ako je rád riadeného objektu, použitím ekvivalentného riadenia resp. kľzavého režimu sa **rád systému redukuje**.

Podmienky existencie kľzavého režimu

Z fázového portréту správania sa riadeného objektu v štruktúre VSS vyplýva, že na prepínacej funkcii $F(\mathbf{e}) = 0$ vznikne kľzavý režim vtedy, ak sú pri pohybe zastupujúceho bodu v čase (vývoj trajektórie v čase) splnené podmienky

$$\lim_{F \rightarrow 0^+} \frac{dF(\mathbf{e})}{dt} < 0 \quad \text{a} \quad \lim_{F \rightarrow 0^-} \frac{dF(\mathbf{e})}{dt} > 0 \quad (7.10)$$

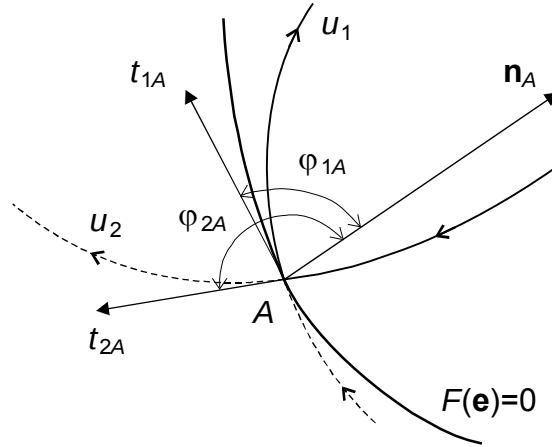
alebo

$$F(\mathbf{e}) \frac{dF(\mathbf{e})}{dt} < 0 \quad (7.11)$$

Fyzikálny význam nerovnosti (7.11) je takýto: Ak sa zastupujúci bod systému nachádza v polrovine s kladnými hodnotami $F(\mathbf{e})$, potom sa má v čase pohybovať tak, aby sa pozdĺž jeho trajektórie zmenšovala hodnota $F(\mathbf{e})$. Pri pohybe v polrovine so zápornými hodnotami $F(\mathbf{e})$ sa má hodnota $F(\mathbf{e})$ zväčšovať. V oboch prípadoch zastupujúci bod dosiahne prepínicu krivku, na ktorej je hodnota funkcie $F(\mathbf{e})$ nulová, a neopustí ju. Nerovnosť (7.9) je z literatúry známa ako **postačujúca podmienka existencie kľzavého režimu** alebo **podmienka dosiahnuteľnosti kľzavého režimu**.

Pre inžinierske použitie je vhodnejší zápis podmienok existencie kľzavého režimu daný nasledujúcou teorémou a jej dôkazom.

Nech bod A je priesečník nejakej trajektórie systému (7.3) s prepínicou krivkou (7.5), nech $\mathbf{n}_A$ je normálový vektor krivky (7.5) v bode A , nech $\mathbf{t}_{1A}$ (resp. $\mathbf{t}_{2A}$) je tangenciálny vektor trajektórie systému (7.3) v bode A pre $u = -M$ (resp. $u = +M$). Nech φ_{1A} (resp. φ_{2A}) je konvexný uhol medzi vektormi $\mathbf{n}_A$ a $\mathbf{t}_{1A}$ (resp. $\mathbf{t}_{2A}$), vid' obr. 7. 6.



Obr.7. 6 Podmienky vzniku klzavého režimu.

Teoréma 1 Uvažujme riadený objekt opísaný systémom rovníc (7.3) v uzavretom regulačnom obvode s riadením (7.4). Uzavretý regulačný obvod bude v **klzavom režime** na prepínacej krivke (7.5) v bode A vtedy a len vtedy, ak platí

$$\begin{aligned} \cos(\varphi_{1A}) &> 0 \\ \text{a súčasne} \quad \cos(\varphi_{2A}) &< 0. \end{aligned} \quad (7.12)$$

Dôkaz Vektor $\mathbf{n}_A$ je definovaný výrazom

$$\mathbf{n}_A = \left(\frac{\partial F(\mathbf{e})}{\partial \mathbf{e}} \right)_A \quad (7.13)$$

a vektor $\mathbf{t}_{1A}$

$$\mathbf{t}_{1A} = \left(\frac{d\mathbf{e}}{dt} \right)_{A, u=-M} \quad (7.14)$$

Vychádzajúc zo skalárneho súčinu týchto dvoch vektorov, pre uhol φ_{1A} platí

$$\cos(\varphi_{1A}) = \frac{\mathbf{n}_A^T \mathbf{t}_{1A}}{\|\mathbf{n}_A\| \|\mathbf{t}_{1A}\|} = \frac{\left(\frac{\partial F(\mathbf{e})}{\partial \mathbf{e}} \right)_A^T \left(\frac{d\mathbf{e}}{dt} \right)_{A, u=-M}}{\left\| \left(\frac{\partial F(\mathbf{e})}{\partial \mathbf{e}} \right)_A \right\| \left\| \left(\frac{d\mathbf{e}}{dt} \right)_{A, u=-M} \right\|} = \frac{\left(\frac{dF(\mathbf{e})}{dt} \right)_{A, u=-M}}{\left\| \left(\frac{\partial F(\mathbf{e})}{\partial \mathbf{e}} \right)_A \right\| \left\| \left(\frac{d\mathbf{e}}{dt} \right)_{A, u=-M} \right\|} \quad (7.15)$$

Porovnaním rovnice (7.15) s podmienkami (7.12) dostaneme

$$\begin{aligned} \left(\frac{dF(\mathbf{e})}{dt} \right)_{A, u=-M} &> 0 \\ \left(\frac{dF(\mathbf{e})}{dt} \right)_{A, u=+M} &< 0 \end{aligned} \quad (7.16)$$

S použitím (7.4) možno (7.16) zapísať v tvare (7.11) čo je postačujúca podmienka pre existenciu klzavého režimu [19].

Nerovnosti (7.16) označujeme ako *diferenciálny zápis* podmienok existencie kľzavého režimu, pričom **Teoréma 1** uvádza ich geometrickú interpretáciu.

Definícia 1 Bod A je na **hranici oblasti existencie kľzavého režimu** (hranica kľzavého režimu HKR), ak v podmienkach (7.12) miesto niektorej z nerovností platí rovnosť.

Ciele riadenia a vlastnosti prepínacej funkcie

Produktom syntézy regulačného obvodu typu VSS podľa obr.7. 3 sú **štruktúra a parametre** prepínacej funkcie $F(\mathbf{e}) = 0$ pri definovanej hodnote obmedzenia M nelinearity. Vychádzajúc zo základných cieľov riadenia - stability a presnosti v ustálenom stave, možno pre prepínanie funkciu pri riadení objektu (7.3) úplne opísaného fázovým vektorom $\mathbf{e} = (e, \dot{e})^T$ zhrnúť tieto všeobecne platné **pravidlá**:

1. Graf funkcie $F(\mathbf{e}) = 0$ musí prechádzať začiatkom $O(0)$ súradnicového systému roviny vektora odchýlky $\mathbf{e}$, t.j. musí platiť $F(0) = 0$, pričom bod $O(0)$ je jediným priesečníkom prepínacej krivky s osou e .
2. $F(\mathbf{e}) = 0$ musí byť spojitou funkciou všetkých prvkov vektora $\mathbf{e}$ a musí ležať v dovolenej oblasti fázovej roviny, t.j. v prípade existencie asymptôt fázového portréту systému, musí existovať časť $F(\mathbf{e}) = 0$ ležiaca v oblasti vymedzenej týmito asymptotami.
3. $F(\mathbf{e})$ musí byť v **nejakom okolí** rovnovážneho stavu systému $\mathbf{e} = 0$ rastúcou funkciou prvkov $e^{(i)}$, ($i = 0, 1$) vektora $\mathbf{e}$, t.j. pre $M > 0$ musí platiť

$$\left. \frac{\partial F(\mathbf{e})}{\partial e^{(i)}} \right|_{\mathbf{e}=0} > 0 \quad i = 0, 1 \quad (7.17)$$

4. Prepínanie funkcia $F(\mathbf{e})$ v štruktúre VSS pre riadený objekt (7.3) má byť v **celej fázovej rovine** $(e, \dot{e})$ jednoznačne rastúcou funkciou premennej $\dot{e}$, t.j. má platiť

$$\frac{\partial F(\mathbf{e})}{\partial \dot{e}} > 0 \quad (7.18)$$

Treba si uvedomiť, že v uvedených pravidlách sa nič nehovorí o kľzavom režime, ide len o stabilitu a dosiahnuteľnosť ustáleného stavu $O(0)$. Pravidlá 1 až 4 nebudeme dokazovať, urobme však niekoľko poznámok.

Poznámka k pravidlu 1. Riadený objekt môže dosiahnuť rovnovážny stav $\mathbf{e} = 0$ totožný so začiatkom súradnicového systému $O(0)$ fázovej roviny $(e, \dot{e})$ ľubovoľným vývojom fázovej trajektórie v čase (napr. v kľzavom režime) len v prípade, že bod $O(0)$ je súčasťou prepínacej krivky. Každý priesečník prepínacej funkcie $F(\mathbf{e}) = 0$ s osou e je potenciálnym rovnovážnym stavom štruktúry VSS, preto bod $O(0)$, ktorý je cieľom riadenia systému, musí byť jej jediným priesečníkom s osou e .

Poznámka k pravidlu 2. Trajektórie systému ležia v *dovolenej oblasti*. Ak má zastupujúci bod sledovať prepínanie krivku $F(\mathbf{e}) = 0$, musí aj táto ležať v *dovolenej oblasti*. Rozhranie, na ktorom dochádza k prepnutiu akčnej veličiny u , musí byť definované pre všetky hodnoty zložiek vektora $\mathbf{e}$, teda prepínanie funkcia $F(\mathbf{e})$ musí byť spojitá.

Poznámka k pravidlu 3. Toto pravidlo sa dá dokázať vyšetrením stability ustáleného stavu $\mathbf{e} = 0$ prvou metódou Ljapunova (stabilita v malom).

Priamo z výrazu (7.17) **pravidla 3** vyplýva nasledujúca veta:

Veta 1 Prepínanie krivka $F(\mathbf{e}) = 0$ rozdeľuje fázovú rovinu tak, že v okolí začiatku $O(0)$ ležia všetky kladné poloosi ($e^{(i)} > 0$; $i = 0, 1$) v polrovine $F(\mathbf{e}) > 0$ a podobne všetky záporné poloosi v polrovine $F(\mathbf{e}) < 0$.

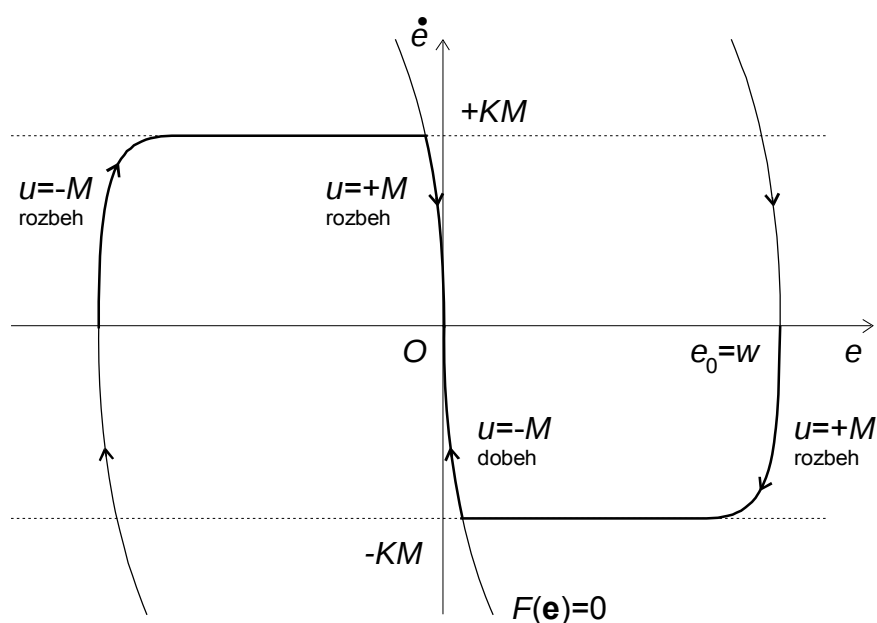
Poznámka k **pravidlu 4**. Toto pravidlo sa dá dokázať Bendixsonovým kritériom existencie limitného cyklu.

Priamym dôsledkom **pravidiel 1 až 4** pre riadenie polohového systému je nasledujúca veta:

Veta 2 Prepínacia krivka $F(e)$ v štruktúre VSS pre riadený objekt (7.3) môže ležať len v druhom a štvrtom kvadrante fázovej roviny.

Splnenie podmienky vo **vete 2** spolu s **vlastnosťami 2** fázového portréту zaručuje konvergenciu trajektórie zastupujúceho bodu k začiatku súradnicového systému $O(0,0)$ a teda **globálnu stabilitu nelineárneho uzavretého regulačného obvodu v štruktúre VSS**.

Ak má prepínacia krivka zabezpečiť rovnaké vlastnosti polohového serva aj pri reverzácii pohybu a ak je fázový portrét riadeného objektu stredovo symetrický, potom aj funkcia $F(e) = 0$ musí byť stredovo symetrická.



Obr.7. 7 t-optimálna fázová trajektória.

Poznámka. Ak by sme pri stacionárnych parametroch T a K systému (7.3) zvolili za prepínaciu krivku dobehovú trajektóriu fázového portrétu, t.j. $F(e)$ by bolo implicitným vyjadrením výrazu (7.8), spĺňajúcim podmienky pre stabilné $F(e)$, potom by išlo o **t-optimálny regulačný obvod** (deterministický systém) - obr.7. 7.

Realizácia prepínacej funkcie - prepínacia priamka

Najjednoduchšia realizácia prepínacej funkcie (7.5) vyhovujúca podmienkam uvedeným vyššie je lineárna prepínacia funkcia

$$F(e) = Pe + D\dot{e} = 0 \quad (7.19)$$

Na prepínaní akčnej veličiny sa podieľa tá časť funkcie (7.19), ktorá leží vo vnútri dovolenej oblasti (medzi asymptotami).

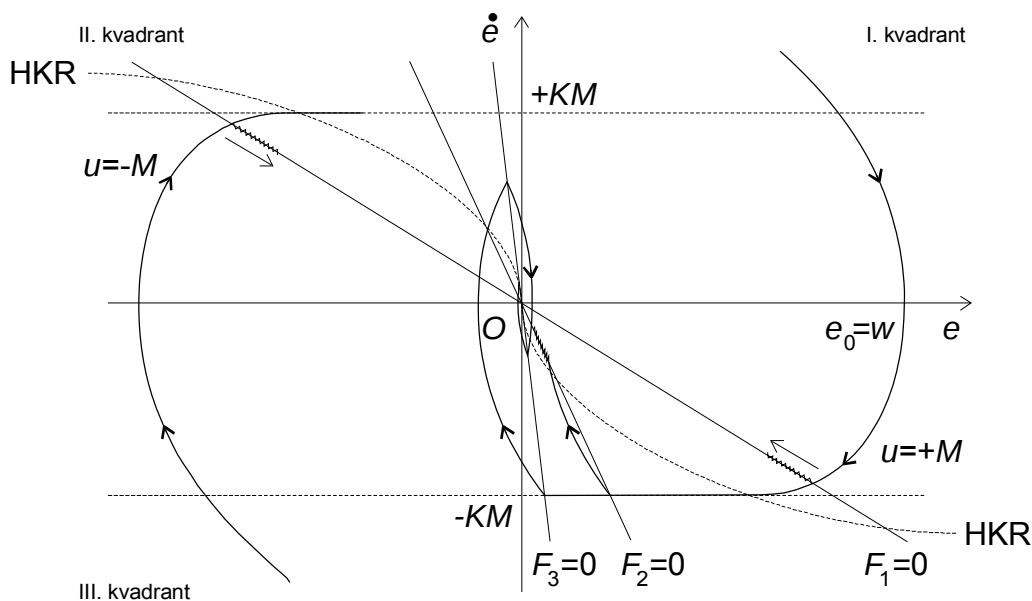
Vyšetríme správanie sa regulačného obvodu podľa obr.7. 3 pri použití prepínacej funkcie (7.19). Rovnica (7.19) reprezentuje vo fázovej rovine regulačnej odchýlky prepínaciu priamku (obr.7. 8). Podľa **Teorému 1** vznikne na tejto prepínacej priamke klzavý režim, ak je strmosť brzdných (dobeňových) trajektórií systému väčšia ako strmosť prepínacej priamky.

V kľzavom režime na prepínacej priamke je trajektória zastupujúceho bodu opísaná rovnicou (7.19), čo je lineárna diferenciálna rovnica prvého rádu bez pravej strany

$$D \frac{de}{dt} + Pe = 0 \quad (7.20)$$

ktorej riešenie v čase je

$$e(t) = e(0)e^{-\frac{P}{D}t} \quad (7.21)$$



Obr.7. 8 Vplyv sklonu prepínacej priamky na vznik kľzavého režimu.

Výraz (7.21) je exponenciála s časovou konštantou $T_{\text{exp}} = \frac{D}{P}$ a je zrejmé, že pohyb zastupujúceho bodu v čase je nezávislý na parametroch K a T riadeného objektu ale je daný parametrami prepínacej priamky P a D . Z rovnice (7.19) vyplýva, že pomer $\frac{P}{D}$ definuje strmosť prepínacej priamky ($\dot{e} = -\frac{P}{D}e$), teda čím je prepínacia priamka strmšia, tým menšia bude časová konštanta exponenciály T_{exp} a teda tým rýchlejší bude pohyb zastupujúceho bodu v kľzavom režime.

Ak na výraz (7.19) aplikujeme Laplaceovu transformáciu dostaneme prenos PD-regulátora

$$\frac{F(e)}{e} = P + Ds \quad (7.22)$$

Výraz (7.22) však súčasne predstavuje aj **implicitný model prepínacej funkcie** (priamky).

Porovnaním (7.21) a (7.22) získame informáciu o vplyve ziskov zložiek PD-regulátora na dynamiku regulačného pochodu:

1. zvyšovanie zisku D derivačnej zložky spomaľuje regulačný pochod,
2. zvyšovanie zisku P proporcionálnej zložky zrýchľuje regulačný pochod,

3. dynamika regulačného pochodu v kĺzavom režime nie je závislá od absolútnych veľkostí P a D zložky ale je daná ich **pomerom**.

Z posledného vyplýva, že rovnicu lineárnej prepínacej funkcie môžeme písať v tvare

$$F(\mathbf{e}) = \dot{\mathbf{e}} + \alpha \mathbf{e} = 0 \quad (7.23)$$

kde $\alpha = \frac{P}{D}$ definuje **sklon prepínacej priamky**. Prepínacia priamka je daná, lineárnou kombináciou prvkov vektora regulačnej odchýlky $\mathbf{e}$.

Z obr.7. 8 vyplýva, že pri rôznom sklone prepínacej priamky bude úsek trajektórie v kĺzavom režime rôzne veľký (ak vôbec vznikne). Úseky priamok s kĺzavým režimom ležia v **oblasti existencie kĺzavého režimu**, v ktorej sú pre prepínáciu priamku splnené podmienky vzniku a existencie kĺzavého režimu v tvare (7.10), (7.11), (7.12), resp. (7.16) a ktorej hranicami sú HKR (podľa **Definície 1**) a os e .

Zhrnutie: Ak oblasťou existencie kĺzavého režimu preložíme prepínáciu priamku (vyhovujúcu podmienkam pre prepínacie krivky), potom na tejto priamke vznikne po jej dosiahnutí trajektóriou objektu (7.3) kĺzavý režim pre dobeh systému do ustáleného stavu $O(0, 0)$. Snaha maximálneho využitia dynamiky riadeného objektu nás vedie k voľbe čo najstrmšej prepínacej priamky v oblasti kĺzavého režimu.

Parametrická invariantnosť

Uvažujme v ďalšom pre jednoduchosť prítomnosť len jedného typu parametrickej poruchy:

$$T_{\text{var}} \in \langle T_{\text{min}}, T_{\text{max}} \rangle \quad (7.24)$$

(čo odpovedá napr. prípadu rotácie základne manipulátora).

Pre rôzne hodnoty parametra T_{var} z intervalu (7.24) budú mať trajektórie systému vo fázovej rovine inú strmosť (viď vlastnosti fázového portréту) a teda aj HKR bude vymedzovať inú oblasť fázovej roviny. Ak prepínáciu priamku preložíme **prienikom oblastí kĺzavého režimu** pre celý interval (7.24), potom na prepínacej priamke vznikne po jej dosiahnutí kĺzavý režim nezávisle na veľkosti parametra T_{var} a regulačný pochod bude v tejto fáze **parametricky invariantný**. Dá sa dokázať, že hranicu prieniku oblastí existencie kĺzavého režimu pre interval parametrickej poruchy (7.24) tvorí HKR pre T_{max} , teda pri požiadavke parametrickej invariantnosti musíme obmedziť dynamiku systému na dynamicky najnepriaznivejší prípad, čo je logické.

Robustifikácia t-optimálneho riadenia: t-suboptimálne riadenie

Výber implicitného modelu prepínacej krivky $F(\mathbf{e})$ vo VSS podľa obr.7. 3 umožňuje dosiahnuť rôzne kritériá kvality regulačného pochodu a dosiahnutie rôzneho stupňa jeho parametrickej invariantnosti.

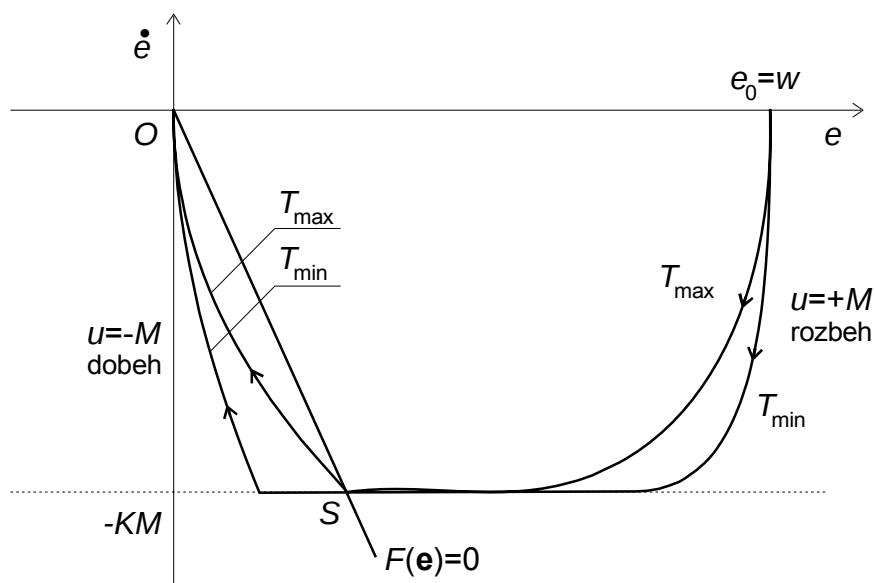
Definujme si nasledujúce **ciele** syntézy:

1. *Dosiahnuť regulačný pochod bez preregulovania napriek neurčitosti (7.24) v parametri T a pre všetky hodnoty žiadanej veličiny w .*
2. *Dynamika uzavretého regulačného obvodu má byť t-optimálna aspoň pre jednu hodnotu T z intervalu (7.24). Pre ostatné hodnoty T má zastupujúci bod maximálne využiť dynamiku opísanú vlastnými trajektóriami systému (7.3).*
3. *Matematický zápis prepínacej funkcie má byť čo najjednoduchší (pokúsme sa teda použiť lineárnu prepínaciu funkciu).*

Z cieľov syntézy je zrejmé, že kĺzavý režim má byť využitý len na zaručenie nulového preregulovania regulačného pochodu napriek parametrickej poruche v časovej konštante T .

Nie je tu požiadavka zabezpečiť celý dobeh v klzavom režime ale práve naopak, čo najväčšia časť dobehu má byť po vlastnej, teda t-optimálnej trajektórii.

Dynamicky najpriaznivejší prípad parametricky invariantného dobehu regulačného pochodu pri parametrickej poruche typu (7.24) získame voľbou prepínacej krivky vo forme t-optimálnej dobehovej trajektórie pre parameter $T_{\max}$ (obr.7. 9). V tom prípade bude dobeh regulačného pochodu pre $T_{\text{var}} = T_{\max}$ t-optimálny a pre všetky ostatné hodnoty T_{var} z intervalu (7.24) bude prebiehať v klzavom režime (splnená je podmienka existencie klzavého režimu (7.16)). Rozbeh regulačného pochodu je po vlastnej trajektórii systému a preto je t-optimálny.



Obr.7. 9 Fázový portrét (t-optimálne trajektórie) pri parametrickej poruche T_{var} .

Pri použití prepínacej priamky vedie požiadavka maximálneho využitia dynamiky riadeného objektu na voľbu čo najstrmšej priamky. Kvôli zaručeniu požiadavky nulového preregulovania výstupnej veličiny pre všetky hodnoty žiadanej veličiny w a pre celý interval poruchy (7.24) musí prechádzať prepínacia priamka priesečníkom S rozbehovej trajektórie pri maximálnej rýchlosti systému (asymptota $\dot{e} = \pm KM$) a dobehovej trajektórie t-optimálneho riadenia pre $T_{\text{var}} = T_{\max}$. Z obr.7. 9 je zrejmé, že po prepnutí na prepínacej priamke bude podľa **Teorému 1** buď časť dobehovej trajektórie tvorená trajektóriou vlastnou riadenému objektu a po druhom dosiahnutí prepínacej priamky sa zastupujúci bod bude pohybovať až do ustáleného stavu v klzavom režime, alebo bude celý dobeh prebiehať v klzavom režime. V každom prípade je zaručený regulačný pochod bez preregulovania, pretože trajektória nikdy neprekročí hranicu danú t-optimálnou dobehovou trajektóriou pre $T_{\max}$.

Pretože pre riadený objekt (7.3) neexistuje iná voľba prepínacej funkcie, ktorá by spĺňala všetky tri **ciele** syntézy, je táto voľba pre dané **ciele** dynamicky najpriaznivejšia a výsledné riadenie nazveme **t-suboptimálnym** (t.j. riadenie najbližšie možné k t-optimálnemu pri splnení uvažovaných **cieľov** syntézy). **Ciele 1 a 2** vymedzujú kritériá robustnosti t-suboptimálneho riadenia.

Na určenie sklonu α prepínacej priamky (7.23) je potrebné poznať súradnice bodu S vo fázovej rovine. Vo štvrtom kvadrante platí

$$\dot{e}_S = -KM \quad (7.25)$$

Dosadením (7.25) do (7.8) (pre $e_0 = 0$ a $u = -M$) dostaneme

$$e_s = T_{\max} KM(1 - \ln 2) \quad (7.26)$$

Pre parameter α potom platí

$$\alpha = \frac{1}{T_{\max}(1 - \ln 2)} \quad (7.27)$$

Poznamenajme, že v prípade parametrickej neurčitosti (7.24) voľba parametra (7.27) vyhovuje ľubovoľným hodnotám K a M , pretože je na nich nezávislá. t-suboptimalita je zachovaná pre **ľubovoľné frekvenčné spektrum** poruchy v parametri T , podmienkou je však dodržanie intervalu amplitúdy poruchy (7.24).

8. MOBILNÉ ROBOTY

Mobilný robot sa na rozdiel od stacionárneho vyznačuje tým, že jeho základňa je schopná neobmedzeného pohybu typicky vo dvoch a viac stupňoch voľnosti (manipulátor pohybujúci sa po koľajovom alebo podobnom pojazde nie je v tomto zmysle považovaný za mobilný robot).

Mobilné roboty môžu byť uspokojené na pohyb po zemi, na vodnej hladine alebo pod vodou, vo vzduchu alebo v kozmickom priestore, pričom je možné vytvoriť aj rôzne obojživelné konštrukcie. Mobilný robot môže ale nemusí niesť na svojej platforme manipulačné rameno, častokrát je len nositeľom technologických zariadení resp. rôznych druhov meracích prístrojov alebo vizuálnych systémov.

V súvislosti s mobilnými robotmi sa hovorí o rôznej miere autonómie, pričom tento pojem možno chápať v nasledovnom zmysle:

- **zásobovanie energiou** (robot disponuje dostatočnou zásobou energie pre splnenie danej úlohy vrátane možnosti jej priebežného dopĺňania zo solárnych článkov alebo má v prípade jej blížiaceho sa nedostatku schopnosť autonómneho návratu a doplnenia energie zo svojej základne),
- **riadenie** (napr. navigácia do cieľa, obchádzanie vopred známych aj neznámych prekážok bez potreby interakcie so svojou základňou resp. operátorom),
- **schopnosť samoopravy** (resp. funkcie aj s menšou poruchou).

Pokiaľ hovoríme o miere autonómie z hľadiska riadenia, najjednoduchšie sú zariadenia na báze diaľkového ovládania, pričom spätná väzba na operátora môže byť realizovaná v jednoduchšom prípade na báze priameho vizuálneho sledovania robota alebo aj prostredníctvom prenosu signálu z kamery k operátorovi (v tomto prípade už možno hovoriť o prvkoch teleprítomnosti). Skutočne autonómne štruktúry sú však len tie, keď robot plní čiastkové úlohy operatívneho charakteru (napr. obídenie prekážky či terénnej nerovnosti) úplne samostatne a predmetom riadenia operátorom je len definícia strategických cieľov (určenie cieľa cesty resp. aj činnosti, ktorá má byť počas cesty k cieľu resp. po dosiahnutí cieľa realizovaná).

8.1 Štruktúry podvozkov mobilných robotov

Podvozky pre pohyb po zemi môžu mať nasledovné konštrukčné usporiadanie:

- **kolesové podvozky**: dvojkolesové s diferenciálnym pohonom a s gyroskopickou stabilizáciou, trojkolesové alebo štvorkolesové konštrukcie (statická stabilita vyžaduje tri a viac kolies, pri aplikácii štyroch a viac kolies vzniká potreba ich odpruženia), viackolesové podvozky. Mobilné roboty s kolesovým podvozkom vyžadujú pri nasadení v exteriéri spevnený podklad (cestu) a pri pohybe v interiéri vyžadujú bezbariérový prístup k obsluhovaným miestam (teda odstránenie prahov, schodov a pod.).
- **pásové podvozky**: najbežnejšie ide o podvozky s dvoma pásmi, pre zvýšenie priechodnosti sa však možno stretnúť aj s viacčlánkovými konštrukciami resp. aj s viacerými ako dvomi pásmi na každom článku. Pásové podvozky umožňujú

prekonávanie menších a viacčlánkové konštrukcie dokonca aj veľkých terénnych nerovností.

- **kráčajúce podvozky:** roboty humanoidného typu majú dve nohy, bežné konštrukcie majú štyri alebo šesť nôh, vyššie počty nôh sa používajú v prípade potreby zvýšenia nosnosti resp. stability chôdze. Staticky stabilná chôdza vyžaduje 4 a viac nôh. Kráčajúce konštrukcie umožňujú prechádzať aj veľké (relatívne voči veľkosti nôh) terénne nerovnosti, takže sú vhodné aj pre prácu v teréne. Súčasne umožňujú prekonávať všetky bežné prekážky typické pre interiérové priestory.
- **kombinácie predchádzajúcich typov** kombinujú na jednom podvozku viacero vyššie uvedených princípov. Ako príklad možno uviesť konštrukciu s dvomi kolesami vzadu a dvomi nohami vpredu resp. kombináciu kolies a pásov na spoločnom podvozku. Možno sa ale stretnúť aj s konštrukciami, kde sa kombinuje funkcia nohy a kolesa alebo pásu v spoločnom konštrukčnom prvku (ide napr. o podvozky realizujúce pohyb pripomínajúci korčuľovanie na kolieskových korčuľoch).
- **iné druhy pohybu** zahŕňajú plazivý pohyb (hadovitý pohyb alebo pohyb simulujúci húsenicu), skákanie, gúľanie sa na gyroskopickom princípe alebo pohyb na základe zmeny tvaru. Špeciálnym druhom pohybu je pohyb po zvislých povrchoch, ktorý obvykle spočíva v aplikácii prisaviek resp. v prípade menších konštrukcií aj v simulácii metód pohybu hmyzu resp. slimákov.
- **vznášadlá** poskytujú možnosť pohybu nad ľubovoľným povrchom vrátane vodnej hladiny.

V technickej praxi sú používané najmä nasledovné typy **kolesových podvozkov**:

- 2-kolesové: bicyklový podvozok (ktorý sa v technickej praxi využíva len zriedka), konštrukcia typu Segway využívajúca diferenciálny pohon bez oporných koliesok, ktorá udržiava rovnováhu na báze gyroskopického snímania svojej polohy voči vertikále.
- 3-kolesové: trojkolka s diferenciálnym pohonom vzadu, trojkolka s klasickým zadným náhonom a riadiacim predným kolesom, trojkolka s riadiacim aj hnacím predným kolesom, trojkolka so synchronným pohonom všetkých kolies a trojkolka so všesmerovými kolesami.
- 4-kolesové: Ackermanov podvozok s využitím predného alebo zadného náhonu, ale možno sa stretnúť aj s aplikáciou 4 všesmerových kolies, diferenciálnym pohonom v kombinácii s 2 opornými kolieskami a inými konštrukciami.
- viackolesové podvozky sa konštruujú v prípade požiadaviek na zvýšenie stability resp. priechodnosti pri vyššom zaťažení (zníženie tlaku na jednotlivé nápravy).

Pre pohyb po vodnej hladine a pod vodou sa využívajú zmenšené verzie štandardných technických konštrukcií používaných na prevoz ľudí a tovaru, teda robotizované člny (lode) či ponorky. Pre špecifické úlohy sa však využívajú aj konštrukcie kopírujúce biologické vzory a v tomto zmysle ich možno označiť ako robotické ryby alebo vodné hady (úhory). Pre prácu na morskom dne sa využívajú aj robotické kraby. Špeciálnou oblasťou sú roboty pohybujúce sa na báze zmeny tvaru (robotické meňavky).

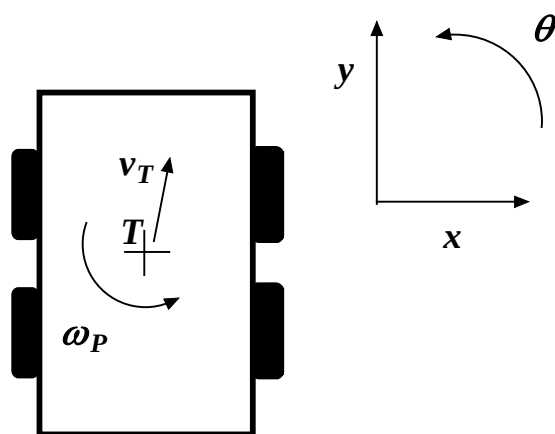
Pre pohyb vo vzduchu je situácia obdobná – čo sa týka vzdušných plavidiel ľahších ako vzduch, používajú sa typicky bezpilotné vzducholode vybavené viacerými vrtuľami. V prípade plavidiel ťažších ako vzduch, ide o lietadlá (väčšinou s vrtuľovým pohonom) resp. vrtuľníky (s 1 nosným a 1 vyrovnávacím rotorom, s 2 protibežnými rotormi, používa sa aj konštrukcia so 4 rotormi). Konštrukcie napodobňujúce let vtákov s využitím mávajúcich krídiel (tzv. ornitoptéry) sú pomerne zriedkavé. Prvé pokusy boli podniknuté aj s robotickým lietajúcim hmyzom (tzv. entomoptéra). Krídla v tomto prípade

nevykonávajú kývavý pohyb, ale v malom rozkmitě vibrujú, čo umožňuje dosahovať vysoký stupeň energetickej efektívnosti letu. Najčastejšie pre účely záchranných akcií možno spomenúť aj aplikáciu bezmotorových klzákov resp. riaditeľných padákov so všetkými obmedzeniami, ktoré tieto konštrukcie prinášajú.

Pre pohyb v kozmickom priestore sa štandardne používa reaktívny pohon (chemické palivo iónový motor, perspektívne atómový pohon), v rámci dlhodobých letov v rámci Slnčnej sústavy možno aplikovať aj princíp slnečnej plachetnice využívajúcej na pohyb tlak slnečného vetra.

8.2 Matematický model robota v globálnom súradnicovom systéme

Mobilný robot pohybujúci sa po rovinnej podložke má 3 stupne voľnosti – jeho okamžitú polohu možno charakterizovať polohou jeho stredu (resp. ťažiska T) v osi x aj y a súčasne natočením robota voči súradnému systému (x,y) , ktorý možno charakterizovať uhlom θ . Matematický model robota v globálnom súradnicovom systéme potom vyjadruje vzťah medzi spomínanými tromi veličinami v úlohe stavových veličín a veľkosťou tangenciálnej rýchlosti v_T a rýchlosťou zmeny uhla natočenia θ , teda uhlovou rýchlosťou otáčania ω_P okolo svojho stredu (ťažiska) v úlohe vstupných veličín. V prípade pohybu vo vzduchu alebo pod vodou pribúdajú ďalšie stupne voľnosti – výška nad zemou resp. hĺbka ponoru a v závislosti na konštrukcii popri uhle vybočenia aj uhol sklonu a uhol náklonu.



Obr. 8.1 Definícia súradníc definujúcich polohu robota

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_T \\ \omega_P \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

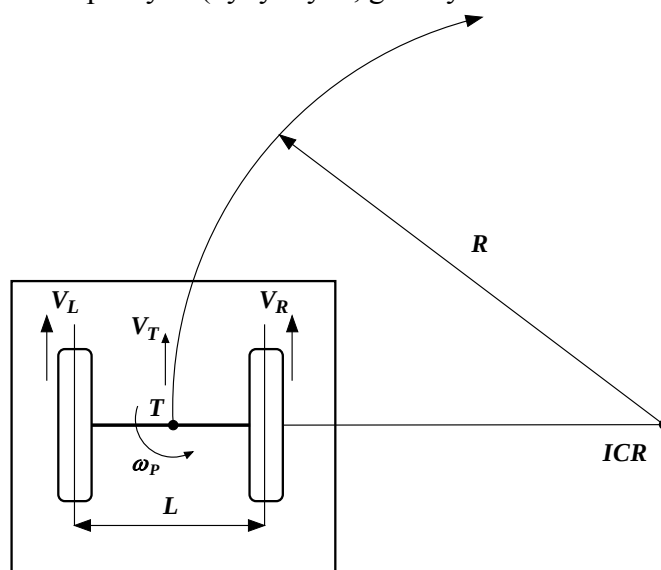


Obr. 8.2 Príklady konštrukcie kolesových podvozkov

8.3 Kinematická analýza jednotlivých typov kolesových podvozkov

8.3.1 Diferenciálny pohon

Tento typ pohonu sa vyznačuje existenciou dvoch nezávisle poháňaných kolies, ktorých vzájomnú vzdialenosť L nazývame rozchod. Stabilita vozíka (udržiavanie kolmice voči zemskému povrchu) je udržiavaná buď nezávislou riadiacou slučkou na báze gyroskopických snímačov alebo pomocou oporných (výkyvných, guľových alebo všesmerových) koliesok.



Obr. 8.3 Schéma diferenciálneho podvozku

Pohyb podvozku na báze diferenciálneho pohonu možno charakterizovať ako pohyb po oblúkoch okolo okamžitého stredu otáčania (ICR - Instantaneous Center of Rotation), pričom polomer tohto oblúka označíme R . Pokiaľ označíme symbolmi v_L rýchlosť ľavého a v_R rýchlosť pravého kolesa, možno odvodiť vzťah pre výpočet polomeru otáčania, ako aj pre okamžitú tangenciálnu rýchlosť stredu vozíka T a uhlovú rýchlosť otáčania vozíka okolo tohto stredu nasledovne:

$$R = \frac{L}{2} \cdot \frac{v_R + v_L}{v_R - v_L} \quad (8.2)$$

$$v_T = \frac{v_R + v_L}{2} \quad (8.3)$$

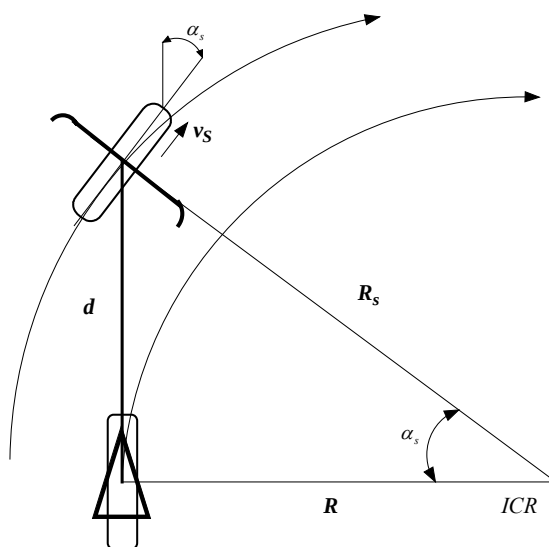
$$\omega_P = \frac{v_R - v_L}{L} \quad (8.4)$$

Zo vzťahov je zrejmé, že pokiaľ sa obe hnacie kolesá otáčajú rovnakou uhlovou rýchlosťou v rovnakom smere, podvozok sa pohybuje priamočiarno ($R \rightarrow \infty$). Ak sa obidve kolesá otáčajú rovnakou uhlovou rýchlosťou ale v opačnom smere, vozík sa otáča okolo svojho stredu ($R=0$).

8.3.2 Bicyklový podvozok

Tento typ podvozku sa v technickej praxi využíva len zriedka kvôli náročnému zabezpečovaniu jeho stability. Je však vhodný na odvodenie pohybových rovníc, ktoré potom možno poľahky rozšíriť na prípad trojkolesového resp. aj štvorkolesového podvozku.

Označme vzdialenosť stredu predného a zadného kolesa (rázvor kolies) písmenom d . Ak ďalej označíme symbolom α_s natočenie predného (riadiaceho) kolesa a v_s rýchlosť jeho pohybu (presnejšie pohybu jeho stredu), potom pre polomer otáčania predného kolesa R_s , polomer otáčania zadného kolesa R resp. tangenciálnu rýchlosť pohybu stredu zadného kolesa resp. uhlovej rýchlosti otáčania bicykla okolo neho možno odvodiť nasledovné vzťahy:



Obr. 8.4 Schéma bicyklového podvozku

$$R_s = d / \sin(\alpha_s) \quad (8.5)$$

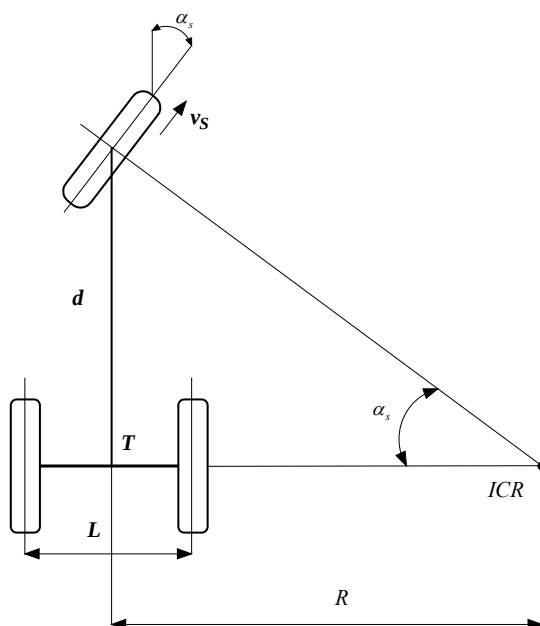
$$R = d / \tan(\alpha_s) = d \cot(\alpha_s) \quad (8.6)$$

$$v_T = v_s \cos(\alpha_s) \quad (8.7)$$

$$\omega_p = \frac{v_s}{d} \sin(\alpha_s) \quad (8.8)$$

8.3.3 Trojkolka s predným náhonom

Problémy so statickou stabilitou bicyklového podvozku možno odstrániť náhradou zadného kolesa dvojicou kolies na spoločnej osi. Štruktúra trojkolesového podvozku, v ktorom zadné kolesá sú pasívne a predné koleso plní funkciu hnacieho aj riadiaceho kolesa je na obr. 8.5.



Obr. 8.5 Schéma trojkolky s predným náhonom

Rovnice charakterizujúce pohyb trojkolky s predným náhonom sú zhodné s rovnicami odvodenými pre bicyklový podvozok, len v súvislosti s odvodením veličín charakterizujúcimi jej pohyb nehovoríme o pohybe stredu zadného kolesa, ale o pohybe bodu T ležiacom v strede medzi zadnými kolesami s rozchodom L .

$$R = d \cot(\alpha_s) \quad (8.9)$$

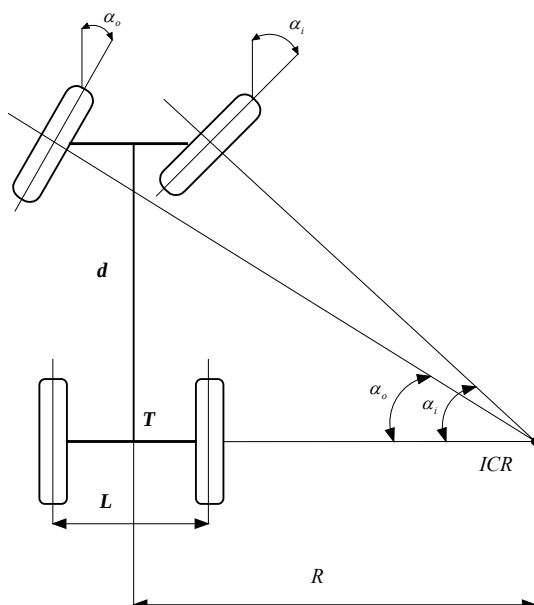
$$v_T = v_s \cos(\alpha_s) \quad (8.10)$$

$$\omega_p = \frac{v_s}{d} \sin(\alpha_s) \quad (8.11)$$

8.3.4 Ackermanov podvozok

Tento typ štvorkolesového podvozku sa vyznačuje tým, že predné kolesá nie sú natáčané o rovnaký uhol, ale vnútorné koleso je natočené voči priamemu smeru o väčší uhol ako vonkajšie. Musí byť pritom splnená požiadavka, aby sa obidve predné kolesá otáčali okolo

toho istého stredu *ICR* (ktorý je súčasne stredom otáčania bodu *T*). Takto sa oproti iným spôsobom natáčania predných kolies zabezpečuje okrem iných výhod aj ich vyššia životnosť.

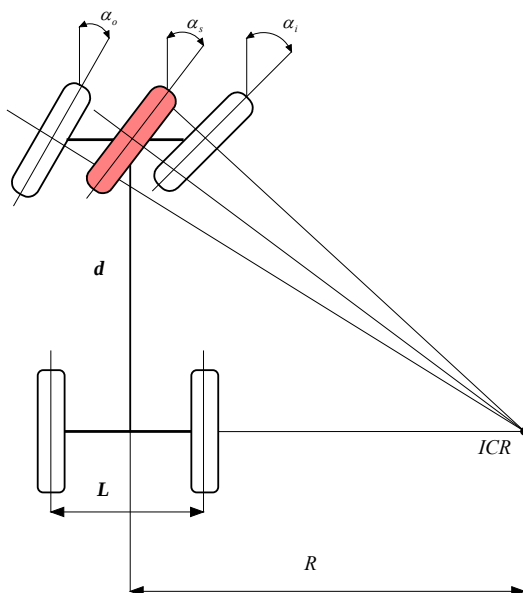


Obr. 8.6 Schéma Ackermanovho podvozku

Uvedený typ riadenia podvozku možno formalizovať nasledovnou rovnicou:

$$\cot(\alpha_o) - \cot(\alpha_i) = L / d \quad (8.12)$$

Pokiaľ by sme chceli pre veličiny charakterizujúce pohyb stredu medzi zadnými kolesami odvodiť obdobné vzťahy ako v prípade trojkoľky, je možné aplikovať redukciu Ackermanovho štvorkolesového podvozku na trojkoľku.



Obr. 8.7 Redukcia Ackermanovho podvozku na trojkoľku

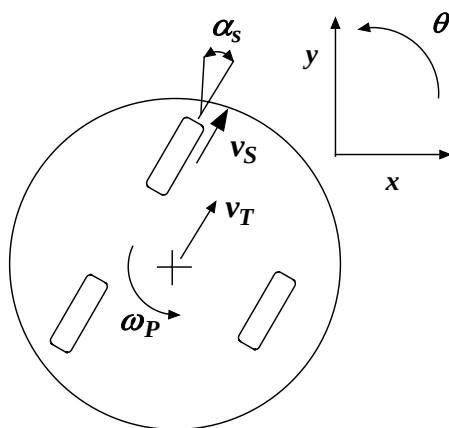
Pri redukcii možno použiť nasledovné vzťahy:

$$\cot(\alpha_s) = \cot(\alpha_i) + L / 2d \quad (8.13)$$

$$\cot(\alpha_s) = \cot(\alpha_o) - L / 2d \quad (8.14)$$

8.3.5 Podvozok so synchronnym pohonom

Jedná sa o špecifický spôsob riadenia vozíka v 2 stupňoch voľnosti, kedy sa všetky tri kolesá (resp. aj viac kolies) otáčajú aj natáčajú synchronne či už za pomoci vhodnej mechanickej konštrukcie alebo aj mechanicky nezávisle, ale so synchronnym zadávaním riadiacich veličín. Špecifikom tejto konštrukcie je, že vozík sa môže pohybovať priamočiarno ľubovoľným smerom, čo možno formálne vyjadriť nekonečnou hodnotou polomeru otáčania jeho stredu v každom okamihu. Takýto spôsob pohybu (kedy sa vozík na rozdiel od konštrukcií na báze diferenciálneho pohonu alebo podvozku bicyklového typu môže pohybovať aj “do boku”) sa charakterizuje aj ako holonómny pohyb. Špecifikom synchronneho pohonu vzhľadom na počet riadených stupňov voľnosti je, že podvozok pri pohybe vozíka v ľubovoľnom smere po rovine zachováva konštantnú orientáciu v globálnom súradnicovom systéme, teda $\theta = \text{konšt.}$



Obr. 8.8 Schéma podvozku so synchronnym pohonom

$$v_x = v_s \cos(\alpha_s) \quad (8.15)$$

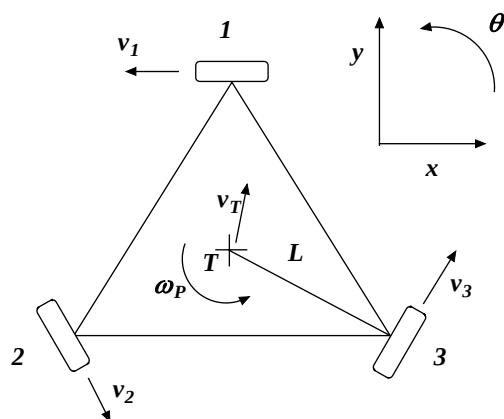
$$v_y = v_s \sin(\alpha_s) \quad (8.16)$$

$$v_T = v_s \quad (8.17)$$

$$\omega_p = 0 \quad (8.18)$$

8.3.6 Podvozok s tromi všesmerovými kolesami

Tento typ podvozku s tromi nezávisle poháňanými všesmerovými kolesami (umožňujúcimi pasívny pohyb v priečnom smere) poskytuje holonómny pohyb s tromi stupňami voľnosti. Oproti podvozku so synchronnym pohonom všetkých kolies poskytuje aj možnosť rotácie podvozku okolo svojej osi.



Obr. 8.9 Schéma podvozku s tromi všesmerovými kolesami



Obr. 8.10 Všesmerové koleso od firmy Kornylak Corp.

Pokiaľ sú kolesá umiestnené vo vrcholoch rovnostranného trojuholníka, pričom vzdialenosť stredu kolies od stredu podvozku označíme L , potom možno pre pohyb stredu podvozku odvodiť nasledovné rovnice:

$$v_x = -\frac{2}{3}v_1 + \frac{1}{3}v_2 + \frac{1}{3}v_3 \quad (8.19)$$

$$v_y = -\frac{1}{\sqrt{3}}v_2 + \frac{1}{\sqrt{3}}v_3 \quad (8.20)$$

$$v_T = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} \quad (8.21)$$

$$\omega_P = \frac{1}{3L}(v_1 + v_2 + v_3) \quad (8.22)$$

Pritom aj v tomto prípade nadobúda hodnota polomeru otáčania vzhľadom na priamociary pohyb nekonečnú hodnotu. Existuje aj variant tohto typu podvozku so 4 všesmerovými kolesami, tento sa však riadi inými vzťahmi.

8.4 Kráčajúce roboty

Spôsoby pohybu kráčajúcich podvozkov musia zabezpečiť statickú alebo dynamickú stabilitu.

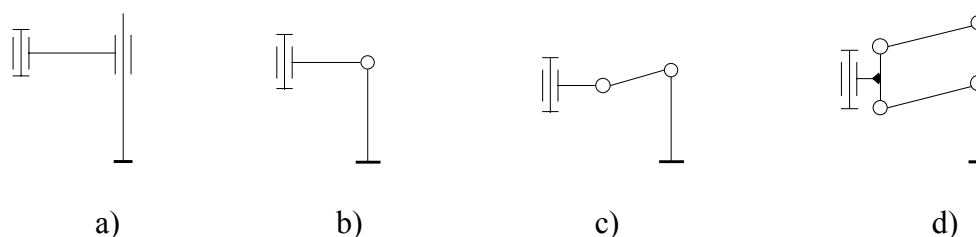
Statická stabilita – spočíva v schopnosti udržať polohu platformy bez pohybu nôh - aspoň tri nohy musia byť v kontakte s podložkou a priemet ťažiska musí byť vo vnútri trojuholníka sformovaného kontaktnými bodmi nôh s podložkou.

Dynamická stabilita – v tomto prípade celé telo, časť tela resp. samotné nohy musia byť v pohybe, aby udržali ťažisko v rámci plochy ohraničenej bodmi kontaktu nôh a podložky.

Dnes technicky používané konštrukcie sú takmer výlučne postavené na báze zabezpečenia prvého menovaného typu stability, pričom konštrukcie pracujúce s dynamickou stabilitou sú skôr experimentálneho charakteru.

Kinematická štruktúra nohy

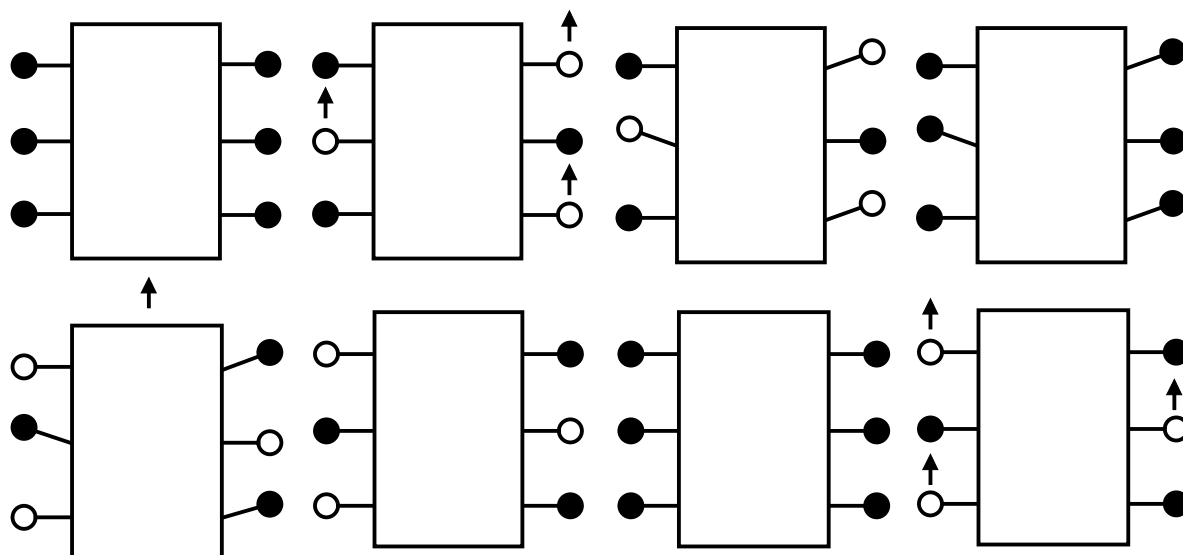
Každá noha musí mať minimálne 2 stupne voľnosti, aby mohla realizovať zdvihnutie chodidla z podložky, posun vpred alebo vzad a spätné polozenie chodidla na podložku (obr. 8.11a a 8.11b). Pridaním tretieho stupňa voľnosti sa zvyšuje počet možných spôsobov chôdze (vrátane krabieho pohybu do boku) resp. aj kvalita chôdze, kedy je možné zabezpečiť počas zdvíhania nohy nemennú orientáciu chodidla voči podložke (obr. 8.11c). Túto vlastnosť je možné pri aplikácii paralelogramu zabezpečiť už s 2 pohonmi (obr. 8.11d).



Obr.8.11 Rôzne kinematické štruktúry nohy mobilného robota

Spôsoby chôdze

V súvislosti s definíciami statickej a dynamickej stability môžeme hovoriť o staticky stabilnej chôdzi alebo o chôdzi s prvkami dynamickej stability. V tomto zmysle potom hovoríme v prípade 4-nohých konštrukcií o chôdzi resp. behu. V prípade 6-nohých podvozkov sa obvykle využíva chôdza, keď sú v kontakte s podložkou vždy aspoň 3 nohy tvoriace trojuholník vytváraný na jednej strane prednou a zadnou nohou a na protiľahlej strane strednou z radu 3 nôh. Príklad pohybu 6-nohého robota je na nasledovnom obrázku. Plný krúžok značí chodidlo, ktoré má dotyk s podložkou, prázdny krúžok značí zdvihnuté chodidlo.



Obr.8.12 Jeden z možných spôsoboch chôdze 6-nohého kráčajúceho podvozku



Obr.8.13 Príklad technickej realizácie 6-nohého kráčajúceho podvozku

8.5 Riadenie polohy mobilných robotov

Mobilné roboty môžu byť riadené na základe **apriórnej znalosti mapy prostredia**, v ktorom sa majú pohybovať a v tom prípade potrebujú neustále disponovať informáciou o svojej okamžitej polohe. Iným spôsobom riadenia sú metódy, ktoré nevyžadujú žiadnu apriórnu informáciu a pohyb robota je riadený len na základe okamžitých informácií z laserového alebo ultrazvukového snímača vzdialenosti resp. vizuálneho systému (**reaktívne typy riadenia**). Takéto riadenie umožňuje realizovať sledovanie stien, obchádzanie prekážok v ceste, sledovanie iného robota alebo človeka v predpísanej vzdialenosti resp. aj orientácii k smeru pohybu a pod. Takýto spôsob riadenia môže byť kombinovaný s postupnou tvorbou mapy neznámeho prostredia, takže po návrate do niektorého z východných bodov už robot disponuje istými informáciami o svojom okolí a dráhu, po ktorej opakovane prechádza, môže z rôznych hľadísk optimalizovať (skrátit čas potrebný na jej prejdenie, zvýšiť bezpečnosť prechádzania okolo prekážok a pod.). Vyššie uvedené metódy riadenia polohy sú obvykle kombinované so snímačmi prekážok na krátke vzdialenosti (infračervené snímače resp.

pružne uložené kontaktné snímače) umožňujúcimi núdzové zastavenie robota pri náraze na neočakávanú (dynamickú) prekážku resp. pri zlyhaní riadenia vyššej úrovne.

Špeciálnym spôsobom riadenia je **sledovanie predpísanej trajektórie** (čiary namaľovanej reflexnou farbou na podložke, kábla s vysokofrekvenčným signálom zaliatym v podlahovej hmote a pod.) – tento spôsob je typicky využívaný na riadenie pohybu manipulačných vozíkov vo výrobných halách. Takýto spôsob pohybu vyžaduje bezbariérový prístup a voľne priechodný terén pozdĺž predpísanej dráhy. Problém zrážky s ľudskou obsluhou či nepredvídanými prekážkami v dráhe sa rieši ich detekciou pomocou vyššie spomínaných snímačov na krátke vzdialenosti resp. pružne uloženým kontaktným snímačom a okamžitým zastavením vozíka, pokiaľ kontakt s prekážkou resp. jej blízkosť pretrváva.

Relatívne meranie polohy založené na integrovaní zmien oproti poslednej známej polohe možno realizovať pomocou nasledovných metód:

- odometria (spracovanie signálov zo snímačov otáčok resp. natočenia kolies)
- inerčné meranie (akcelerometer, gyroskop)
- Dopplerovské meranie rýchlosti (radarové meranie)

Odometrické metódy sú založené na snímaní otáčok kolies, prípadne aj uhla natočenia riadiaceho kolesa. Výhodou tejto metódy je jednoduchá realizácia a nízka cena, keďže uvedené snímače sú už v systéme spravidla prítomné kvôli spätnoväzobnému riadeniu pohonov kolies (resp. nie je problém ich aplikovať aj na pasívne kolesá). Nevýhody tejto metódy sa prejavujú najmä pri aplikácii na málo príľnavom povrchu, kedy pri prudších zmenách rýchlosti (prudké rozbehy-brzdzenia) a rýchlych zmenách smeru dochádza ku šmyku resp. preklzovaniu kolies v pozdĺžnom aj priečnom smere. V prípade pohybu po povrchu s rôznymi nerovnosťami navyše dochádza k nekontrolovateľnej strate kontaktu medzi hnacími (riadiacimi) kolesami s podložkou, čím sa rovnako ako v predošlom prípade zavádzajú do merania absolútnej polohy náhodné chyby. Okrem toho sa do výslednej neurčitosti merania premietajú aj chyby kvantovania a tiež rôzne druhy systematických chýb súvisiacich s deformáciami podvozku voči predpokladaným parametrom kinematického modelu. Chyby určenia polohy sa postupne akumulujú, takže po prejdení dlhšej dráhy už nie je možné zabezpečiť dostatočne presné určenie absolútnej polohy vozíka, a teda napr. ani presný návrat vozíka do východzej polohy.

Inerčné meranie využíva snímanie informácií zo snímačov zrýchlenia (akcelerometrov) resp. aj gyroskopov v príslušnom počte stupňov voľnosti a ich dvojitej resp. jednoduchšej priebežnej integrácii, čím možno dospieť k okamžitým hodnotám absolútnej polohy resp. orientácie robota v priestore. Táto informácia je podobne ako v prípade odometrie postupne zaťažovaná rôznymi náhodnými a systematickými chybami a po istom čase prestane poskytovať dostatočne presné výsledky. Pre tento spôsob merania je problematické najmä dlhotrvajúce meranie pohybu ustálenou rýchlosťou resp. pohybu v nemennom smere. Keďže výhody resp. nevýhody tohto typu merania sú komplementárne s vlastnosťami odometrického merania, fúziou údajov z oboch typov meracích systémov je možné významne zvýšiť presnosť výpočtu okamžitej absolútnej polohy.

Dopplerovské radarové meranie absolútnej rýchlosti voči podložke je možné použiť ako doplnkový zdroj údajov na korekciu odometrických chýb najmä v prípade dlhodobého priamočiareho pohybu ustálenou rýchlosťou.

V prípade požiadavky na dlhodobé zabezpečenie presnosti merania absolútnej polohy je potrebné v pravidelných intervaloch (v časovom alebo geometrickom zmysle slova) realizovať kalibráciu nameraných údajov prostredníctvom získania nezávislej informácie o absolútnej polohe, k čomu je možné použiť vhodnú **metódu absolútneho merania polohy**. V užšom slova zmysle ide o určenie polohy robota voči prírodným dominantám resp. častejšie voči umelým optickým resp. rádiovým majákom so známou polohou, pričom k tomuto účelu sa používajú vhodné geometrické metódy, napr. triangulácia alebo trilaterácia.

Triangulačná metóda spočíva v meraní uhlov, ktoré zvierajú z pohľadu okamžitej polohy robota majáky so známou vzájomnou vzdialenosťou a v následnom výpočte relatívnej polohy voči nim pomocou príslušných trigonometrických vzťahov. **Trilateračná metóda** naproti tomu vychádza z merania vzdialeností k dvom a viacerým majákom so známou polohou (typicky na základe merania doby letu signálu), z čoho sa následne určí poloha v dvoch a viacerých súradniciach. Na báze druhej menovanej metódy pracuje aj známy navigačný systém GPS (resp. aj jeho európsky nasledovník Galileo). Špecifickým druhom merania je dnes už menej používaný spôsob hyperbolickej navigácie vyhodnocujúci fázový posun signálov z dvoch majákov so známou vzájomnou vzdialenosťou.

Meranie absolútnej orientácie platformy mobilného robota je možné realizovať aj za pomoci elektronického **kompasu**. V prípade robotov výrazne sa pohybujúcich aj vo zvislom smere (lietajúce a pod vodnou hladinou plávajúce roboty) je možné aplikovať aj snímače merania výšky resp. hĺbky na základe merania tlaku atmosféry resp. vody. Pomocou viaczložkových snímačov zrýchlenia polovodičového typu je možné realizovať aj meranie uhla sklonu a uhla náklonu voči horizontálnej rovine.

9. RIADIACE SYSTÉMY ROBOTOV

Pri analýze a návrhu štruktúry riadiaceho systému treba robiť analýzu funkcií systému v troch režimoch: v ručnom režime, pri tvorbe programu a v režime automatickej činnosti.

V **ručnom režime** prebieha učenie, nastavovanie systému, diagnostika, meranie a pod. Základom je príjem informácií z riadiaceho pultu, ich dešifrovanie a vydávanie povelov pre riadené časti systému.

V **režime učenia** prebieha:

- príjem informácií zo snímačov o polohe koncového bodu robota a o polohe technologického vybavenia
- komprimácia údajov
- ukladanie informácií do pamäte.

V **režime automatickej činnosti** sú nasledujúce etapy spracovania informácie:

- vstup riadiaceho programu
- transformácia informácie do formy vhodnej na generovanie riadiacich príkazov servosystémov
- výpočet riadiacich signálov s využitím informácií o aktuálnych parametroch polohy koncového bodu robota a technologického vybavenia získaných zo snímačov.

Z hľadiska úrovne riadiacich systémov robotov a úloh, ktoré plnia, možno roboty charakterizovať:

- charakterom riadenia činnosti robota
- spôsobom účasti operátora na riadení robota
- počtom súčasne riadených robotov
- kvalitou riadenia pohybu
- princípmi organizácie riadiaceho systému, spôsobom technickoprogramovej realizácie riadiaceho systému.

Zákony riadenia sa realizujú ako riadiace programy. Možné varianty sú:

- riadenie podľa pevného programu bez jeho prestavenia v procese činnosti
- adaptívne zmeny programu v závislosti od podmienok činnosti
- formovanie riadenia bez zjavného zadania programu.

Priemyselný robot, podobne ako iné automatické systémy, má vysoké nároky na prípravu, priebeh a kontrolu výrobného procesu. Ak sa tieto nároky nesplnia, zvyšujú sa straty a znižuje efektívnosť výrobného úseku i výrobného celku.

Pri návrhu treba vychádzať z jednoty technického projektu a projektu riadiaceho systému. V každej etape projektu treba formovať požiadavky na zlepšenie organizácie riadenia systému.

Existujú dva základné prístupy k návrhu riadiaceho systému:

- spojenie riadenia s technológiou (vychádza sa z technológie),
- mnohoúrovňová organizácia spracovania informácie počítačom (vychádza sa z architektúry počítača).

Pri prvom spôsobe sa môžu lepšie riešiť otázky typizácie technologických objektov a systémov a pri druhom otázky architektúry a programového vybavenia riadiaceho systému.

Systémový návrh zabezpečuje:

- typizáciu pohybov a technológií spojenú s rôznymi spôsobmi opísania a klasifikácie mechanizmu pohybov v technologických procesoch, rozpracovaním modelov ručných technologických procesov, ohodnotením typových skupín technologického vybavenia,

- racionálnosť vytvorenia komplexu technických prostriedkov, ktorá vychádza z unifikácie a štandardizácie prvkovej bázy a zabezpečenia optimálnosti charakteristík používaných technických prostriedkov,
- autonómnosť riadenia, uvažujúcu stupeň automatizácie technologického procesu s len počítačovým alebo interaktívnym spôsobom riadenia,
- vzájomnú zámennosť vybavenia robotov, vychádzajúcu z požiadavky spoľahlivosti systému a rozšírenia možnosti systému,
- pružnosť štruktúr spracovania informácie,
- efektívnosť algoritmickeho a programového vybavenia pre paralelné riešenie úloh,
- vybavenosť prostriedkami pre ladenie, modelovanie systému pre zabezpečenie pružných zmien v systéme,
- automatizáciu výskumu, projektovania a zavedenia riadiacich systémov s cieľom dosiahnuť vysoké parametre a efektívnosť v dôsledku zníženia nákladov a skrátenia vývoja a výroby.

9.1 Klasifikácia riadiacich systémov

Z hľadiska úrovne riadiacich systémov robotov a úloh, ktoré plnia, možno roboty charakterizovať:

- charakterom riadenia činnosti robota,
- spôsobom účasti operátora na riadení robota,
- počtom súčasne riadených robotov,
- kvalitou riadenia pohybu,
- princípmi organizácie riadiaceho systému, spôsobom technicko-programovej realizácie riadiaceho systému.

9.2 Riadenie činnosti robotov

Riadiace systémy možno deliť na systémy: **programového riadenia**, **riadenia podľa stavu vonkajšieho prostredia** a **kombinovaného riadenia**.

Pri programovom riadení sa činnosť uskutočňuje podľa vopred vytvoreného programu. Program musí obsahovať potrebné údaje pre pohyb robota a pre činnosť prídavných zariadení. Vykonávanie programu môže byť synchronizované s činnosťou iných systémov, s ktorými robot pracuje. S programovým riadením pracujú roboty prvej generácie a využíva sa aj v robotoch vyšších generácií.

Program činnosti robota sa môže zadávať vo forme postupnosti želaných hodnôt súradníc pre každý stupeň voľnosti, vo forme želanej trajektórie pohybu koncového bodu robota v trojrozmernom súradnicovom systéme alebo vo forma postupnosti elementárnych operácií.

V prípade, že sa zadávajú súradnice pre každý stupeň voľnosti, stačí na uchovanie a vydanie programu len pamäť. Ak sa má vykonávanie programu synchronizovať alebo čiastočne

prispôbiť činnosti vonkajších systémov, potom je potrebný riadiaci systém pre spracovanie signálov zo snímačov a generovanie riadiacich príkazov.

Pri zadávaní programu vo forme trajektórie koncového bodu robota treba prepočítavať túto trajektóriu na zmenu kľbových premenných, na súradnice jednotlivých stupňov voľnosti.

Ak sa program zadáva vo forme následnosti elementárnych operácií, treba automaticky generovať trajektóriu pohybu a prepočítavať ju na kľbové premenné. Výpočet trajektórie sa môže robiť v procese činnosti robota alebo pred začiatkom činnosti. Základnou požiadavkou je, aby riadiace signály pre kľbové premenné boli generované v reálnom čase.

Systémy programového riadenia sú rôzne podľa spôsobu vytvorenia programu činnosti. Program sa môže vytvárať:

- predvádzaním - ovládaním pohybu robota z pultu,
 - ručným pohybovaním koncovým členom robota alebo modelu robota,
- zadávaním trajektórie alebo elementárnych operácií,
- nahratím odladeného programu získaného na inom robote alebo modelovaním na počítači.

Riadenie robota podľa stavu vonkajšieho prostredia vyžaduje dokonalejší senzorový systém. Činnosť robota je obvykle riadená tak, že sa programové riadenie strieda s riadením na základe informácií zo snímačov prostredia. Systém sa adaptuje na zmeny vonkajšieho prostredia. Uvedené systémy nazývame systémami s kombinovaným riadením. Pri programovom riadení sa využíva apriórna informácia o prostredí a pri riadení podľa stavu vonkajšieho prostredia sa využíva informácia zo snímačov prostredia.

V oblasti riadenia činnosti robota sú zavedené nasledujúce pojmy:

- riadiaci program priemyselného robota - súhrn inštrukcií, určujúcich zadanú činnosť priemyselného robota (vo všeobecnom prípade súčinnosť robota s obsluhovaným technologickým zariadením),
- adaptívne riadenie priemyselného robota - riadenie výkonného zariadenia priemyselného robota v závislosti od kontrolovaných parametrov stavu vonkajšieho prostredia a robota s automatickou zmenou riadiaceho programu,
- programovanie priemyselného robota - proces zostavenia, vstupu a odladenia riadiaceho programu priemyselného robota,
- analytické programovanie priemyselného robota - programovanie, pri ktorom sa riadiaci program zostavuje na základe výpočtu a potom sa zapisuje do riadiaceho systému,
- učenie priemyselného robota - programovanie priemyselného robota, pri ktorom sa zostavenie a záznam riadiaceho programu uskutočňuje operátorom pomocou predbežného pohybu pracovného orgánu po želanej trajektórii so záznamom hodnôt parametrov tohto pohybu do riadiaceho systému v tvare riadiaceho programu,
- vykonávanie riadiaceho programu priemyselného robota - činnosť výkonného zariadenia priemyselného robota v súlade so zadaným riadiacim programom.

9.3 Účasť operátora na riadení

Operátor môže zasahovať do riadenia robota na rôznych úrovniach riadiaceho systému. Pri práci s robotom na najnižších úrovniach je práca pre operátora najzložitejšia. Riadiaci systém je jednoduchý alebo nepracuje vôbec, preto operátor riadi robot na základe informácie o prostredí, ktoré sám získal. Operátor zabezpečuje, aby sa nedosiahli obmedzenia pohybu a pod. Pri práci s vyššími riadiacimi úrovňami sa využívajú aj informácie od senzorového systému. Vzhľadom na to, že pracujú podradené úrovne, funguje aj ochranný systém robota pred preťažením, nárazom na prekážku atď.

V automatických režimoch činnosti sa operátor zúčastňuje na činnosti robota len mimo pracovného cyklu robota. Operátor zabezpečuje učenie robota, programovanie robota, zadávanie cieľov... V týchto režimoch ide o riadenie na najnižších úrovniach.

V automatizovaných systémoch sa operátor zúčastňuje na riadení v pracovnom cykle. Pri zasahovaní na najnižšej úrovni ide obvykle o riadenie pri haváriách. Pri riadení s použitím vyšších úrovní riadenie môže ísť o využitie senzorov operátora (pri málo rozvinutom senzorovom systéme robota) alebo o vytvorenie novej úrovne riadenia nad automatickým systémom s cieľom realizovať vysoko inteligentný systém. Posledné dva prípady reprezentujú supervízorové riadenie. Robot pracuje pod dohľadom operátora. Operátor zasahuje do tých činností, ktoré nemožno (alebo je veľmi prácne) naprogramovať. V tomto režime je možné aj učenie, vytváranie programov, ktoré zabezpečia vykonávanie činnosti podľa prvého predvedenia.

9.4 Skupinové riadenie robotov

Skupinové riadenie musí riešiť úlohy:

- paralelného plnenia úloh niekoľkými robotmi v reálnom čase,
- vzájomnej zámene robotov a riadiacich prostriedkov pri rozdeľovaní záťaže na technologické vybavenie, roboty a riadiace systémy,
- súčasnej práce robotov, technologického vybavenia a prostriedkov riadenia pri plnení funkčne rôznych úloh,
- invariantnosti štruktúry systému skupinového riadenia vo vzťahu k zmenám alebo modifikáciám technologického objektu a procesu v dostatočne širokých hraniciach,
- zvýšenia spoľahlivosti systému za cenu jednoduchosti rezervovania a vykonávania opráv bez zastavenia procesu,
- možnosti rozšírenia systému bez narušenia jeho pracovnej schopnosti,
- zlacnenia a zjednodušenia robotov a výpočtových prostriedkov pri multimikropočítačovom riadení robotov.

Základnou požiadavkou bezpečnej činnosti je dodržať časové a priestorové ohraničenia na pohyby robotov a manipulátorov, ktoré majú spoločné časti pracovnej zóny.

Najjednoduchším riadením je **autonómne riadenie skupiny robotov**. Vtedy každý robot pracuje autonómne, jeho činnosť nie je ani priestorovo ani časovo zviazaná s druhým

robotom. Príkladom môže byť riadenie skupiny robotov, ktoré obsluhujú technologické zariadenia, ktoré nie sú navzájom technologicky spojené.

Druhým variantom je riadenie skupiny robotov so vzájomnými väzbami v činnosti. V jednoduchšom prípade môže ísť o určenie postupnosti vykonávania operácií jednotlivými robotmi. Zložitejšie je zabezpečiť paralelnú synchronizovanú činnosť robotov.

Vyskytujú sa úlohy, ktoré vyžadujú súčasnú prácu robotov v technologickom procese. Môže ísť pritom o súčinnosť podľa nasledujúcich podmienok: nie sú stanovené podmienky na vzájomnú polohu robotov, sú stanovené ohraničenia na pomerné súradnice a sú stanovené ohraničenie tým, že roboty pracujú so spoločným predmetom. V prípade určenia ohraničení na vzájomný pohyb môže ísť o časové a priestorové presné určenie trajektórie pohybu robotov (napr. pri prenose predmetu dvoma robotmi) aj s doplňujúcimi podmienkami o sile.

Systémy s udaním ohraničení vzťahných súradníc sú napr. pri montáži, keď treba dosiahnuť súčinnosť dvoch robotov.

Pri súčinnosti dvoch a viacerých robotov môže ísť o režimy práce:

- kvaziautonómny,
- hierarchickej závislosti,
- rovnoprávnej dynamickej činnosti.

V **kvaziautonómnom režime** sa riadenie uskutočňuje tak, že sa vyberú operácie, ktoré môže vykonať jeden robot pri uvážení ohraničení v čase a priestore, aby sa roboty nestretli v pracovnom priestore.

Pri **hierarchickej závislosti** sa jeden robot stáva vedúci a druhý robot operatívne prispôsobuje svoju činnosť jeho činnosti.

Pri **rovnoprávnej dynamickej činnosti** operatívne rešpektujú riadiace systémy robotov pohyb druhých robotov pri vykonávaní želaných pohybov.

9.5 Kvalita riadenia pohybu robotov

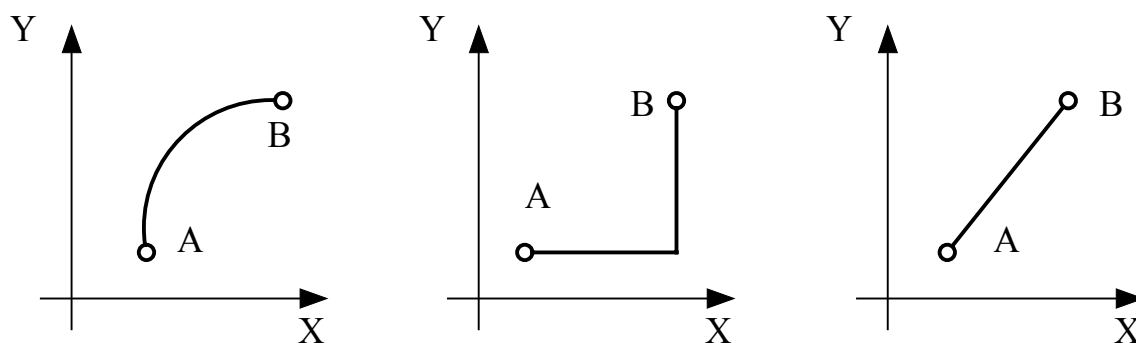
Kritériami kvality riadenia robotov sú:

- presnosť vykonávania riadiacich príkazov,
- opakovateľnosť pohybov,
- dynamika pohybov.

Presnosť vykonania príkazov je závislá od vlastností riadiaceho systému, ale aj výkonného systému, typu kinematickej schémy, hmotnosti, výkonu motorov, senzorového systému ... Presnosť polohovania je charakterizovaná absolútnou a pomernou chybou.

Opakovateľnosť pohybov závisí od odolnosti riadiaceho systému proti pôsobeniu porúch a od vlastností výkonného a senzorového systému.

Dynamika pohybov závisí od vlastností riadiaceho systému a od vlastností výkonného systému.



Obr. 9.1 Riadenie pohybu v rovine

Pohyb v priestore sa vo všeobecnosti môže dosiahnuť bodovým alebo dráhovým riadením.

Pri **bodovom riadení** ide o:

- stavenie súradníc, keď sa z bodu A do bodu B prejde po rôznej dráhe podľa dynamických možností každej súradnice (obr. 9.1a),
- s pravouhlým riadením, keď sa pohyb uskutočňuje vždy len v jednej súradnici rýchlosť pohybu je riadená (obr. 9.1b).

Pri **bodovom riadení** (PTP - Point To point) sa zadávajú dva alebo niekoľko bodov dráhy. Zadáva sa konečná poloha jednotlivých mechanizmov v každom kroku programu, t.j. body pracovnej zóny, cez ktoré musí prejsť daný bod robota. Pohyb medzi bodmi sa neriadi, prípadne sa zadajú len koncové body pohybu (cyklové riadenie).

Pri **súvislom riadení** sú pohyby riadené po všeobecnej dráhe, pričom pohyb je zložený z úsekov elementárnych kriviek (CP - Continuous Path). Dráha pohybu aj s rýchlosťou, prípadne zrýchlením je definovaná pre každý časový okamih. Servosystémy sú preto navrhnuté tak, aby umožňovali merať potrebné derivácie polohy. Príklad prechodu z bodu A do B pri dráhovom riadení je na obr. 9.1c.

Generované riadiace príkazy môžu byť spracované otvorenými alebo uzavretými systémami. V prvom prípade ide o systémy, v ktorých neexistuje žiadna vonkajšia spätná väzba (napr. systémy s krokovými motormi). Riadiaci systém generuje prírastky dráhy. Presnosť ich vykonania je závislá od presnosti mechanického reťazca a odolnosti systému proti pôsobeniu porúch na elektrickú časť systému.

Iným variantom sú systémy s pretržitou spätnou väzbou. Spätná väzba sa uzatvára len v určitom mieste dráhy, napr. po dosiahnutí koncového bodu pohybu.

Uzavreté systémy používajú spojité alebo diskkrétne snímače polohy a jej derivácii.

Definované je:

- dráhové riadenie - riadenie výkonného zariadenia priemyselného robota, pri ktorom pohyb pracovného orgánu sa vykonáva po zadanej trajektórii so stanoveným časovým rozložením hodnôt rýchlosti,
- bodové riadenie - riadenie výkonného zariadenia priemyselného robota, pri ktorom pohyb pracovného orgánu PR sa uskutočňuje podľa zadáných bodov polohovania bez kontroly trajektórie pohybu medzi nimi.

Pevné programy sú charakteristické pre roboty prvej generácie. Existencia meracieho systému umožňuje určité prispôsobenie v robotoch druhej generácie. Možnosť chápania, rozpoznávania okolia, zostrojenia modelu, prijatie riešenia na zmenu chovania pri vykonávaní zadania je pri robotoch tretej generácie

10. RIADIACE SYSTÉMY GENERÁCIÍ ROBOTOV

V etape rozvoja robotiky sa menila súčiastková základňa, štruktúra systémov robota, a tým aj funkcie a možnosti robotov. Podľa technickej úrovne systémov hovoríme o troch generáciách robotov a tomu zodpovedajúcich riadiacich systémov.

10.1 Riadenie robotov prvej generácie

Roboty prvej generácie sú s programovým riadením. Sú určené na vykonávanie pevného sledu operácií, ktorých poradie je určené technologickým procesom. Riadenie vychádza z dodržania nepremenných podmienok činnosti robota. Riadiaci systém pritom umožňuje pomerne jednoducho zmeniť program činnosti, zabezpečiť univerzálnosť činnosti robotov, a tým ich použitie pre rozličné úlohy v hraniciach možnosti daného technického riešenia.

Priemyselné roboty prvej generácie sa používajú na obsluhu obrábacích strojov (predovšetkým s číslicovým riadením), pecí, lisov, technologických liniek, zvaracích zariadení, lejacích strojov. Umožňujú realizovať: polohovanie, prenášanie, balenie predmetov, najjednoduchšie montážne práce, zvaranie, kovanie, liatie pod tlakom, tepelné a mechanické spracovanie. Tieto roboty sa používajú predovšetkým v strojárstve, metalurgii a jadrovej energetike.

Použitie robotov je obmedzené tým, že merací systém nezabezpečuje informácie o vlastnostiach vonkajšieho prostredia. Roboty majú málo rozvinutý senzorový systém, a preto pracujú podľa zadaného programu. Ich pracovné prostredie musí byť pevne usporiadané. Aj malá zmena v prostredí môže viesť nielen k zníženiu kvality práce, ale aj k vylúčeniu možnosti pracovať, prípadne k zničeniu robota alebo zariadenia, s ktorým robot pracuje.

Napriek uvedenému obmedzeniu sú roboty prvej generácie výhodnejšie ako systémy pevnej automatizácie tým, že umožňujú veľa rôznych pohybov a rýchle preprogramovanie na nový typ úloh. Aj špecializované roboty sú pre danú skupinu technológií univerzálne vzhľadom na už prv uvedené vlastnosti.

Roboty prvej generácie obsahujú výkonný, merací a riadiaci systém. Vo všeobecnej schéme robota ide o realizáciu reflexnej slučky (obr. 2.1). Výkonný systém je tvorený kinematickou schémou a pohonnými systémami (najčastejšie hydraulickými a pneumatickými, v poslednom čase sa zvyšuje počet robotov s elektrickými servosystémami). V meracom systéme sú použité snímače vnútornej informácie na určenie skutočného pohybu výkonného systému a činnosti jednotlivých podsystémov. Program činnosti robota je uložený v pamäti. Objem pamäti je určený rozsahom a zložitou vykonávaných pohybov, ako aj technickým a programovým vybavením riadiaceho systému. Program činnosti môže byť uložený na disku alebo v statickej pamäti. V niektorých systémoch sú riešené otázky komprimácie údajov a spätnej rekonštrukcie riadiacich príkazov.

Použitie robotov prvej generácie vyžaduje značné technické a technologické zmeny v technologických úsekoch, nové technologické okolie, preškolenie obsluhy atď. Je to. vyvolané predovšetkým tým, že roboty pracujú s pevným programom, nemajú schopnosť adaptácie.

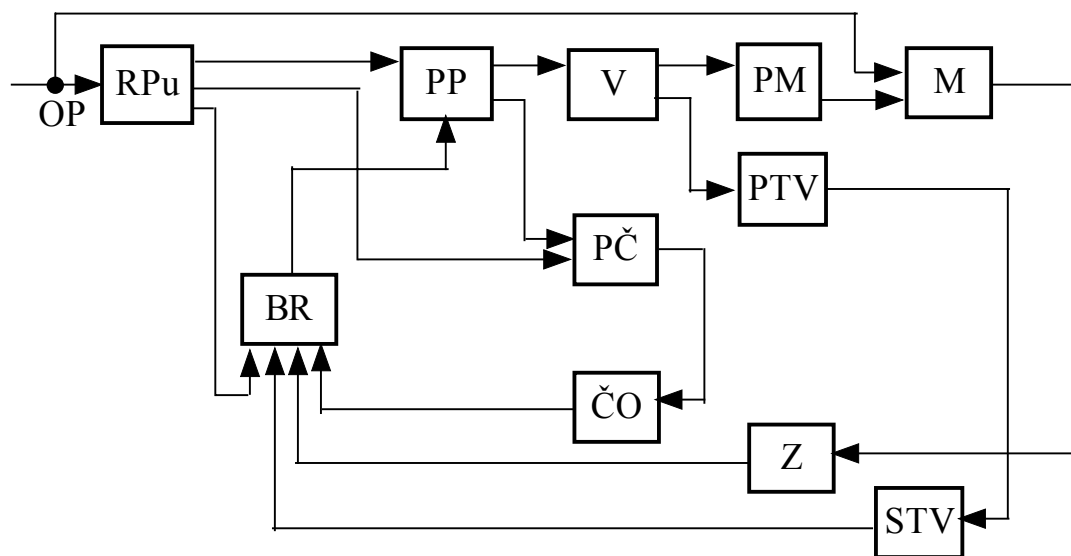
Riadiaci systém robota prvej generácie musí mať schopnosť:

Všeobecná schéma riadenia robota je na obr. 10.1. Pre jednotlivé aplikácie a konkrétne použité elementy sa schéma modifikuje. Na obr. 10.1 je označené: OP - vstup od operátora, ZZ - zadávacie zariadenie. Pa - pamäť. SS - spájací systém, RS- riadiaci systém, ZO - zobrazovací systém, SSM - servosystémy manipulátora, M - manipulátor, SM -snímače na manipulátore, SSP - servosystém pojazdu robota, PR - pojazd robota, SP - snímače pojazdu robota, VVTV - vonkajšie vybavenie a technologické vybavenie.

Činnosť jednotlivých blokov je zrejmá z blokovej schémy. Prostredníctvom zadávacieho zariadenia sa zadáva trajektória pohybu manipulátora, ako aj pohyb robota. Najdôležitejšiu úlohu má riadiaci systém RS. V ňom sa realizujú algoritmy riadenia, ktoré zabezpečujú vykonanie programovaných pohybov so zadanou kvalitou, synchronizuje sa práca všetkých podsystémov robota spolu s vonkajším vybavením, robí sa kontrola stavu systému, vytvára sa informácia pre zobrazovaciu jednotku.

V nasledujúcom sú uvedené základné schémy systémov s diskretným meracím zariadením, s bodovým riadením so spojitými a diskretnými pohonnými jednotkami a so spojitým riadením.

Bloková schéma systému so záležkami je na obr.10.2, kde je označené: OP - operátor, RPu - riadiaci pult, PP - pamäť postupnosti, V - vypínače, PM - pohony manipulátora, M - manipulátor, PČ - pamäť času, ČO - časovací obvod, BR - blok riadenia, Z - záležky, PTV - pohony technologického vybavenia, STV - snímače technologického vybavenia.



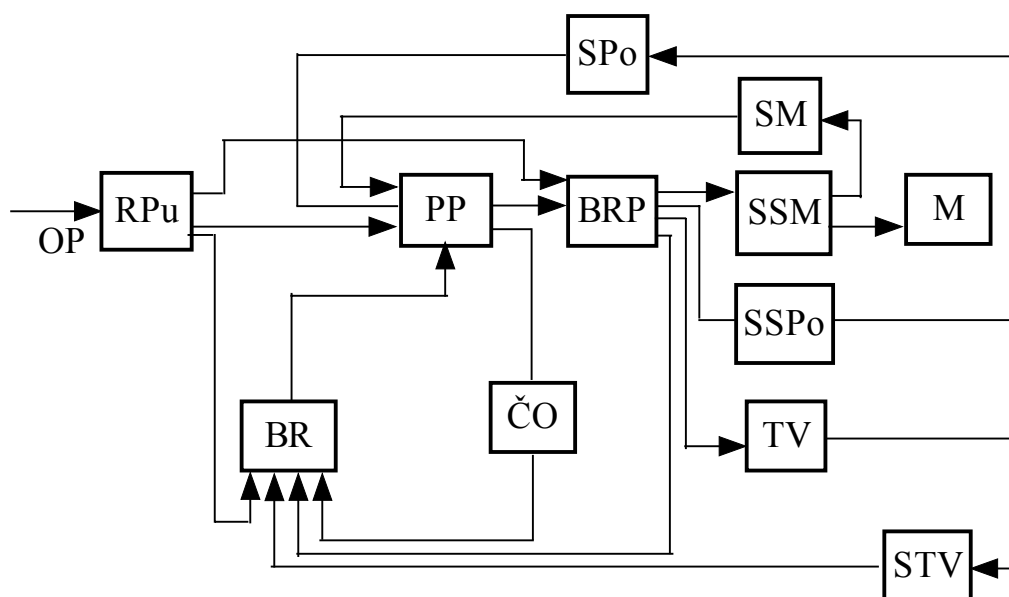
Obr.10.2. Bloková schéma systému so záležkami

Informácia o polohe koncových bodov pohybu (prípadne aj iných význačných bodov) je v systéme zakódovaná polohou záležok. Motory sú riadené len v režime zapnuté - vypnuté. Všetky informácie môžu byť vyjadrené v diskretnnej forme. Pamäti a všetky elementy schémy môžu pracovať diskretné. Program činnosti je vytvorený polohou záležok, postupnosťou činností a časom vykonávania určitej činnosti. Postupnosť a čas sa zadáva z riadiaceho pultu, poloha záležok sa v danom systéme predstavuje mechanicky, ale možno vytvoriť záležkový systém aj s elektronickým nastavovaním záležok.

Ďalšie rozšírenie možnosti použitia uvedených systémov viedlo k zložitejším kinematickým štruktúram a stúpli aj nároky na riadenie. Rozpracovalo sa:

- zväčšenie počtu medziľahlých bodov na danej súradnici,
- koordinácia riadenia posuvných zarážok,
- realizácia algoritmov brzdenia pri priblížení k zarážke,
- zväčšenie počtu technologických príkazov,
- organizácia technologických programov s premenlivou postupnosťou blokov, vetvenie, podprogramy, lokálne cykly,
- rozvinutie systémov havarijného blokovania,
- zväčšenie funkčnej kapacity pamäti.

Modifikácia riadiaceho systému pre PTP riadenie je na obr.10.3. Na riadiacom pulte sa zadávajú režimy práce a zobrazuje sa stav robota a riadiaceho zariadenia. Blok riadenia polohy (BRP) riadi servosystémy (SSM) a technologické vybavenie (TV). Blok riadenia (BR) kontroluje ukončenie jedného kroku programu, uchováva číslo kroku a dáva požiadavku na ďalší krok programu. Časovací obvod (ČO) generuje časové intervaly na vykonanie častí programu. Program sa zavádza do robota riadením z pultu (RPu). Má definovanú štruktúru. Obsahuje bloky informácie o poloha, čase na vykonávanie pohybu a postupnosti činností.



Obr.10.3. Bloková schéma PTP riadenia

Postupnosť výstupu informácie je zaprogramovaná. Existuje však možnosť pevnej postupnosti alebo so zmenou postupnosti podľa vnútornej alebo vonkajšej informácie (podmienok).

Vnútorne podmienky sa obvykle zadávajú z riadiaceho pultu, alebo sa zapisujú do pamäti. Takéto riadenie umožňuje napr. mnohonásobné opakovanie časti programu, zmenu jednotlivých príkazov programu v závislosti od čísla vykonávaného cyklu a pod. Práca aj s

týmto systémom je podľa pevného programu, lebo v procese vykonávania programu sa podmienky nemenia. Typickým príkladom je ukladanie tovaru do zásobníka s pridelením miesta. Poloha chápadla sa mení v každom cykle, program činnosti sa mení podľa vnútorných podmienok.

Informácia o vonkajších podmienkach sa týka chodu technologického procesu a umožňuje v procese činnosti prejsť na iný program:

- vykonať alebo vynechať časti programu,
- zmeniť príkazy programu,
- prejsť na činnosť s uvažovaním vnútorných podmienok a pod.

Využitie informácií o vonkajších podmienkach umožňuje systému pružne reagovať na zmeny v technologickom procese, ktoré boli vopred predpokladané.

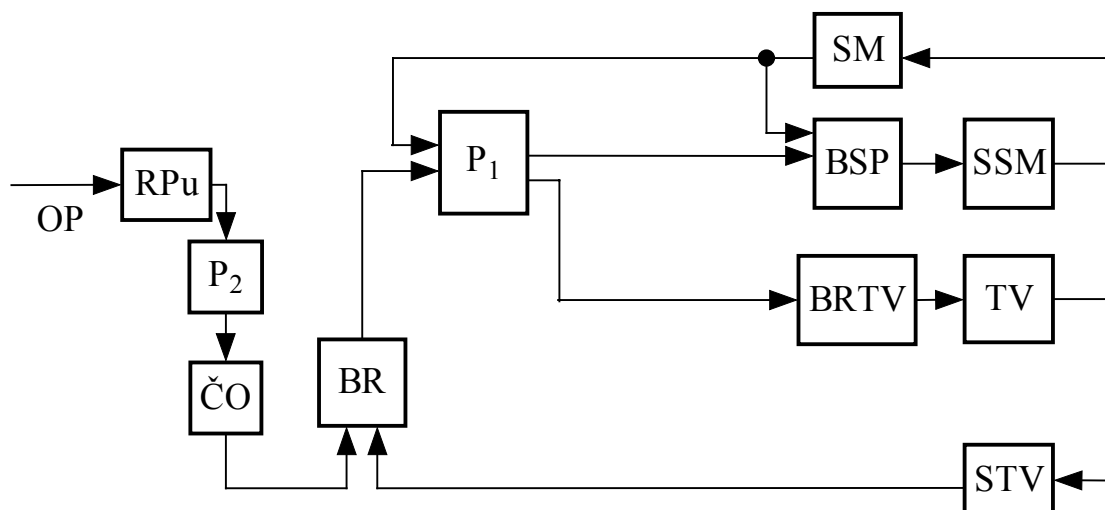
Blok riadenia môže rozhodnúť o ukončení kroku programu na základe:

- signálov zo snímačov,
- informácie o čase,
- signálov zo snímačov a informácie o čase.

V prvom prípade sa vykonanie príkazu potvrdí signálom zo snímača alebo z bloku riadenia polohy. V druhom prípade sa odmeria vyžadovaný čas pre daný krok a po uplynutí predpísaného času sa vydá príkaz vykonať ďalší krok programu. V treťom prípade sa kontroluje príchod predpokladaného signálu zo snímačov do stanoveného času. Z hľadiska kontroly skutočne vykonanej činnosti treba používať prvý a tretí spôsob. Výhodou tretieho spôsobu je, že sa súčasne vykonáva kontrola činnosti členov obvodu, čo umožňuje včas zistiť závady v systéme.

V systémoch súvislého riadenia existujú dve alternatívy realizácie systému:

- zápis spojitej trajektórie,
- zápis konečného počtu bodov a použitie interpolátora.

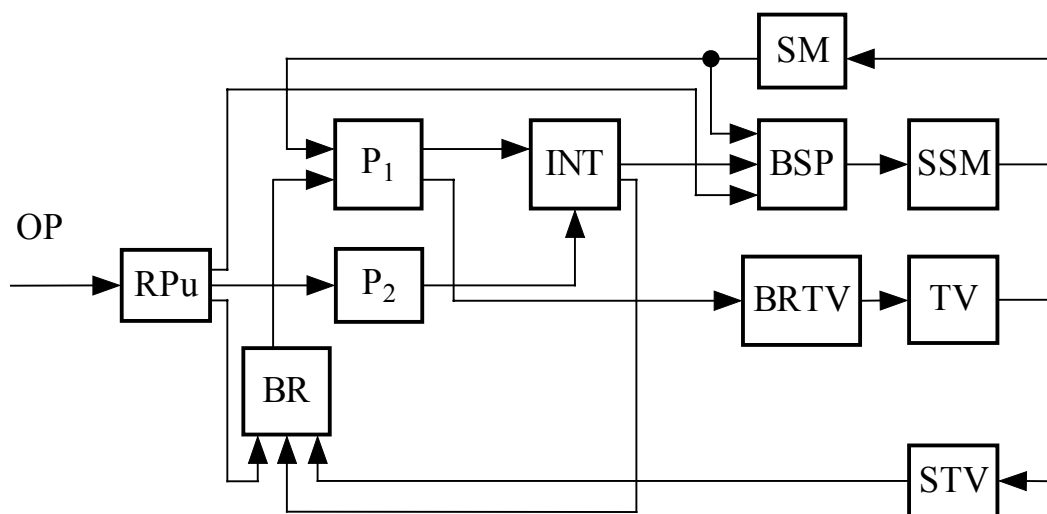


Obr.10.4. Bloková schéma systému so spojitým zápisom trajektórie

Vzhľadom na číslcový spôsob zápisu informácii v pamäti riadiaceho systému sa zaznamenávajú informácie o trajektórii len v konečnom počte bodov. Ich počet je však vysoký a body sú na trajektórii blízko vedľa seba, preto zápis možno pokladať za spojitý v porovnaní so zápisom význačných bodov dráhy a použitím interpolátora.

Bloková schéma riadiaceho systému so spojitým zápisom trajektórie je na obr. 10.4. V uvedenom systéme sa program vytvorí prvým predvádzaním operátorom, pričom môže ísť o systém, v ktorom pohyb zabezpečuje operátor, prípadne o systém, v ktorom operátor využíva senzorový systém robota (snímače sily na chápadle) na riadenie smeru a veľkosti pohybu pomocou .servosystémov, prípadne o systém, v ktorom sa program vytvára pomocou modelu kinematickej schémy robota.

Informácia o činnosti je uložená v pamäti P_1 (postupnosť, poloha, čas). V pamäti P_2 sa môže uložiť informácia o časovej transformácii činnosti robota. Vo všeobecnosti sa predpokladá, že sa celá činnosť robota zrýchli alebo spomalí pre všetky činnosti prostredníctvom časovacieho obvodu ČO. Vzájomné časové relácie v režime činnosti sú uložené spolu s postupnosťami a polohami v pamäti programu. Z uvedeného vyplýva, že v danom systéme nemožno vykonávať žiadnu zmenu programu, prípadne zmeniť činnosť podľa vonkajších alebo vnútorných podmienok. Pre každú zmenu činnosti treba vytvoriť nový program. Výhodou opísaného systému je presný záznam trajektórie pohybu aj so záznamom rýchlosti pohybu v jednotlivých fázach činnosti. Uvedené systémy sa používajú predovšetkým v robotoch pre povrchové úpravy výrobkov.



Obr.10.5. Bloková schéma s interpolátorom

Rozsah pamäti potrebný na záznam programu sa výrazne zníži použitím interpolácie na výpočet bodov a záznamom obmedzeného počtu bodov trajektórie. Príklad blokovej schémy je na obr. 10.5, kde v pamäti P_1 je uložená informácia o postupnosti a polohe a v pamäti P_2 informácia o čase.

V programovom riadení sa presadzuje používanie mini- a mikropočítačov. Takéto riadiace systémy môžu plniť zložitejšie úlohy. Systémy sú pružnejšie, ľahko programovateľné, majú doplnkové možnosti spojenia operátora s robotom v dialógovom režime. Počítač plní nasledujúce funkcie:

- v etape predvádzania (učenia) počítač vykonáva spojenie medzi operátorom a robotom, formuje a robí redukciu dát o pohybe,

- v etape vykonávania programu robí potrebné výpočty a generuje radiace signály na pohony.

Zadávacím členom pre komunikáciu operátora s robotom môže byť displej alebo funkčný pult pre určitú aplikáciu. V blokovej schéme riadiaceho systému sú len bloky: zadávací člen, riadiaci počítač, jednotka styku s prostredím.

V závislosti od zaradenia počítača do obvodu regulácie pohonov sú možné nasledujúce alternatívy:

- počítač je len programovým zariadením na vydávanie informácie o želanom pohybe systému; počítač nie je v uzavretom obvode; programové vybavenie je jednoduché, nedostatkom však je, že počítač nemá informácie o činnosti systému a plnení úloh;

- počítač je v uzavretej regulačnej slučke, vstupujú doň informácie o stave robota, riadený systém má svoju vlastnú spätnú väzbu;

- počítač vytvára hlavnú polohovú väzbu, riadi rýchlostný servosystém. Zaťaženie počítača je vysoké;

- vytvára sa hierarchický systém, v ktorom je poloha a iné veličiny regulované mikropočítačom a celý systém je riadený nadradeným počítačom.

Systém programového riadenia môže byť predstavený ako konečný automat. Tento prístup umožňuje:

- získať kvalitné programové vybavenie robotizovaného systému,

- zabezpečiť efektívnu realizáciu jazyka na učenie a riadenie,

- efektívne a ekonomicky (vo vzťahu k rýchlosti a objemu zaberanej pamäti) realizovať programové vybavenie.

Štruktúra systémov riadenia priemyselných robotov a technologického vybavenia je určená predovšetkým úlohami automatizácie konkrétnej výroby, ktoré sú opísané technologickými programami riadenia robota a celého systému s rôznymi úrovňami. Obvykle sa na nízkych úrovniach používajú pevné prostriedky automatizácie s technickou realizáciou algoritmov a na vyšších úrovniach univerzálne programovateľné systémy. Jednoduché systémy je vhodné realizovať s cyklovým riadením. Môžu sa vyznačovať jednoduchosťou, spoľahlivosťou a presnosťou.

V súčasnosti sa kladie dôraz na unifikáciu riadiacich systémov na báze mikropočítačov s rozvíjaním programového vybavenia a problémovo orientovaných modulov spojenia s objektom. Preto je vhodné rozvíjať princípy štruktúrno - algoritmického orientovania prostriedkov riadenia v nasledujúcich smeroch:

- problémovo orientovaná unifikácia technického a programového zabezpečenia základných prostriedkov programového riadenia,

- modulová štruktúra technických prostriedkov, zabezpečujúca najefektívnejšie spojenie potrebných modulov do modifikovaných schém, a tým spojená zbernicová organizácia unifikovaných medzimodulových väzieb,

- používanie programovateľných prostriedkov, umožňujúcich pružné spojenie riadiaceho systému s objektom,

- použitie unifikovaných konštrukcií.

10.2 Riadenie robotov druhej generácie

Roboty prvej generácie musia mať špeciálne organizovaný pracovný priestor. Obísť to možno len použitím snímačov, ktoré poskytujú riadiacemu systému robota informáciu o stave robota a okolia. Riadiaci systém musí obsahovať riadiaci počítač. Roboty môžu pracovať s neorientovanými predmetmi ľubovoľného tvaru, vykonávať potrebnú činnosť v meniacom sa prostredí. V systéme sa používajú snímače vnútornej a vonkajšej informácie. V každom okamihu je známy odklon medzi skutočným a programovaným pohybom.

Riadiaci systém rieši dve úlohy:

- prvotné spracovanie a analýzu informácií idúcich zo snímačov,
- vytvorenie riadiacich signálov pre výkonný systém.

V riadiacom systéme sa vytvárajú tri úrovne riadenia. Na najvyššej úrovni sa analyzuje situácia so zámerom určiť, do akej triedy patrí práve prebiehajúca situácia nasnímaná snímačmi. Tu prebieha plánovanie činnosti a výber činnosti zodpovedajúcej danej triede situácii.

Na strednej úrovni sa vytvára programový zákon zmeny zovšeobecnených súradníc výkonných mechanizmov s uvažovaním ohraňovania a podmienok.

Na najnižšej úrovni sa formuje zákon riadenia pohonov, ktoré zabezpečujú vykonanie programovaného pohybu.

Podprogramy na priradenie - trieda situácii - činnosť - sú základom pre prácu najvyššej a strednej úrovne riadenia.

Používané pojmy označujú:

- **situácia** - súbor hodnôt signálov na vstupe senzorového systému
- **trieda situácii** - množina situácii, ktorá má vlastnosť, že všetky priebežné situácie z triedy vyžadujú rovnakú činnosť,
- **adekvátne činnosť** - činnosť zodpovedajúca danej situácii.

Spojenie trieda situácii - činnosť sa môže vytvoriť vopred a uložiť do pamäti alebo sa môže vytvoriť v režime predvádzania.

Opísaný systém pripomína systém podmienených reflexov. Časť signálov zo snímačov možno pokladať za nepodmienené vzruchy (napr. signál o existencii cieľového objektu, s ktorým sa má pracovať) a časť za podmienené vzruchy (napr. určité farebné alebo zvukové signály). V režime učenia sa konkrétnemu pôsobeniu nepodmienených a podmienených vzruchov priradí určitá činnosť. Tak sa vytvorí spojenie trieda situácii - činnosť. Robot je schopný učiť sa pomocou svojich snímačov.

Robot môže riešiť len tie úlohy, pre ktoré mal uložené podmienené alebo nepodmienené vzruchy (živočíchy sa môžu naučiť mnohým činnostiam pre ktoré neexistuje vopred trieda situácii - drezúra). Robot druhej generácie nevie iným spôsobom využiť informáciu len tak, ako je to naprogramované. Robot tejto generácie nevie riešiť intelektuálne úlohy, (úlohy, pre ktoré nemožno vopred zostaviť algoritmus riešenia, to znamená, že nemožno formovať spojenie trieda situácii - činnosť).

V súčasnosti sa najčastejšie realizujú roboty druhej generácie ako biotechnické roboty so supervízorovým riadením. Operátor je súčasťou riadiaceho systému. Získava informácie o

prostredí cez svoje senzory alebo prostredníctvom senzorov robota. Potom rozhoduje o ďalšej sekvencii činnosti.

Priemyselné roboty sú riadené:

- autonómny,
- komplexný,
- mnohoúrovňovými radiaciami systémami.

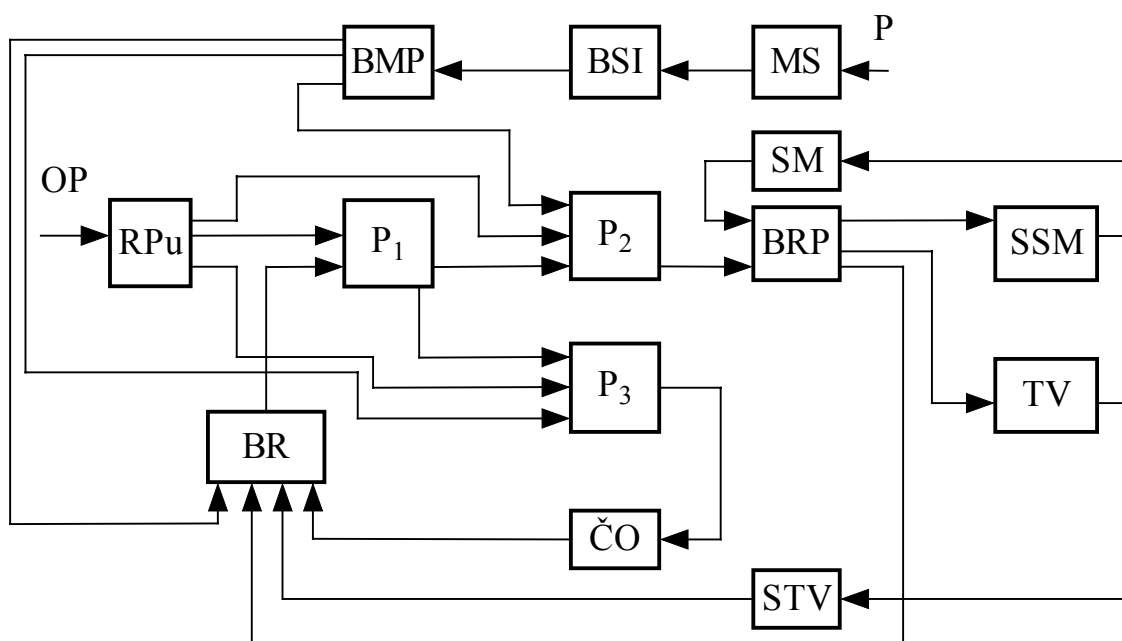
Autonómne roboty snímajú a analyzujú situáciu, automaticky zostavia plán operácií, určia programové pohyby a vykonajú ich realizáciu pomocou výkonného systému.

V autonómnych systémoch sa používajú špecializované radiacie systémy, ktoré sa od iných líšia:

- možnosťou programovania predvážaním,
- množstvom vstupno-výstupných kanálov pre spojenie s technickým vybavením,
- doplnkovými modulmi na meranie stavu mechanizmov a parametrov vonkajšieho prostredia,
- modulmi diagnostiky na kontrolu práce časti robota a technologického vybavenia,
- špecializovaným programovým vybavením. daným osobitosťami riadenia priemyselného robota (rýchlosť, rozsah pohybu, existencie cyklov).

Komplexné radiacie systémy sú určené na riadenie komplexu robot - technologické vybavenie.

Mnohoúrovňové radiacie systémy majú rôzne delenie úrovni. Každá úroveň má špecifické úlohy. Získajú sa tým predovšetkým lepšie odozvy na nižších úrovniach riadenia, možnosť realizovania rozsiahlejších a úplnejších algoritmov riadenia a pod.



Obr.10.6. Bloková schéma robota druhej generácie

Bloková schéma robota druhej generácie je na obr. 10.6, kde sú oproti schémam robotov prvej generácie ďalšie bloky BMP - blok modifikácie programu, BSI - blok spracovania informácie, MS - merací systém.

Program činnosti robota sa môže modifikovať na základe informácie o:

- polohy detailov v pracovnom priestore.
- informácii o časových charakteristikách procesu (napr. pri práci s pohyblivými detailmi)
- informácie o sile

Modifikácia programu môže byť v korekcii jednotlivých parametrov v závislosti od vonkajšej informácie, realizácie jednotlivých fragmentov programu riadenia technologického procesu vo forme priameho riadenia od vonkajších informácií a v postupnosti vykonávania programu.

Korekcia programu pri zmene parametrov je v zmene hodnôt súradníc, t.j. v zmene polohy, v zmene časových hodnôt, prípadne obidvoch. Modifikácia programu podľa polohy je nevyhnutná, napr. pri zmene polôh detailov s ktorými robot pracuje. Vtedy je úlohou senzorového systému a bloku predspracovania informácie určiť polohu detailov a zaniest ju do programu riadenia.

Adaptácia na proces sa môže meniť od jedného cyklu k druhému, ale môže sa vyžadovať aj v rámci jedného pracovného cyklu. Adaptáciu v riadení treba použiť aj pri známych trajektoriách, ak sa má dosiahnuť vysoká presnosť, vyššia ako možno dosiahnuť s vnútornými snímačmi robota. Príkladom môže byť použitie snímačov na chápadle, pri určení vzájomnej polohy chápadla a objektu, s ktorým robot pracuje.

Modifikácia programu v čase je v najjednoduchšom prípade len modifikáciou rýchlosti zbiehania programu (do tejto skupiny nepatria systémy, v ktorých je zabezpečené vzájomné blokovanie činnosti robota a technologického vybavenia).

Modifikácia programu v postupnosti vykonávania operácií sa uskutočňuje na základe informácií z prostredia. Príkladom môže byť prepnutie programov činnosti podľa informácie zo snímačov vonkajších informácií, napr. pri odstraňovaní otrepev z výliskov.

10.3 Riadenie robotov tretej generácie

Roboty tretej generácie sa nazývajú inteligentné, kognitívne alebo rozumné. Od robotov druhej generácie sa líšia zložitou a dokonalou riadiacou sústavou, ich riadiace programy obsahujú časti, ktoré zabezpečujú "inteligentné správanie sa" robota. Inteligentné roboty sú určené nielen na "imitáciu" činnosti človeka, ale na automatizáciu jeho intelektuálnej činnosti, t.j. riešenie intelektuálnych úloh.

Umelá inteligencia rieši celý rad problémov. Obvykle sa delia na oblasti:

- dokazovanie teorém,
- modely hier,
- rozpoznávanie obrazov,
- používanie prirodzeného jazyka v technických systémoch,
- robotika,
- expertné systémy,

- reprezentácia znalosti.

Okrem priamej súvislosti umelej, inteligencie a robotiky uvedenej v piatom bode existujú silné väzby prostredníctvom využívania postupov rozpracovaných aj v ostatných oblastiach.

V súčasnosti sa umelá inteligencia môže chápať ako systém, ktorý je schopný vykonávať tvorivú činnosť, ktorej výsledky nie sú horšie ako výsledky podobnej práce človeka. Dôležité pritom je:

- existuje model sveta, ktorý sa prispôsobuje zmenám,
- systém je všeobecný a pružný,
- systém je schopný plánovať svoju činnosť.

Aby systém mohol úspešne komunikovať so zložitým prostredím, musí mať širokú informačnú základňu a dostatočne presný vnútorný model sveta. Prospešnosť jednoduchého modelu sa výrazne zvýši, ak je možnosť korigovať parametre modelu, adaptovať ho na nové situácie. Takýto systém nielen registruje vlastnosti prostredia, ale aj koriguje svoje predstavy o prostredí a jeho vlastnostiach. Systém musí byť schopný využiť predchádzajúce skúsenosti v situáciách, ktoré sa podľa vonkajších príznakov nepodobajú predchádzajúcim. Systém by mal vedieť aplikovať metódy rozpracované pre riešenia jednej úlohy aj na riešenie inej úlohy. Systém má využiť model sveta na plánovanie a ohodnotenie alternatívnych stratégií činnosti prv, než prijme určité riešenie na realizáciu.

Existujú rôzne možnosti priradiť robotu so snímačmi určité elementy umelej inteligencie. Štruktúra a dokonalosť riadiaceho systému inteligentného robota je určená:

- technickými možnosťami realizácie potrebných elementov umelej inteligencie,
- obsahom a zložitosťou úloh, ktoré robot rieši.

Vo všeobecnosti je inteligentný robot schopný:

- rozumieť reči o viesť dialóg,
- formovať model vonkajšieho prostredia,
- rozoznávať a analyzovať zložité situácie,
- porozumieť informáciám,
- plánovať činnosť,
- generovať programy činnosti výkonného systému a zabezpečiť ich vykonanie pri neúplnej informácii o prostredí.

Roboty tretej generácie treba použiť vtedy, ak nemožno vopred predpokladať prácu robota podľa stavu prostredia. Nemožno vopred zostaviť napr. postupnosť činnosti. Nemožno zostaviť vzťahy situácia - činnosť.

Roboty môžu stanoviť nové postupnosti cieľov a činnosti v rôznych etapách činnosti. Nové ciele a činnosti vystupujú v úlohe „stimulov“ na ceste k cieľu pri tvorbe riešení. Môže ísť pritom napr. o pohyb robota medzi prekážkami, zostavenie postupu a vykonanie pohybu v zložitom prostredí.

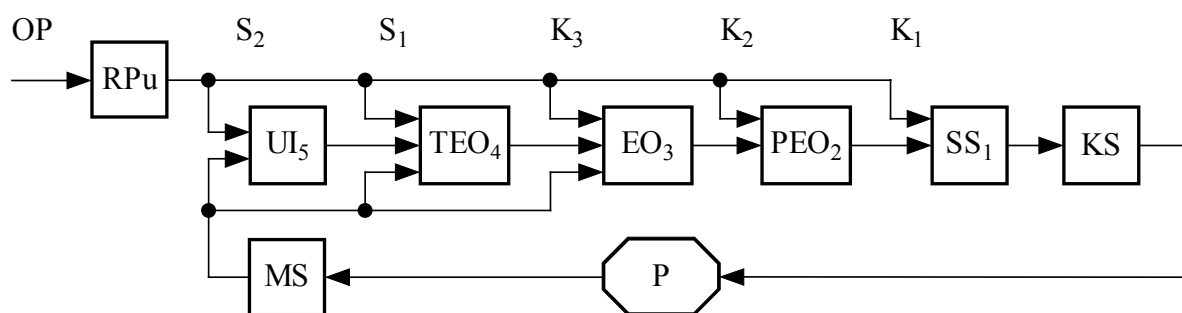
Rad charakteristík prostredia je vopred neznámy a môže sa v priebehu činnosti robota meniť. Napr. objekty v prostredí sa pohybujú, menia sa hmotnosti transportovaných častí, menia sa charakteristiky pracovného povrchu a pod. Niektoré parametre môžu byť určené experimentálne v procese činnosti. Nie vždy je to však možné, lebo nie vždy možno vykonať

experiment (napr. pre nebezpečenstvo poškodenia robota) a nie vždy možno určiť trend zmien (charakteristiky sa menia neznámym spôsobom v širokých medziach).

Z hľadiska konštrukcie robota hovoríme o apriórnej neurčitosti - rozsah možných zmien neznámych hodnôt parametrov robota a okolitého prostredia. Preto treba použiť adaptívne riadiace systémy s umelou inteligenciou, ktoré môžu pracovať v podmienkach nedourčenosti. Nedostatok apriórnych informácií sa kompenzuje spracovaním priebežnej informácie. Riadiace systémy s umelou inteligenciou musia byť usporiadané hierarchicky a musia byť adaptívne. Hierarchické usporiadanie je orientované predovšetkým na funkciu prijatia a spracovania informácie. Jeho použitie má viesť k zrýchleniu riadenia a zmenšeniu nedourčenosti.

Všeobecná bloková schéma riadiaceho systému robota tretej generácie je na obr.10.7. kde je označené: UI - blok pre realizáciu princípov umelej inteligencie, TEO - blok pre riadenie technologických operácií, EO - blok pre riadenie elementárnych operácií, PEO - blok pre programové riadenie elementárnych operácií, SS - blok riadenia servosystémov, KS - kinematická schéma, P - prostredie, MS - merací systém, S_1 - S_2 – supervízorove riadenie, K_1 - kopírujúce riadenie.

Najvyššia riadiaca úroveň je strategická, analyzuje ciele zadané operátorom, určuje postupnosť činností - plán činnosti, analyzuje informáciu.



Obr.10.7. Všeobecná bloková schéma robota tretej generácie

10.4 Programovanie robotov

Osobitosťou programového vybavenia pre roboty je, že súčasne sa musia riešiť nasledujúce úlohy:

- výpočet súradníc bodov polohovania,
- interpolácia,
- výpočet a vydávanie riadiacich signálov na pohony výkonného systému.

Tieto výpočtové postupy sú autonómne, ale majú spoločné dáta. Ak sa výpočty vykonávajú paralelne, treba uvažovať s vyrovnávacími pamäťami.

Pri programovaní robotov sa osobitná pozornosť venuje:

- spracovaniu dát zo snímačov,
- modelovaniu vonkajšieho prostredia,

- formovaniu pohybov,
- určeniu postupnosti pohybov a riadiacich činností.

Všetky súčasné systémy programovania sa delia do troch skupín:

- jednoduché systémy priameho riadenia, založené na učení robota predvádzaním,
- roboticky orientované jazyky programovania, zabezpečujúce zadanú činnosť konkrétneho robota s možnosťou priameho dostupu k snímačom,
- problémovo orientované programovacie systémy, ktoré umožňujú úlohu opísať v termínoch vyžadovaných cieľov činnosti robota nezávisle od technického vybavenia.

Programy radiaceho systému zabezpečujú:

- komunikáciu s operátorom,
- riadenie pohybu robota,
- spracovanie informácií z okolia.

Programové vybavenie obsahuje systémové programy a užívateľské programy. Systémové programy riadia činnosť programového vybavenia. Užívateľský program radiaceho systému pre roboty je určený sekvenciou pracovných operácií robota prebiehajúcich synchronizovane v rámci robotizovaného pracoviska. Okrem pohybových operácií robota treba vložiť aj informácie pre synchronizáciu činnosti s technologickým systémom. V užívateľskom programe musia byť aj operácie týkajúce sa vlastného programu.

Riadiaci systém musí zabezpečiť formovanie, editovanie a odladenie programov pohybu robota a tiež ich vykonávanie v krokovom a spojitom režime. Pri riadení robota je rozhodujúce, že programy musia zabezpečiť riadenie v reálnom čase.

Pri tvorbe programu sa môžu vyčleniť spoločné funkcie, využívané v každom programe ako podprogramy (reakcia na vonkajšie signály, výpočet riadiacich signálov pre servosystémy). Ďalej možno vyčleniť typové operácie, ktoré sú spoločné pre danú triedu úloh. Vhodné je vytvoriť ešte programy pre riadenie elementárnych pohybov robota, pomocou ktorých možno vytvárať typové operácie a spájať ich do technologických operácií (napr. pohyb do bodu, po trajektórii a pod.).

V predchádzajúcej časti bola opísaná všeobecná bloková schéma radiaceho systému robota. Z hľadiska tvorby programov plnia jednotlivé úrovne nasledujúce úlohy:

1. prvá úroveň:

- priame riadenie servosystémov,
- vytvorenie regulačnej slučky polohy, prípadne ďalších veličín,

2. druhá úroveň:

- výpočet riadiacich príkazov servosystémov,
- prepočet zo súradnicového systému sveta do súradnicového systému robota, výpočet trajektórií pohybu zadaných tabuľkou alebo analyticky,

obsahuje podbloky:

- program po dráhe,
- program do bodu,
- program uchopenia objektu,

- program prepočtu súradníc,
- program výpočtu riadiacich signálov servosystému,

3. tretia úroveň:

- jednoduchá adaptácia na zmeny podmienok pri vykonávaní elementárnych operácii, vopred sú pripravené podprogramy korekcie činnosti robota podľa vonkajších podmienok,

obsahuje bloky:

- vyhodnotenie vonkajších podmienok,
- blok organizácie postupnosti činnosti,
- blok korekčných podprogramov,

4. štvrtá úroveň:

- syntéza funkčne zakončených činností,
- predspracovanie informácia zo snímačov,
- rozklad úloh pre nižšie úrovne,

obsahuje bloky:

- blok pre spoluprácu s obsluhou v problémovo orientovanom jazyku,
- spracovanie informácií,
- rozdelenie úloh,

5. piata úroveň:

- najvšeobecnejšie úlohy,

obsahuje bloky

- analýzy zadania,
- rozoznávanie obrazov,
- zostrojenia modelu prostredia, korekcie modelu,
- plánovanie činnosti,
- výber riešenia.

Z uvedeného opisu je zrejmé, že programové vybavenie robota musí riešiť veľmi rozmanité úlohy s rôznym stupňom zložitosti.

V ďalšom sú uvedené niektoré základné otázky tvorby programov činnosti, generovania príkazov servosystémov, tvorby algoritmov riadenia, úlohy operačného systému a stručný opis princípov niektorých jazykov programovania robotov.

10.5 Plánovanie trajektórie pohybu robota

Nelineárne algoritmy riadenia pohybu manipulátora sú základom plánovania pohybu a využívajú riešenie priamej a spätnej úlohy o polohe výkonného mechanizmu robota.

Druhou úlohou je plánovanie typových elementárnych pohybov výkonného mechanizmu, ktoré tvoria základ technologických operácií. Ľubovoľná zložitá trajektóra môže byť zložená z typových elementárnych pohybov.

Priama úloha o polohe mechanizmu určuje polohu a orientáciu chápadla na základe znalosti vzájomných pohybov jednotlivých členov kinematickej schémy. Úloha je riešená vzťahom pomocou ktorého možno určiť súradnice koncového bodu robota v súradnicovom systéme spojenom so základňou.

Riešením spätnej úlohy sa určujú zovšeobecnené premenné pri známom vektore udávajúcom polohu koncového člena robota. V tomto prípade treba riešiť systém nelineárnych algebrických rovníc, ktoré vyplývajú zo vzťahu pre priamu kinematickú úlohu. Východiskový súbor obsahuje obvykle 6 neznámych vzhľadom na to, že na určenie polohy je potrebných 6 parametrov. Šesť stupňov voľnosti je aj nevyhnutnou podmienkou na dosiahnutie želaného bodu so želanou orientáciou chápadla.

Pri systémoch s väčším počtom stupňov voľnosti je vhodné zaviesť doplnujúce podmienky.

Informácia o polohe a orientácii členov je najprv úplne známa pre koncový člen. Je úsilím určiť charakteristické polohy a orientácie členov pre najväčší možný počet členov kinematickej schémy. Vektory charakterizujúce polohu koncového člena v súradnicových systémoch členov sa vypočítavajú postupne pre členy smerom od koncového člena. Výsledok riešenia spätnej úlohy je graf, ktorého každá vetva zodpovedá určitej konfigurácii kinematickej schémy.

Plánovanie trajektórie sa vyžaduje aj pre najjednoduchšie pohyby. Napr. pri premiestnení predmetu na pracovnom stole z miesta A do B treba riešiť tieto úlohy: ako uchopiť predmet, po akej trajektórii ho premiestniť a ako ho umiestiť v želanej polohe. V dôsledku ohraničení často nemožno operáciu vykonať naraz, ale treba napr. odložiť predmet a znova ho uchopiť iným spôsobom a pod.

Plánovanie takých činností sa uskutočňuje na základe heuristik s kontrolou jeho realizovateľnosti modelovaním na počítači. Na začiatku sa rieši úloha o polohe chápadla pri uchopení predmetu. Model prostredia v pamäti riadiaceho systému musí obsahovať informáciu o možných spôsoboch uchopenia predmetu. Pri uchopovaní predmetu treba zabezpečiť, aby sa predmet uchopil tak, aby nevznikli sily, ktoré by mohli spôsobiť zmenu polohy predmetu v chápadle (určenie ťažiska).

Činnosť robota je možné rozdeliť na jednotlivé elementárne operácie a technologické operácie..

Algoritmus uchopenia predmetu pre roboty s jednoduchým senzorovým systémom môže byť takýto:

- 1 - určiť súradnice ťažiska telesa,
- 2 - určiť trajektóriu robota v pravouhlých a potom robotických súradniciach,
- 3 - vykonať pohyb,
- 4 - otvoriť chápadlo,
- 5 - spúšťať chápadlo,
- 6 - rozhodnúť, či je teleso v chápadle; N - prechod na 10,
- 7 - uzavretie chápadla,
- 8 - prenesenie predmetu,
- 9 - prechod na ďalší program,
- 10 - rozhodnúť, či je chápadlo na podložke N - prechod na 5,
- 11 - posunutie chápadla,
- 12 - prechod na 6. krok.

Pre neusporiadané prostredie pri uchopovaní predmetu je vhodné využiť informáciu zo snímačov na chápadle. Príkladom je nasledujúci algoritmus:

- 1 - pohyb k predmetu,
- 2 - rozhodnutie, či je predmet medzi čeľusťami; N – prechod na 1,
- 3 - zatváranie chápadla,
- 4 - rozhodnutie, či je kontakt jednej strany chápadla; A - prechod na 10,
- 5 - rozhodnutie, či je kontakt oboch častí; N - prechod na 11,
- 6 - zmena štruktúry regulačného obvodu,
- 7 - rozhodnutie, či je sila menšia ako nastavená; N - prechod na 11,
- 8 - priblíženie chápadla,
- 9 - prechod na 7. krok,
- 10 - stranový posun, prechod na 3. krok,
- 11 - rozhodnutie, či je sila väčšia ako nastavená; N - prechod na 14,
- 12 - oddialenie chápadla,
- 13 - prechod na 7. krok,
- 14 - koniec.

Vhodné je použiť približovacie snímače. Pred reguláciou sily možno použiť dva spôsoby približovania chápadla k predmetu: - približovanie s definovanou rýchlosťou, - približovanie na definovanú polohu.

Pred prenesením predmetu treba ho zdvihnúť z pracovného stola. Prechod z tohto bodu do koncového možno plánovať ako elementárny pohyb. Na dráhe pohybu sa určí niekoľko uzlových bodov, pre ktoré treba určiť kľbové premenné riešením spätnej úlohy. Možno preto zostaviť tabuľku bodov z príslušných kľbových premenných. Na základe tejto tabuľky, známeho spôsobu interpolácie a známych ohraničení možno stanoviť realizovateľnosť skúmaného variantu premiestnenia. Ak želaný pohyb nemožno vykonať, potom treba využiť nejednoznačnosť riešenia spätnej úlohy a zvoliť iný súbor kľbových premenných a postup zopakovať. Ak pre žiadny súbor premenných nemožno splniť podmienky ohraničení je potrebné zmeniť trajektóriu, prípadne použiť miesta na odloženie predmetu a jeho nové uchopenie. V režime prenášania sa sila reguluje na predpísanú hodnotu, pričom v osobitných prípadoch možno použiť snímače kĺzania predmetu v chápadle.

Zostavenie tabuľky hodnôt premenných nestačí pre riadenie servosystémov robotov. Pre túto činnosť sa zostroja časové funkcie $q_i(t)$, kde i je číslo kinematickej dvojice. Pri riešení treba určiť rozklad celej dráhy na úseky a spôsob interpolácie v týchto úsekoch.

Uzly interpolácie t_j možno v prvom priblížení určiť zo vzťahu

$$t_j = t_{j-1} + \max_{1 \leq s \leq m} \frac{|q_s^j - q_s^{j-1}|}{v_{s \max}}, \quad t_0 = 0 \quad (10.1)$$

kde $t_j = t_0, \dots, t_m, t_0 = 0, t_m = T$ je rozklad časového intervalu riadenia, $v_{s \max}$ je maximálna možná rýchlosť sledovania s -tého servomechanizmu.

Plánovanie trajektórie pohybu robota vykonáva operátor, alebo sa vykoná vo vyššej riadiacej úrovni. Na základe známej trajektórie sa riešením spätných úloh určia riadiace príkazy pre pohony jednotlivých stupňov voľností. Vzhľadom na to, že pri uvedenom postupe ide o riešenie nelineárnych rovníc, riešenie sa často uskutočňuje pomocou výpočtovej techniky, alebo pomocou fyzikálnych modelov.

Približné riešenie možno získať linearizáciou rovníc opisujúcich kinematickú schému. Získaný opis platí pre malé zmeny súradníc. Vzťah pre zmeny polohy vyplýva zo vzťahu

$$\Delta \mathbf{r}_M^0 = \sum_{s=1}^m \mathbf{C}_{m,s} \Delta \mathbf{q}_s \quad (10.2)$$

Z riešenia týchto rovníc pri zadanej zmene polohy chápadla $\Delta \mathbf{r}_M^0$ sa určujú zmeny zovšeobecnených súradníc $\Delta \mathbf{q}_s$, ktoré sú úmerné riadiacim signálom servosystémov.

Linearizované rovnice pre rýchlosť, prírastok polohy členov a pôsobiacich síl sú základom pre riešenie úloh riadenia pohonov manipulátora.

Operátor určuje želanú rýchlosť pohybu koncového člena, premiestnenie pracovných orgánov robota, prípadne silové pôsobenie na koncový člen. Na základe týchto informácií treba určiť činnosť pohonov. Pritom sú možné nasledujúce metódy plánovania trajektórie pohybu kinematickej schémy: riadenie podľa vektore rýchlosti, riadenie podľa prírastku polohy a riadenie podľa vektora sily.

Riadenie podľa vektora rýchlosti je charakterizované zadaním rýchlosti pohybu projekciami vektorov uhlovej rýchlosti $\boldsymbol{\omega}$ pracovného orgánu v súradnicovom systéme, s ktorým pracuje riadiaci systém tak, aby sa úplne určila rýchlosť pohybu koncového bodu v danom bode trajektórie.

Systém lineárnych algebrických rovníc charakterizujúcich zložky vektora $\boldsymbol{\omega}$ je daný napr. vzťahom

$$\boldsymbol{\omega}_s^0 = \mathbf{B}_{m,0} \boldsymbol{\omega}_s \quad (10.3)$$

Pri splnení známych podmienok možno zo vzťahu určiť rýchlosť $\boldsymbol{\omega}_s$, resp. $\dot{\mathbf{q}}_s$.

Žiadané hodnoty pre servosystémy sa potom môžu zadávať ako integrál zovšeobecnených rýchlostí. V priebehu riešenia môžu vzniknúť príliš veľké žiadané hodnoty, ktoré nemožno servosystémami presne sledovať. Algoritmy musia byť preto upravené tak, aby sa akceptovali len realizovateľné riešenia, resp. riešenia, ktoré zabezpečujú minimálnu chybu pri vykonávaní želaného pohybu.

Zložky vektore rýchlosti koncového člena sa zadávajú operátorom, alebo sa generujú automaticky. V prvom prípade sa vykonanie želaných trajektórií kontroluje v režime predvádzania operátorom, lebo systém je polohovo uzavretý cez operátora. Každý polohe zadaného súboru signálov zodpovedá určitá rýchlosť pohybu koncového člena. Taký spôsob je efektívny pri nevyhnutnosti rýchleho prevedenia koncového člena z jednej polohy do druhej a ak sa nevyžaduje vysoká presnosť polohy. V druhom prípade operátor zadáva zmenu polohy koncového člena a systém určuje spôsob dosiahnutia želanej polohy. Vektor rýchlosti je generovaný na základe regulačnej odchýlky polohy koncového člena od želanej polohy.

Pri syntéze riadenia podľa vektora rýchlosti sa používajú približné riešenia, ktoré vychádzajú z ohraničenosti zadaných hodnôt súradníc. Obvykle sa berú tri súbory hodnôt súradníc trajektórie (dve okrajové a jedna v strede) a pre ne sa vyčísluje inverzná matica. Pre všetky ostatné súradnice sa inverzná matica určuje interpoláciou. Chyba vzniknuté interpoláciou býva obvykle zanedbateľná.

Metóda postupnej korekcie polohy sa používa v číslicových riadiacich systémoch. Vtedy sa algoritmus riadenia podľa vektore rýchlosti formuje ako prírastok súradníc za jeden cyklus výpočtu algoritmu.

Pri realizácii danej metódy treba uzlové body na zložitej trajektórii vyberať dostatočne blízko vedľa seba, aby prechod z jedného bodu do druhého zabezpečil želaný tvar trajektórie.

Proces riadenie a s tým spojené výpočty sa zjednodušia, ak sa použije **riadenie podľa vektora sily**. Servosystémy robota vyvíjajú také zovšeobecnené sily, ktoré sú dynamicky ekvivalentné zadaným silám, nahrádzajúcim ich pôsobenie na kinematickú schému. Radiaci systém počíta zo zadávacích signálov zovšeobecnené sily pre súradnice riadené pohonmi.

Nadbytočné stupne voľnosti, existencia ohraničení zovšeobecnených súradníc nedovoľuje riešiť štandardnými metódami lineárne rovnice, ktoré opisujú systém. Jednako pre zadanú konfiguráciu manipulačného systému všetky ohraničenia možno zapísať vo forme lineárnych rovníc a nerovností pomocou metódy lineárneho programovania. Riadenie plánovania trajektórie pohybu je založené na použití lineárneho modelu a má nasledujúce etapy:

- určenie súčasných hodnôt zovšeobecnených súradníc q elementov manipulačného systému a cieľu riadenia určujúce konečnú polohu koncového člena robota,
- výpočet priebežnej hodnoty polohy koncového člena a generovanie riadiaceho vektore zmeny tejto polohy, ak sa cieľ ešte nedosiahol,
- zostrojenie lineárneho modelu. výpočet prenosovej matice a ohraničení závislých od priebežnej konfigurácie manipulátora a stavu systému,
- určenie prírastkov zovšeobecnených súradníc q pomocou riešenia úlohy lineárneho programovania,
- odovzdanie riadiacich signálov q výkonnej úrovni a návrat k prvému bodu.

Ak počet stupňov voľnosti je nedostatočný na vykonanie zadaného pohybu, potom sa určí len približné riešenie s minimalizáciou chyby.

Metóda dynamického programovania vyžaduje presné riešenie spätnej úlohy v uzlových bodoch a je výhodná pre tie kinematické schémy, v ktorých sa môže spätná úloha riešiť analyticky. Ťažnosť riešenia tkvie v tom, že určitý bod priestoru v systémoch s väčším počtom stupňov voľnosti možno dosiahnuť rôznymi kombináciami kĺbových premenných. Na rozdiel od spätnej úlohy je poloha koncového bodu jednoznačne určená zadaním kĺbových premenných. Pri uvedenej metóde sa na začiatku rieši spätná úloha pre zadanú postupnosť $\{r_k\}$ $k = 1, \dots, N$ polôh koncového člena v pracovnom priestore. Výsledkom je postupnosť Q_k množiny prípustných konfigurácií systému. Prípustná je taká konfigurácia, pre ktorú hodnoty zovšeobecnených súradníc zodpovedajú konštrukčným ohraničeniam na rozsah ich zmien

$$q_{k \min} \leq q_k \leq q_{k \max}, k=1, \dots, N$$

Ak niektoré hodnoty zovšeobecnených súradníc nemôžu byť určené, položia sa rovné ich hodnotám v predchádzajúcom uzlovom bode Q_{k-1} . Trajektória bude tvorená postupnosťou prechodov z jednej uzlovej konfigurácie na druhú a úloha vedie na výber ukazovateľa optimálnosti (energetickej, časovej a pod.).

10.6 Logické riadenie robotov

Spôsob riadenia robota alebo celého komplexu je založený na formalizácii ich opisu ako logickej sietí, zloženej z konečných automatov. Tento prístup umožňuje nielen analyzovať prácu systému, ale aj projektovať programové zabezpečenie.

Konečný automat je opísaný vzťahom

$$K = (U, X, Y, \varphi, \psi) \quad (10.4)$$

kde $U = (u_1, u_2, \dots, u_i)$ – vstupná abeceda, $X = (x_1, x_2, \dots, x_j)$ – množina stavov, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ – výstupná abeceda, $\varphi : X \times U \rightarrow X$ – funkcia prechodov, $\psi : X \rightarrow Y$ alebo $X \times U \rightarrow Y$ – výstupná funkcia. Konečný automat je objekt, ktorý môže byť v jednom zo stavov $x_i \in X$ dovtedy, pokiaľ na jeho vstup nepríde niektorý symbol zo vstupnej abecedy $u_i \in U$. V tomto prípade automat prejde do nového stavu určeného transformáciou φ ako funkciou aktuálneho stavu a vstupu. Na výstupe je symbol y_i určený transformáciou ψ .

Špecifické pre manipulátor s cyklovým riadením je, že sa môže nachádzať v konečnom počte stavov. Ak manipulátor má h stupňov voľnosti a každý z nich môže mať p_i bodov, potom celkový počet bodov, v ktorých môže byť koncový člen, je daný vzťahom

$$n = \prod_{i=1}^h p_i \quad (10.5)$$

Pri meraní polohy pomocou zarážok prichádzajú z každého stupňa voľnosti 2 signály, preto celkový počet signálov je $2h$. Tieto signály tvoria vstupné signály konečného automatu. Systém má pre každý stupeň voľnosti tiež dva riadiace príkazy, ktoré tvoria výstupné signály konečného automatu.

Manipulátor s cyklovým riadením s h stupňami voľnosti a p_i bodmi polohovania pre každý stupeň voľnosti možno opísať ako konečný automat, ktorý má n stavov, f elementov vstupnej abecedy a m elementov výstupnej abecedy, kde

$$n = \prod_{i=1}^h p_i; \quad f = \sum_{i=1}^h p_i(p_i - 1); \quad m = \sum_{i=1}^h p_i \quad (10.6)$$

Činnosť manipulátora možno opísať prechodovým grafom. Graf opisuje možné premiestnenia manipulátora, ale neudáva v akej postupnosti budú jednotlivé, stavy nasledovať za sebou. Pre zabezpečenie pohybu manipulátora po vopred zadaných bodoch je nevyhnutné sformulovať postupnosť riadenia (elementov vstupnej abecedy). Tento postup môže byť obťažný. Výhodné je syntetizovať regulátor vo forme konečného automatu, ktorého vstupná abeceda je podmnožinou výstupnej abecedy robota s cyklovým riadením a výstupná abeceda podmnožinou vstupnej abecedy robota.

11. INVERZNÁ KINEMATICKÁ ÚLOHA

V ľubovolnom systéme sú tri úrovne riadenia:

- najnižšia (výkonná) úroveň riadenia servosystémov
- stredná (taktická) úroveň, rozdeľujúca želaný pohyb chápadla na pohony výkonného mechanizmu
- horná (strategická) úroveň, určujúca postupnosť želaných pohybov chápadla v súlade s cieľmi riadenia.

Inak možno hovoriť o úrovni riadenia osí pohybu, manipulátora (taktická), objektov (strategická) a plánovania celej činnosti.

Algoritmy taktickej úrovne sú nelineárne, vychádzajú z nelineárnych úloh o polohe výkonného mechanizmu (priama a inverzná kinematická úloha). Pre niektoré prípady riadenia sa linearizujú.

Inverzná úloha vzhľadom na zložitosť svojho riešenia môže ovplyvňovať konštrukciu robota. Je vhodné aplikovať také konštrukcie, ktoré umožňujú jednoduché riešenie inverznej kinematickej úlohy.

Pri riadení sa v režime plánovania trajektórie určuje určitý počet medziľahlých uzlových bodov na trajektórii pohybu. Inverzná úloha sa potom rieši pre každý uzlový bod. Ak sú zachované všetky ohraničenia na zobecnené súradnice, potom vypočítaný pohyb realizuje výkonná úroveň.

Algoritmus formovania riadiacich signálov pohonov zo zadaných diskretných hodnôt zovšeobecnených súradníc mechanizmu musí riešiť dve základné úlohy:

- zabezpečiť trvanie riadenia a rozdelenia toho intervalu času na nutný počet častí,
- určenie riadenia pre ľubovoľný čas (úlohy interpolácie).

Pri plánovaní riadenia možno vyčleniť niekoľko samostatných etáp:

- plánovanie technickej operácie (plánovanie pohybu chápadla a výpočet jeho trajektórie v pracovnom priestore) a určenie uzlových bodov trajektórie,
- riešenie postupnosti spätných úloh pre každý uzlový bod trajektórie t.j. zostrojenie postupnosti priestorových konfigurácií mechanizmu,
- formovanie časových riadiacich signálov.

Ak sú súradnice polohy členov v zložitom mechanizme spojené nelineárne po ich diferencovaní – rýchlosti súradníc budú zodpovedať lineárnym rovniciam pre každú konfiguráciu. Tieto rovnice možno využiť aj na výpočet malých zmien súradníc.

Lineárne rovnice pre rýchlosť, prírastky a sily môžu byť základom pre rôzne algoritmy taktickej úrovne. Vo všetkých prípadoch pohyb manipulačného systému sa plánuje na úrovni pohybu chápadla.

Strategická úroveň – určenie postupnosti elementárnych pohybov a tiež parametrov každého elementárneho pohybu pre ľubovoľnú úlohu riadenia, vychádzajúce z technologického obsahu operácie.

11.1 Presné a približné metódy

Inverznou úlohou sa určujú zovšeobecnené súradnice $q_i (i=1,2,...,n)$ manipulátora podľa polohy pracovného orgánu alebo niektorého člena manipulátora v základnom súradnicovom systéme. Pri riešení je potrebné, aby počet súradníc bol rovný počtu osí pohybu, aby sa dalo zostaviť n nezávislých rovníc s n neznámymi. Obvykle i v tomto prípade môže byť niekoľko riešení.

Príkladom môže byť rovinový manipulátor s 3 členmi. Poloha chápada je určená v rovine 3 súradnicami x_p, y_p, α . Ak nie sú ohraničenia na q_1, q_2, q_3 sú vždy dve možnosti pre dosiahnutie polohy aj s danou orientáciou. Manipulátor má jeden stupeň manévrovateľnosti. Výber riešenia potom závisí od doplnkových podmienok, napr. existencie prekážok v pracovnom priestore, konštrukčných ohraničení a pod.

Podmienka $n=m$ nie je postačujúca ani pre existenciu riešenia. Ak taký prípad nastane je potrebné zmenšiť počet zadávaných súradníc robota. Môžu existovať osobitné prípady, keď niektorá zovšeobecnená súradnica môže mať ľubovoľnú hodnotu. Ak $n < m$ riešenie inverznej úlohy vo všeobecnosti neexistuje. Možno ho získať ak sa ľubovoľne zadá len n súradníc chápada.

Ak $n > m$ je riešenie inverznej úlohy nejednoznačné. Ak je zadaných m súradníc chápada, potom vo všeobecnom prípade možno ešte ľubovoľne zadať $n-m$ zovšeobecnených súradníc q_i . Ostatných m zovšeobecnených súradníc q_i sa nachádza z riešenia inverznej úlohy o polohe. Pri $n > m$ má manipulátor nadbytočné stupne voľnosti. Ich použitie umožňuje zabezpečiť manipulátorom prácu v prostredí s prekážkami a tiež uvážiť doplnkové ohraničenia na q_i alebo podmienky na konfiguráciu manipulátora.

V inverznej úlohe sú tri varianty:

- Zadá sa jedna poloha chápada, t.j. jeden súbor skalárnych veličín $r_j (j=1, \dots, m)$ a nájde sa jedna konfigurácia manipulátora (alebo niekoľko ak je viac riešení).
- Zadá sa konečný počet polôh chápada a nájdu sa zodpovedajúce konfigurácie manipulátora (pre niektoré polohy chápada môže byť nájdené niekoľko konfigurácií)
- Zadá sa pohyb chápada v čase $r_j = r_j(t)$ ($j=1, \dots, m$) a nájdu sa zákony zmeny zovšeobecnených súradníc $q_i(t)$.

Okrem inverznej úlohy pre polohu je aj inverzná úloha pre translačnú a rotačnú rýchlosť a zrýchlenie.

Riešenia inverznej úlohy môže byť presnými alebo približnými metódami.

Riešenie inverznej úlohy pre robot, ktorý má len translačné spojenie kinematických dvojíc je ukončené zadáním požadovanej polohy $P(x_p, y_p, z_p)$ bodu v priestore. Pre systém s jedným rotačným a dvoma translačnými pohybmi (pracuje v cylindrickom súradnicovom systéme) sú rovnice

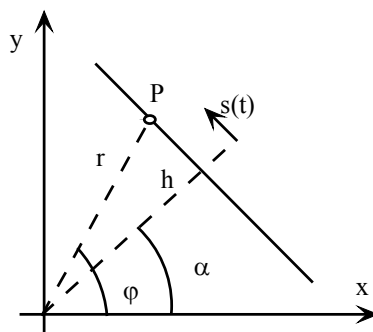
$$\begin{aligned} x_p &= r \cos \varphi \\ y_p &= r \sin \varphi \\ z_p &= z \end{aligned} \tag{11.1}$$

Veličiny, ktorými je určený pracovný bod sú preto určené vzťahmi

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctg \frac{y_p}{x_p} \\ r &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \end{aligned} \tag{11.2}$$

Tak je možné riešiť aj body trajektórie.

Pre označenie na obr.11.1 platí



Obr.11.1 Pohyb po trajektórii

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{h^2 + s^2(t)} \\ \varphi &= \alpha + \arctan \frac{s(t)}{h} \end{aligned} \quad (11.3)$$

Možno určiť $r', \varphi', r'', \varphi''$. Vzťahy pre $r, \varphi, r', \varphi', r'', \varphi''$ sú programové zákony zmeny súradníc, rýchlosti a zrýchlení. Pochopiteľne sa musia dodržať obmedzenia

$$\begin{aligned} r_{\min} &\leq r \leq r_{\max} \\ \varphi_{\min} &\leq \varphi \leq \varphi_{\max} \end{aligned} \quad (11.4)$$

a ďalej podmienky pre pohony

$$\begin{aligned} |r'| &\leq r'_{\max} & |r''| &\leq r''_{\max} \\ |\varphi'| &\leq \varphi'_{\max} & |\varphi''| &\leq \varphi''_{\max}. \end{aligned}$$

Pre systém s dvoma rotačnými pohybmi a jedným translačným platia vzťahy

$$\begin{aligned} x_p &= r \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \\ y_p &= r \cos \varphi_2 \sin \varphi_1 \\ z_p &= e + r \sin \varphi_2 \end{aligned} \quad (11.5)$$

Riešenie je

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \operatorname{arctg} \frac{x_p}{y_p} \\ \varphi_2 &= \operatorname{arctg} \frac{z_p - e}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}} \\ r &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (z_p - e)^2} \end{aligned} \quad (11.6)$$

Je potrebné rešpektovať obmedzenia

$$r_{\min} \leq \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (z_p - e)^2} \leq r_{\max} \quad (11.7)$$

Predpokladáme, že uhol φ_1 sa mení v intervale $\langle -\pi, \pi \rangle$. Preto

$$\varphi_1 = \begin{cases} \arctg \frac{y_p}{x_p} & \text{pre } x_p > 0 \\ \pm \frac{\pi}{2} & \text{pre } x_p = 0, \text{ + pre } y_p > 0, \\ \arctg \frac{y_p}{x_p} \pm \pi & \text{pre } x_p < 0 \end{cases} \quad (11.8)$$

Uhol φ_2 ak sa mení z intervalu $\left\langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right\rangle$ je určený nasledovne

$$\varphi_2 = \begin{cases} \arctg \frac{z_p - e}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}} \\ \frac{\pi}{2} & \text{pre } x_p = y_p = 0 \end{cases} \quad (11.9)$$

Približné metódy sú založené na metóde gradientu alebo Newtonovej metóde.

Pri metóde gradientu sa minimalizuje rozdiel medzi vektormi

$$\rho^2(q) = \|\mathbf{x}_{zd} - \mathbf{x}(q)\| \quad (11.10)$$

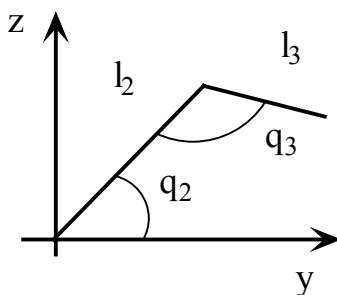
v oblasti prípustných q . Riešením sú hodnoty q , keď $\rho^2 = 0$.

Pri Newtonovej metóde sa robí lineárne priblíženie vektorov. S tým cieľom sa vytvorí lineárna rovnica

$$\mathbf{x}_{zd} - \mathbf{x}(q_0) = \frac{\delta \mathbf{x}(q_0)}{\delta \mathbf{q}} d\mathbf{q} \quad (11.11)$$

11.2 Technická realizácia

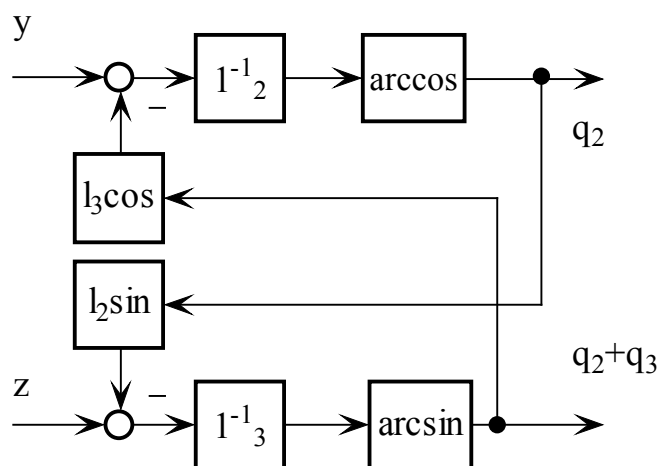
Pre robotický systém uvedený na obr.11.2 platia vzťahy



Obr.11.2. Robotický systém

$$\begin{aligned} y &= l_3 \cos(q_2 + q_3) + l_2 \cos q_2 \\ z &= l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_2 \sin q_2 \end{aligned} \quad (11.12)$$

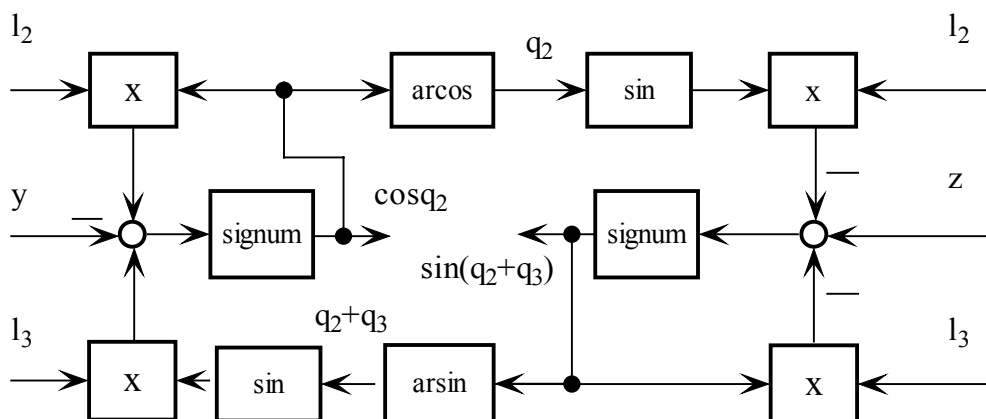
Z uvedených vzťahov možno nakresliť blokovú schému riešenia inverznej kinematickej úlohy uvedenú na obr.11.3.



Obr.11.3 Bloková schéma riešenia inverznej kinematickej úlohy

V systéme môže vzniknúť nestabilita.

Iným riešením je bloková schéma uvedená na obr.11.4. I v tomto prípade môže vzniknúť nestabilita.



Obr.11.4. Bloková schéma riešenia inverznej kinematickej úlohy

12. HODNOTENIE KVALITY ROBOTOV

Súbornejšie ohodnotenia vlastností robotov vychádzajú z hodnotenia určitej činnosti robota – zavádza sa hodnotenie vykonania elementárnych operácií. Základné elementárne operácie používané pri hodnotení vlastností robota sú:

- polohovanie – premiestnenie význačného bodu robota do definovaného bodu priestoru, charakterizuje dosiahnuteľnosť bodu v priestore,
- orientácia – orientácia koncového člena robota v dosiahnutom bode určuje možnosť nastaviť želanú orientáciu v danom bode, charakterizuje sa uhlom alebo koeficientom uhlu servisu.
- pohyb – mobilnosť zodpovedá dosiahnuteľnej rýchlosti pohybu chápädla alebo inej technologickej hlavice
- zaťažiteľnosť – poddajnosť a pružnosť štruktúry hodnotená z hľadiska pôsobenia zaťaženia
- presné polohovanie – presnosť, premiestnenia chápädla do zadaného okolia želaného bodu.

Pri hodnotení kvality robotov treba porovnávať veľké množstvo ukazovateľov. Jeden z možných cieľov pri návrhu robota je dosiahnuť, aby robot mal vysoké funkčné ukazovatele (počet stupňov voľnosti, presnosť, dynamika, nosnosť) pri nízkych nákladových ukazovateľoch (hmotnosť, cena).

Pri analýze možno dať do súvislosti energetické, informatické a nákladové ukazovatele napr. vzťahom

$$\log Q = a_0 + a_1 \log E + a_2 \log W \quad (12.1)$$

kde Q sú nákladové ukazovatele, E – energetické (kinetická energia systému), W – informatické ukazovatele (rozsah pamäte).

Hodnotenie projektovaného alebo už vyrábaného robota sa vykoná určením pomeru

$$n = \log \frac{Q_{\text{str}}}{Q} \quad (12.2)$$

kde Q_{str} sú stredné náklady (cena, hmotnosť) danej skupiny a Q sú reálne náklady konkrétneho robota.

Ak je $n > 0$, potom má robot vysokú technicko-ekonomickú efektívnosť. V opačnom prípade je potrebné robot preprojektovať.

12.1 Experimentálne overenie vlastností robotov

Skúšky robotov sa robia v tepelne ustálenom stave (teplota určených miest robota sa mení najviac v intervale $(t, t \pm 2^\circ\text{C})$ za 15 minút a v priebehu skúšky sa mení najviac o $\pm 4^\circ\text{C}$. Skúšky sa robia v nezaťaženom stave a pri nominálnom zaťažení, skúmajú sa statické a dynamické vlastnosti.

Skúšky začínajú kontrolou vyhotovenia a kontrolou bezpečnosti práce s robotom, kde sa vykoná:

- kontrola blokovania
- overenie vzájomnej súčinnosti robota s riadiacim systémom

- overenie funkcie centrál stop
- kontrola oteplenia ložísk
- kontrola oteplenia pracovnej kvapaliny
- overenie blokovania proti prechodu cez krajné polohy.

Pri kontrole technických parametrov sa overuje:

- pracovný priestor
- pracovné pohyby
- opakovateľnosť polohovania (statická)
- opakovateľnosť presnosti dráhy (dynamická)
- stabilita pracovného bodu
- kinematické charakteristiky
- maximálna operačná rýchlosť
- maximálna okamžitá rýchlosť
- čas pohybu a útlmu
- nominálne zaťaženie
- stabilita pracovného cyklu.

12.2 Presnosť polohovania

Jeden z významných ukazovateľov kvality robota je presnosť polohovania. Pri experimentálnom určení presnosti polohovania sa používa meranie pomocou kontrolného telesa uchopeného v chápadle. Presnosť dosiahnutia daného bodu sa určuje šiestimi veličinami:

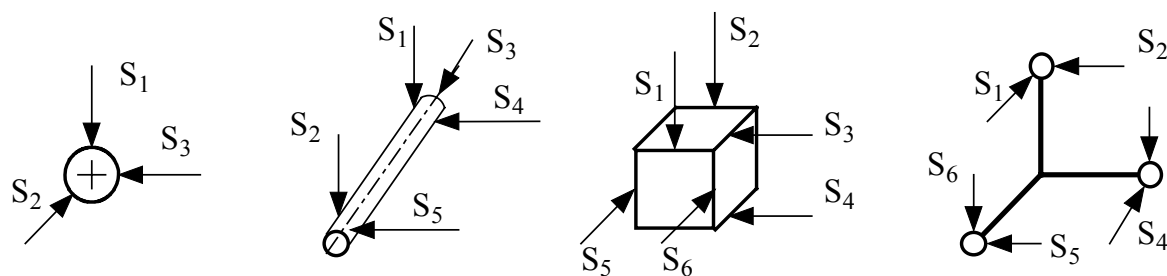
- tromi lineárnymi premiestneniami
- tromi uhlovými otočeniami.

Ako snímače možno použiť štandardné snímače malého premiestnenia. Každý snímač meria vzdialenosť l_i od nominálneho bodu A do nového bodu A_1 , ktorý vznikol natočením a posunutím kontrolného telesa. Na presné určenie polohy kontrolného telesa je potrebné vhodne zvoliť tvar telesa a smer snímania snímačov.

Spôsob určovania presnosti polohovania musí vyhovovať nasledovným požiadavkám:

- súbor všetkých hodnôt l_i musí umožňovať určiť šesť zložiek chyby, preto treba použiť najmenej šesť snímačov
- určenie chyby musí byť jednoznačné, čo vyžaduje rovnomerné rozloženie snímačov v priestore, pod rôznymi uhlami k osiam základného systému a kontrolné telesá musia byť „vypuklé“
- pre spoľahlivosť spracovania výsledkov merania musí byť rozmiestnenie snímačov a tvar povrchu kontrolného telesa v okolí miesta dotyku so snímačom vybrané tak, aby sa zvýšila citlivosť každého snímača na definovaný počet zložiek chyby polohovania (obvykle na jednu) a zmenšila sa na druhé zložky.

Základné kontrolné telesá sú guľa, valec a kocka. Guľa sa používa na hodnotenie dosiahnutia presnosti v určitom bode bez ohľadu na orientáciu. Valec umožňuje ohodnotiť presnosť dosiahnutia želaného bodu a orientáciu vzhľadom na dve osi súradnicového systému. Najúplnejšie informácie možno získať pri použití kocky. Vtedy možno ohodnotiť presnosť dosiahnutia bodu a orientáciu na všetky osi súradnicového systému. Aby sa zvýšila citlivosť systému na uhlové chyby používajú sa špeciálne telesá.. Na obr.12.1 sú uvedené kontrolné telesá a vhodné rozloženie snímačov.



Obr.12.1 Kontrolné telesá

Na úrovni výkonného systému a jeho riadiacej časti sú tri typy chýb:

- nedostatočná presnosť informácií prichádzajúcich zo snímačov
- chyby pohonov robota, vyvolané zónou necitlivosti, vplyvom trenia a ďalšími nelinearitami v elektrických a mechanických častiach výkonného systému
- chyby vyvolané veľkosťou záťaže na pohony, premenlivým momentom zotrvačnosti, kolísaním napätia siete a vonkajšími poruchami.

Presnosť polohovania sa môže hodnotiť experimentom, pri ktorom sa v pracovnom priestore robota zvolí M bodov, cez ktoré robot postupne prechádza s koncovým bodom. Vyhodnocovací systém hodnotí presnosť zaujatia želanej polohy v každom bode. V každom bode sa ukladá hodnota regulačnej odchýlky. Experiment sa opakuje N -krát. Číslo N je zvolené tak, aby sa dosiahla pravdepodobnosť výskytu nameranej hodnoty 0,99. Experiment sa vykoná pre rôzne záťaže. Hmotnosť bremena môže pri určitej veľkosti zvýšiť presnosť (vymedzia sa vôle), ale od určitej hodnoty zhoršuje záťaž presnosť systému jednak v dôsledku zaťaženia servosystémov, jednak pružnou deformáciou kinematickej štruktúry. Vzhľadom na to, že pri experimente sa pracuje len s vnútornými snímačmi, systém zaregistruje len zhoršenie presnosti zaujatia polohy v dôsledku zaťaženia servosystémov. Ostatné chyby možno registrovať len snímačmi vonkajšej informácie.

Na základe určenia strednej hodnoty chyby v každom bode možno zlepšiť presnosť zaujatia polohy pri cyklickom riadení robota. Vysoké požiadavky sú kladené na presnosť a stabilitu informácie zo snímačov polohy. Na začiatku činnosti robot najskôr vykoná skúšobné pohyby a riadiaci systém určí strednú hodnotu chyby polohovania v každom pracovnom bode. Určené stredné hodnoty sa použijú ako korekčné hodnoty riadiacich signálov v príslušnom bode.

Ak sa hodnotí presnosť sledovania predpísanej trajektórie je potrebné merať polohu koncového bodu v priestore bezkontaktnými snímačmi. Používajú sa laserové, akustické a vizuálne meracie systémy.

12.3 Moment zotrvačnosti

Pre riadenie robotov sú dôležitými parametrami konštrukcie priemyselného robota moment zotrvačnosti pohybujúcich sa častí, statická tuhosť, sumárna vôľa kinematického reťazca robota, vlastná frekvencia a koeficient tlmenia.

Moment zotrvačnosti mechanickej konštrukcie sa určuje tak, že sa k nej pripojí prídavná hmotnosť a určujú sa vlastné kmity systému. Moment zotrvačnosti sa určuje zo vzťahu

$$J = J_z \frac{\omega_z^2}{\omega^2 - \omega_z^2} \quad (12.3)$$

kde J je moment zotrvačnosti systému, J_z – moment zotrvačnosti pripojenej hmotnosti, ω – vlastná frekvencia systému, ω_z – frekvencia systému s pripojenou hmotnosťou.

Určenie momentu zotrvačnosti na základe merania zrýchlenia pri známom aktívnom momente je menej presné.

Vlastnú frekvenciu systému možno určiť meraním odozvy na impulzný signál alebo meraním frekvenčnej charakteristiky. Používajú sa oba spôsoby, ale výhodnejší je druhý spôsob. Budiaci signál môžu generovať pohony robota alebo ho generuje vonkajšie zariadenie. Vyhodnocuje sa amplitúda a fáza výstupného signálu. Pre roboty s nosnosťou od 4 do 60 kg je prenášané pásmo 2 až 50 Hz.

Na základe dynamických meraní možno určiť aj vzťah medzi statickým koeficientom tuhosti systému a momentom zotrvačnosti. Z výsledkov merania momentu zotrvačnosti možno preto určiť aj koeficient tuhosti.

Dôležitou dynamickou charakteristikou je maximálne preregulovanie a čas preregulovania pri polohovaní člena. Preregulovanie vzniká v dôsledku pružnosti členov kinematickej schémy a v dôsledku zotrvačnosti členov regulačného obvodu. Amplitúda preregulovania závisí nielen od vlastností robota, ale aj od prenášanej hmotnosti, od rýchlosti pohybu a od pracovného bodu. Čas preregulovania treba uvažovať pri programovaní operácií vyžadujúcich vysokú presnosť.

Prechodné procesy pri polohovaní treba merať v troch navzájom kolmých rovinách, lebo pri pohybe robota vznikajú kmity nielen v smere pohybu.

Pri meraní na tom istom type robota dochádza k rozptylu nameraných výsledkov, čo je vyvolané nepresnosťou zhotovenia mechanickej konštrukcie a nastavenia regulátorov servosystémov jednotlivých osí pohybu.

13. APLIKÁCIE ROBOTOV

Rozvoj techniky v ostatných desaťročiach umožnil aplikovať robotické technológie v najrozličnejších oblastiach ľudskej činnosti, pričom tieto možno rozdeliť na aplikácie robotických manipulátorov s nepohyblivou základňou, aplikácie mobilných robotov a iné aplikácie využívajúce robotické technológie.

Aplikácie robotických manipulátorov možno nájsť predovšetkým v priemysle, ale uplatnenie nachádzajú aj v poľnohospodárstve a ďalších oblastiach.

Medzi základné aplikácie manipulátorov v **priemyselných podmienkach** možno zaradiť:

- oblúkové a laserové zváranie,
- plazmové rezanie, rezanie vodným lúčom,
- bodové (odporové) zváranie,
- striekanie (resp. iné druhy povrchovej úpravy),
- nanášanie lepidla, tmelu a pod.,
- manipulácia s obrábacím nástrojom (vŕtanie, brúsenie, leštenie),
- manipulácia s materiálom, súčiastkami a hotovými výrobkami vrátane paletizačných úloh,
- montážne úlohy vrátane osadzovania dosiek plošných spojov.



Obr.13.1 Robot pre oblúkové zváranie od firmy Motoman



Obr.13.2 Montážny robot typu SCARA od firmy Adept Technology

Špecifiká jednotlivých aplikácií spočívajú v rôznej miere zabezpečenia presnosti polohovania a rozmerov manipulovaných resp. opracovávaných dielcov a výrobkov, z čoho následne vyplýva rôzna miera potreby vybavenia robota doplnkovými snímačmi, ako napr. proximítné snímače v prípade oblúkového zvarovania, silovomomentové snímače v prípade montážnych úloh a manipulácie s nástrojmi, ktoré sú v kontakte s obrobkom a pod.. V prípade aplikácie doplnkových spätných väzieb vrátane vizuálneho systému hovoríme o adaptivite robotického manipulátora. Pomerne častou aplikáciou je aj meranie a kontrola kvality výrobkov, kde svoje uplatnenie nachádzajú najmä vizuálne systémy resp. rôzne typy meracích prístrojov nesených v zápästí robota.

Na rozdiel od priemyselných aplikácií má robotizácia technológií **v oblasti poľnohospodárstva** (agropriemyslu) podstatne kratšiu históriu. Vzhľadom na interakciu s biologickými objektmi je typické širšie použitie senzorových technológií, špeciálne silovomomentových snímačov a vizuálnych systémov.

Medzi komerčne využívané technológie v tejto oblasti možno zaradiť:

- triedenie a balenie ovocia, zeleniny, vajíčok a potravinárskych produktov,
- delenie a vykosťovanie mäsa,
- sadenie priesad a iná manipulácia s rastlinami,
- automatizované dojenie kráv,
- strihanie oviec.

Medzi **d'alsie aplikácie manipulátorov** s rôznou mierou autonómie možno zaradiť:

- obsluha telesne postihnutých osôb resp. chorých osôb upútaných na lôžko, pričom manipulátor môže byť upevnený na vozíku alebo pri lôžku postihnuteľného,
- aplikácie v oblasti chirurgie, kedy manipulátor s rôznou mierou autonómie podáva chirurgovi operačné nástroje resp. s nimi priamo manipuluje,
- manipulácia s ultrazvukovou hlavicou a inými diagnostickými nástrojmi pri vyšetrovaní pacientov,
- manipulácia s chemickými a biologickými vzorkami v laboratórnych podmienkach,
- príprava, dávkovanie a balenie liečiv (automatizovaná lekáreň),

- automatické čerpanie pohonných hmôt do dopravných prostriedkov,
- príprava potravín, ako napr. výroba wafli a zdobenie cukrárskych výrobkov, príprava miešaných nápojov a pod.,
- manipulátor umožňujúci raketoplánom a kozmickej stanici ISS vykladať a nakladať družice a stavebné časti stanice,
- aplikácie v športe, kedy robotický manipulátor plní úlohu protihráča, napr. robotický wrestling, šach a obdobné spoločenské hry, stolný tenis, biliard a pod. Zaujímavou aplikáciou je aj trenažér pre nácvik úderov golfovou palicou.

Omnoho širšie možnosti má nasadenie **mobilných robotov** (s rôznou mierou autonómie od diaľkovo ovládaných vozidiel až po úplne autonómne zariadenia).

Zo základných aplikácií mobilnej robotiky spomeňme nasledovné:

- aplikácie v priemyselných podmienkach,
- aplikácie v poľnohospodárstve,
- aplikácie v zdravotníctve,
- aplikácie vo verejnom sektore,
- vojenské aplikácie,
- prieskum iných planét a zdraviu nebezpečných priestorov,
- aplikácie v domácnosti,
- robotické hračky, hobby a vzdelávacia robotika.

V priemyselných podmienkach sa možno stretnúť s automatickou dopravou materiálu a hotových výrobkov vo výrobných dielňach a skladoch. Vozíky môžu pritom vyžadovať interakciu s ľudskou obsluhou pri nakladaní a vykladaní alebo môžu disponovať schopnosťou priameho podávania objektov do výrobnéj linky či jednotlivých obrábacích centier. Častou aplikáciou sú aj automatizované vysokozdvížné vozíky, pričom ich nasadenie je možné realizovať nielen v priemyselných podnikoch, ale aj v obchodných, poštových a iných skladoch.



Obr.13.3 Vozík pre automatickú dopravu od firmy Egemin Automation Inc.

Aplikácie v poľnohospodárstve zahŕňajú automatickú orbu a sejbu, selektívne ošetrovanie a kontrolu zrelosti poľnohospodárskych plodín a tiež automatickú žatvu obilnín, kukurice a strukovín resp. zber ovocia a zeleniny. Väčšina spomínaných aplikácií vyžaduje výkonné

vizuálne systémy a algoritmy identifikácie objektov manipulácie. Boli realizované aj experimenty s plašením vtákov spôsobujúcich škody pri chove rýb a so strážením stád či krdľov hospodárskych zvierat.

Medzi aplikácie v **sektore zdravotníctva** možno zaradiť napr.

- rozvoz stravy, liekov, biologických vzoriek a iného zdravotníckeho materiálu v nemocniciach,
- prevoz pacientov a manipulácia s nimi,
- sprevádzanie a pomoc pri pohybe osobám so zníženou pohyblivosťou,
- špecifickou aplikáciou je mobilný robot zabezpečujúci teleprítomnosť lekára na operačnej sále alebo pri lôžku rehabilitujúceho pacienta.

Veľmi perspektívne sú aplikácie **vo verejnom sektore**, medzi ktoré sa dá zaradiť napr.:

- čistenie chodníkov a podláh verejných budov,
- čistenie okien výškových budov,
- stavebné a demolačné práce,
- inšpekcia kanalizácie resp. iných zle prístupných alebo zdraviu nebezpečných priestorov,
- sprevádzanie osôb v múzeách, úradoch a iných verejných budovách,
- vyhľadávanie a podanie prvej pomoci osobám v prípade zemetrasení, požiarov a ekologických nehôd,
- aktívna účasť na hasení požiaru,
- stráženie výrobných hál, skladov a verejných budov v mimopracovný čas,
- vyhľadávanie a zneškodňovanie výbušnín a iných nebezpečných látok.

Vojenské aplikácie zahŕňajú širokú škálu činností, ale v zásade možno tieto rozdeliť na:

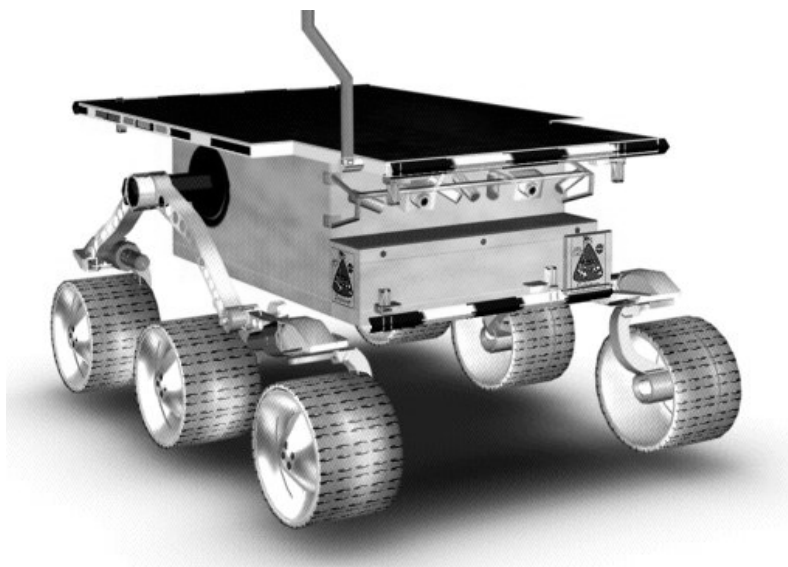
- realizácia mobilných terčov na nácvik streľby,
- vyhľadávanie a zneškodňovanie pozemných a podmorských mín,
- transport zranených, zásob, munície a iného vojenského materiálu,
- plnenie prieskumných úloh na zemi, zo vzduchu alebo pod vodou,
- priame bojové nasadenie, kedy je robot vybavený strelnými resp. inými druhmi zbraní.

V súčasnej etape ide väčšinou o diaľkovo riadené zariadenia, v budúcnosti ale možno očakávať zvyšovanie miery ich autonómie až po autonómne plnenie zadaných bojových úloh.



Obr.13.4 Vojenský prieskumný robot PackBot od firmy iRobot Corporation

Prieskum kozmických telies je štandardne realizovaný kolesovými alebo perspektívne aj kráčajúcimi mobilnými robotmi, ale v prípade planét s vlastnou atmosférou možno očakávať aj nasadenie lietajúcich robotov a v prípade planét s vodnými plochami aj plávajúcich robotov. Rovnakú technológiu možno aplikovať pri prieskume púští, aktívnych sopiek, území pokrytých ľadovcom a morského dna. V spomínaných prípadoch opätovne ide skôr o diaľkovo ovládané zariadenia, zatiaľ čo v prípade kozmického prieskumu vzhľadom na dobu letu signálu od robota k riadiacemu stredisku a späť je pre úspešné nasadenie potrebná určitá miera autonómie.



Obr.13.5 Sojourner Rover pre výskum Marsu skonštruovaný v JPL NASA

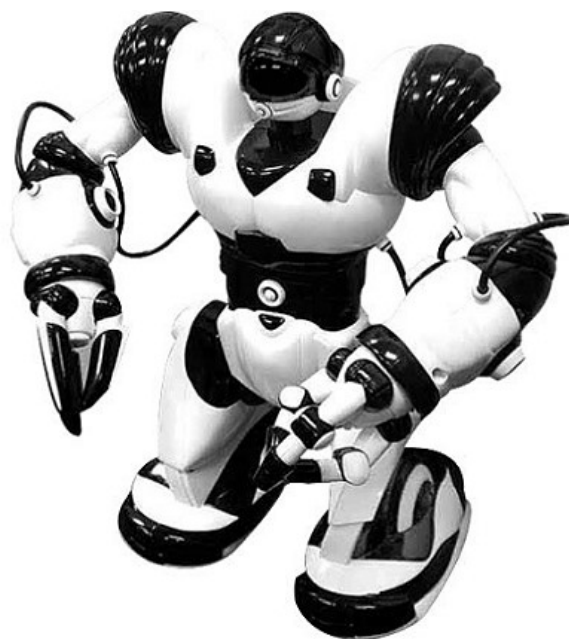
Najbúrlivejšie sa rozvíjajúcou oblasťou súčasnej robotiky je jej **aplikácia v domácnosti**, kde možno zaradiť napr. vysávanie a umývanie podláh, kosenie tráv a čistenie bazénov.



Obr.13.6 Robotický vysávač Roomba od firmy iRobot Corporation

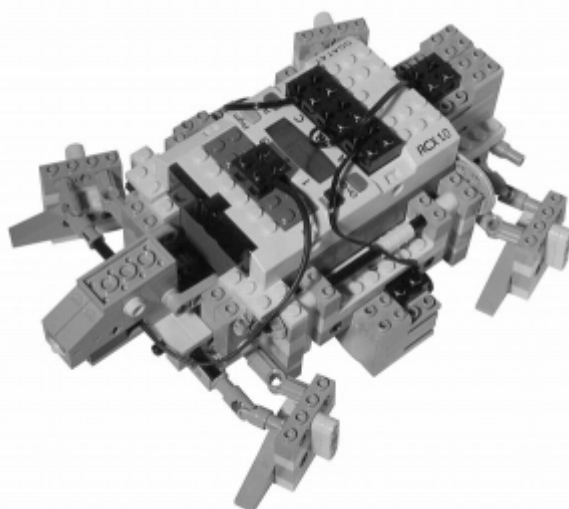
Špecifickou oblasťou zameranou na súkromných používateľov sú aj **obslužné resp. opatrovateľské roboty** so zameraním na starších ľudí a malé deti. V závislosti na vybavení a inteligencii robota tieto poskytujú rečový dialóg so zverenými osobami vrátane privolania pomoci v prípade núdzovej situácie resp. aj ich obsluhu vo forme podania lieku, nápoja a potravín a výkonu niektorých bežných domácich prác.

Z hľadiska veľkosti trhu je nezanedbateľnou oblasťou aj výroba **robotických hračiek** – či už v podobe robotizovaných domácich zvierat alebo hračiek humanoidného typu, ktoré poskytujú v rôznej miere autonómne chovanie v kombinácii s prvkami interakcie so svojim prostredím a so samotným dieťaťom v úlohe cvičiteľa a partnera.



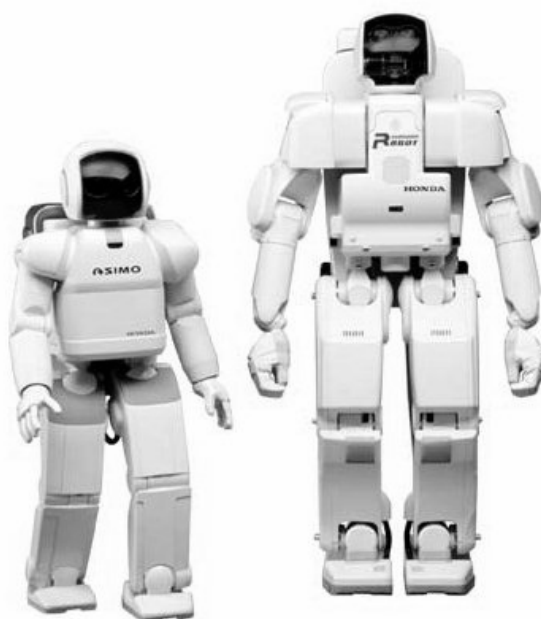
Obr.13.7 Humanoidný robot – hračka Robosapien od firmy Wow Wee

Veľmi populárnou oblasťou je aj oblasť **vzdelávacej mobilnej robotiky** pokrývajúcej najmä technicky orientovanú mládež a s tým súvisiacimi súťažami v robotickom futbale, sumo alebo basketbale.



Obr.13.8 Robot postavený zo stavebnice LEGO Mindstorms

Záverom možno spomenúť aj rôzne komplexné **humanoidné roboty**, ktorých výrobná cena ich zatiaľ vylučuje z komerčného predaja a v súčasnosti slúžia skôr na demonštráciu technologických možností svojich výrobcov.



Obr.13.9 Humanoidné roboty Asimo a P3 od firmy Honda

S robotickými technológiami priamo súvisia aj ďalšie oblasti, ktoré síce nepracujú priamo s robotickými manipulátormi resp. autonómnymi mobilnými platformami, ale používajú viaceré **súvisiace technológie**:

- animatronicke produkty (mechanická simulácia ľudskej tváre resp. celého ľudského trupu v spojení so syntézou reči) s praktickým použitím v nasledovných oblastiach: robotický hlásateľ, informátor alebo recepčná, simulácia vzácnych resp. vyhynutých zvierat, aplikácie v kinematografii a pod.,
- robot hudobník (hra na bicie, husle, gitaru alebo dychové nástroje),
- robot manekýn (nemobilný alebo mobilný),
- na dotyk interagujúce napodobeniny domácich zvierat pre terapeutické účely,
- bionické náhrady horných a dolných končatín (protézy),
- rehabilitácia pacientov po úraze pohybového aparátu,
- exoskeletony na zosilnenie fyzických možností ľudského tela, ktorých aplikácia siaha od manipulácie s ťažkými predmetmi, transport ťažkej vojenskej výstroje až po asistenciu pohybu osobám s ochabnutým svalstvom,
- vodenie nevidomých osôb na základe silovej väzby od vozíka pohybujúceho sa pred nevidomým,
- kráčajúce vozidlá pre pohyb v členitom teréne,
- osobné vozidlá s diferenciálnym podvozkom udržiavajúcim rovnováhu pomocou gyroskopických snímačov (vozidlá typu Segway, špeciálne typy invalidných vozíkov),
- automatická mestská doprava resp. asistencia pri riadení dopravného prostriedku spočívajúca v zret'azení za sebou idúcich vozidiel v pevnom rozstupe, prevzatí riadenia v kritických situáciách či automatickej realizácii parkovacieho manévru (tzv. inteligentný automobil).

14.LITERATÚRA

- [1] Kurfess, R.T.: Robotics and automation handbook CRC Press 2005.
- [2] Fu, K.S., Gonzales, R.C., Lee, C.S.G.: Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. McGraw-Hill Book C., 1987
- [3] Kalaš, V. a kol.: Nelineárne a číslicové servosystémy. ALFA, Bratislava, 1986
- [4] Šolc, F., Malaec, Z.: Robotické systémy, Praha, SNTL, 1984.
- [5] Jurišica, L.: Aplikovaná robotika, SVŠT Bratislava, 1988.
- [6] Kardoš, J.: Variable Structure Motion Control Systems, In: Frankovič, B. (Ed.): Trends in Control Theory and Applications, Bratislava: Veda Publishing House, 1999, Chapt. 4, pp. 132 - 158.
- [7] Kardoš, J.: Niektoré aspekty syntézy prepínacej funkcie v polohových VSS, In: AT&P Journal Plus, 2004, Vol. 11, No. 5, pp. 32 - 40.
- [8] Kardoš, J. - Harvey, D. - Howard, D.: Equivalent t-Suboptimal Control of a 3-Segment Leg, In: Journal of Electrical Engineering, 2001, Vol. 52, No 11 - 12, pp 348 - 351.
- [9] Kardoš, J. et al: A Variable Structure Controller for a 3-Segment Leg or Arm, In: Proceedings of the 13-th International Conference on Process Control, Štrbské Pleso, 2001, in electronic form.
- [10] Kardoš, J.: Chattering-free Variable Structure Control, In: Journal of Electrical Engineering, 2001, Vol. 52, No. 1 - 2, pp. 3 - 11.
- [11] Kardoš, J.: Ekvivalentné t-suboptimálne riadenie, In: AT&P Journal, 2000, Vol. 7, No. 4, pp. 72 - 75.
- [12] Kardoš, J.: Modifikácia t-suboptimálneho riadenia polohy, In: EE - Odborný časopis pre elektrotechniku a energetiku, Október 1999, Vol. 5, pp. 32 - 34.
- [13] Kardoš, J.: Robustné systémy riadenia polohy I, In: AT&P Journal, 1998, Vol. 5, No. 4, pp. 61 - 62.
- [14] Kardoš, J.: Robustné systémy riadenia polohy II, In: AT&P Journal, 1998, Vol. 5, No. 5, pp. 75 - 76.
- [15] Kardoš, J. - Jurišica, L.: Robust Robot Servosystem, In: Proceedings of the 7-th International Conference on Artificial Intelligence and Information-Control Systems of Robots, World Scientific, 1997, pp. 237 - 245.
- [16] Kardoš, J. - Jurišica, L.: Potlačanie autooscilácií v robustnom systéme riadenia polohy, In: EE - Odborný časopis pre elektrotechniku a energetiku, November 1996, Vol. 2, pp. A10 - A13.
- [17] Kardoš, J. - Kalaš, D.: Near-to-Minimum Time VSS with Application to Position Control, In: Journal of Electrical Engineering, 1994, Vol. 45, No. 12, pp. 1 - 12.
- [18] Kardoš, J. - Kalaš, D.: Time Sub - Optimal VSS Control, In: Proceedings of the 2-nd European Control Conference, Groningen, 1993, Vol. 2, pp. 863 - 867.
- [19] Hung, J.Y. - Gao, W. - Hung, J.C.: Variable Structure Control: A Survey, In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, Vol. 40, No. 1, pp. 2 - 22.
- [20] Utkin, V.I.: Sliding Modes in Control and Optimization, Heidelberg: Springer Verlag, 1992.
- [21] DeCarlo, R.A. - Zak, S.H. - Matthews, G.P.: Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial, In: Proceedings of the IEEE, 1988, Vol. 76, No. 3, pp. 212 - 232.
- [22] Utkin, V.I.: Discontinuous Control Systems: State of Art in Theory and Applications, In: Preprints of the IFAC 10-th World Congress on Automatic Control, Munich, 1987, Vol. 1, pp. 75 - 94.

- [23] Bühler, H.: Réglage par mode de glissement, Lausanne: Presses polytechniques romandes, 1986.
- [24] Utkin, V.I.: Sliding Modes and their Applications in Variable Sructure Systems, Moscow: Mir Publishers, 1978.
- [25] Utkin, V.I.: Variable Structure Systems with Sliding Modes (Survey Paper), In: IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, Vol. AC - 22, No. 2, pp. 212 - 222.
- [26] Feng, L., Borenstein, J., and Everett, B.: Where am I? Sensors and Methods for Autonomous Mobile Robot Localization. Technical Report, The University of Michigan UM-MEAM-94-21, December 1994.
- [27] Jones, J.L., Seiger B.A., Flynn, A.M.: Mobile Robots: Inspiration to Implementation. A.K.Peters, Ltd., 1999.
- [28] Siegwart, R., Nourbakhsh, I.: Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, Massachusets, April 2004.
- [29] <http://www.service-robots.org/>
- [30] <http://www.roboticsonline.com/>
- [31] <http://botmag.com/index.shtml>